UANL

FA

LXV

CICLO DE SEMINARIOS DE POSGRADO - OTOÑO - 2026



MEMORIAS

Maestría en Ciencias con Orientación en:

- Ingeniería en Biosistemas
- Ingeniería en Industrias Alimentarias

VISIÓN UANL 2040

30 de noviembre y 01 de diciembre de 2026 / 8:30 horas
Biblioteca de Ciencias Agropecuarias y Biológicas
Aula Usos Múltiples, Facultad de Agronomía
Campus de Ciencias Agropecuarias UANL

La excelencia por principio la educación como instrumento

DIRECTORIO

Dr.Med. Santos Guzmán López

Rector

M.C. Carlos Alberto Hernández Martínez

Director

Ph.D. Francisco Zavala García

Subdirector de Posgrado e Investigación

Dra. Nelly Cristina Ramírez Grimaldo

Secretaria de Posgrado e Investigación

COORDINADORES DE SEMINARIOS

Dr. Luis Enrique Espinoza Orozco

Dra. Ma. Del Carmen Ojeda Zacarías

Ph.D. Alejandro Isabel Luna Maldonado

Dr. Victor Eustorgio Aguirre Arzola

PRESENTACIÓN

La Subdirección de Posgrado e Investigación de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FAUANL), organiza el LXV Ciclo de Seminarios de Posgrado e Investigación. En este Ciclo de Seminarios, los estudiantes de los programas educativos de Doctorado en Ciencias Agrícolas, Maestría en Ciencias en Producción Agrícola, Maestría en Ciencias con Orientación en: a) Ingeniería en Biosistemas y b) Ingeniería en Industrias Alimentarias, presentan sus avances de investigación ante especialistas externos invitados, evaluadores internos, comunidad estudiantil y docentes de la FAUANL.

Durante las ponencias, los ponentes reciben opiniones y sugerencias de los evaluadores y asistentes en general, sobre el desarrollo de sus tesis, permitiéndoles enriquecer sus trabajos de investigación, impactando positivamente en la calidad y el avance de sus manuscritos de tesis.

Estos eventos académicos, a través de su historia, han sido de gran beneficio para que los estudiantes cumplan en tiempo y forma su titulación y la difusión de sus resultados a través de artículos en revistas científicas de circulación nacional e internacional, mejorando así la eficiencia terminal exigida por el Sistema Nacional de Posgrados (SNP) / SECIHTI. Además, han representado la oportunidad para dar seguimiento al desarrollo de los programas educativos de los estudiantes y han sido una de las fortalezas de nuestros programas de posgrado para mantener su calidad, permitiendo alcanzar y conservar su reconocimiento en el SNP.

En este LXV Ciclo de Seminarios de Posgrado e Investigación, programado para los días 30 de noviembre y 01 de diciembre de 2026, se expondrán 40 trabajos de avances de investigación, además de dos conferencias magistrales por parte de externos.

Es importante agradecer a los Coordinadores del LXV Ciclo de Seminarios de Posgrado y al personal de la Subdirección de Posgrado e Investigación, por la organización del evento, así como también a los estudiantes de posgrado, asesores y comités particulares de tesis por su compromiso en la elaboración y entrega oportuna de los artículos de investigación para que este ciclo de seminarios pudiera realizarse.

Atentamente

Scientia Agricolis Vita

Ph.D. Francisco Zavala García
Subdirector de Posgrado e Investigación

Dra. Nelly Cristina Ramírez Grimaldo
Secretaria de Posgrado e Investigación

Dr. Luis Enrique Espinoza Orozco
Coordinador de Seminarios del P.E.
Doctorado en Ciencias Agrícolas

Dra. Ma. Del Carmen Ojeda Zacarías
Coordinadora de Seminarios del P.E.
Maestría en Ciencias en Producción Agrícola

Ph.D. Alejandro Isabel Luna Maldonado
Coordinador de Seminarios del P.E.
Maestría en Ciencias con orientación
en Ingeniería en Biosistemas

Dr. Victor Eustorgio Aguirre Arzola
Coordinador de Seminarios del P.E.
Maestría en Ciencias con orientación
en Ingeniería en Industrias Alimentarias

El contenido de los escritos en esta Memoria es responsabilidad de los autores.

MEMORIAS

Ir al contenido de

Maestría en Ciencias con Orientación en:

Página

- Ingeniería en Biosistemas.....6
- Ingeniería en Industrias Alimentarias...87

UANL

FA

LXV

CICLO DE SEMINARIOS DE POSGRADO - OTOÑO - 2026



MEMORIAS

Maestría en Ciencias con Orientación en:
Ingeniería en Biosistemas

VISIÓN UANL 2040

30 de noviembre y 01 de diciembre de 2026 / 8:30 horas
Biblioteca de Ciencias Agropecuarias y Biológicas
Aula Usos Múltiples, Facultad de Agronomía
Campus de Ciencias Agropecuarias UANL

La excelencia por principio la educación como instrumento

PROGRAMA EDUCATIVO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA EN BIOSISTEMAS

PRIMER SEMESTRE

Determinación de la capacidad de remoción de cromo total de una columna empacada con perlas de celulosa bacteriana
Azalia Guadalupe Cortés-Luna; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Nancy del Pilar Medina-Herrera; Julia Mariana Márquez-Reyes **9**

Desarrollo y validación de un Gemelo Digital Inteligente mediante la integración de información multimodal e inteligencia artificial para el monitoreo y predicción del estrés hídrico en *Opuntia ficus-indica*
Isabel Alejandra Félix-Rocha; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Efraín Alcorta-García; Julia Mariana Márquez-Reyes; Héctor Flores-Breceda; Jesús Rodolfo Valenzuela-García **20**

Obtención de microalgas de sistemas de tratamiento de aguas para la biorremediación de efluentes y la aplicación de la biomasa y el agua tratada en un sistema hidropónico
Noé Arath Cardiel-Damas; Celestino Garza-Gómez; Rocío Alejandra Chávez-Santoscoy; Héctor Flores-Breceda; Daniel Misael Garza-García; Jesús Alberto Lara-Reyes **34**

Revalorización de residuos de Nogal pecanero para la formulación de empaques bioactivos
Paola Anahí Torres-de León; Romeo Rojas-Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila; Julia Mariana Márquez-Reyes **45**

Uso de agroecosistemas como hábitat reproductor de la avifauna terrestre en Marín, Nuevo León
Rubén García-Espinosa; Maginot Ngangyo-Heya; Lidia Rosaura Salas-Cruz; Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena; Marilyn Castillo-Muñoz **52**

TERCER SEMESTRE

Evaluación de *Sinorhizobium meliloti* como solubilizadora de fósforo en plántulas de alfalfa (*Medicago sativa* L.)
Paola Montserrat Navarro-Ibarra; Guadalupe Gutiérrez-Soto; Iosvany López-Sandin; Jesús Andrés Pedroza-Flores; Isidro H. Almeyda-León; Hafiz N.Iqbal **60**

CUARTO SEMESTRE

Producción de ficocianobilina de *Synechocystis sp.* en sistemas recombinantes: Expresión en el sistema eucariota *Nicotiana benthamiana*
Luis Ángel García-Palomino; Sugey R. Sinagawa-García; Celestino García-Gómez; Shimizu Keiich; Edward A. Espinoza-Sánchez **73**

Determinación de la capacidad de remoción de cromo total de una columna empacada con perlas de celulosa bacteriana.

Azalia Guadalupe Cortés-Luna*; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Nancy del Pilar Medina-Herrera; Julia Mariana Márquez-Reyes.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399. *Email: azalia.cortesl@uanl.edu.mx

Resumen. La contaminación por cromo en cuerpos de agua constituye una problemática ambiental de alta relevancia debido a su toxicidad y potencial impacto sobre la salud humana y los ecosistemas. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la capacidad de remoción de cromo total mediante una columna empacada con perlas de celulosa bacteriana (CB), alginato de sodio (AG) y polivinilpirrolidona (PVP). La celulosa bacteriana será producida a partir de la fermentación de Kombucha. Las perlas obtenidas de la formulación de CB+AG+PVP serán caracterizadas mediante análisis fisicoquímicos, estructurales y mecánicos para determinar su estabilidad. Posteriormente, se evaluará su desempeño en sistemas por lote bajo diferentes condiciones (concentración inicial de cromo, pH y temperatura) determinando parámetros como porcentaje de remoción y capacidad de adsorción. La formulación con mejores resultados será seleccionada para su evaluación en una columna empacada, analizando curvas de ruptura, y estabilidad durante ciclos de regeneración y reutilización. Se espera que este biomaterial represente una alternativa eficiente, sustentable y económicamente viable para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo u otros contaminantes.
Palabras clave: Cromo total; Celulosa bacteriana; Adsorción; Columna empacada; Tratamiento de aguas residuales.

Abstract. Chromium contamination in aquatic environments poses a significant environmental challenge due to its toxicity, persistence, and adverse effects on human health and ecosystems. This study aims to evaluate the removal of total chromium using a packed-bed column filled with beads composed of bacterial cellulose (BC), sodium alginate (SA), and polyvinylpyrrolidone (PVP). Bacterial cellulose will be produced through Kombucha fermentation and incorporated into the adsorbent matrix. The synthesized beads will be characterized using physicochemical, structural, and mechanical analyses to assess their properties and stability. Their adsorption performance will first be evaluated in batch systems under varying operational conditions, including initial chromium concentration, pH, and temperature. Removal efficiency and adsorption capacity will be determined as key performance indicators. The formulation exhibiting the best adsorption performance will subsequently be tested in a continuous packed-bed column, where breakthrough behavior, regeneration potential, and reusability will be investigated. The proposed biomaterial is expected to provide an efficient, sustainable, and cost-effective alternative for the treatment of chromium and other pollutants.
Keywords: Total chromium; Bacterial cellulose; Adsorption; Packed-bed column; Wastewater treatment

Introducción

Los iones de metales pesados (Mn, Cu, Co, Fe, Ni, Zn y Cr) causan graves problemas de salud incluyendo trastornos neurológicos, daño orgánico, cáncer y disfunción cerebral (Fernando, 2025). En relación, la contaminación de agua por cromo (Cr) es uno de los problemas ambientales y de salud pública más serios, por lo cual, la Organización Mundial de la Salud establece el límite máximo permitido de 0.05 $\mathrm{mg/L}$ para el Cr en el agua potable y superficial (Singh *et al*., 2025). De igual manera, dentro de las especificaciones de metales y metaloides de la NOM-127-SSA1-2021 se establece dicho límite permisible para el Cr total (Secretaría de Salud, 2022). Por lo anterior, la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece que el agua para dicho fin debe contar con una calidad adecuada para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades relacionadas con el agua. Determinando como aguas residuales a las de composición variada, provenientes de descargas de uso público, industrial, agrícola, plantas de tratamiento y en general.

Derivado de la alta toxicidad del Cr en la salud humana, su eliminación del agua se ha vuelto crucial para mitigar los riesgos y garantizar agua potable. Sin embargo, las limitaciones de métodos fisicoquímicos como ósmosis inversa, intercambio iónico y precipitación química han derivado en la búsqueda de métodos alternativos, ecológicos, rentables y eficientes (Singh *et al*., 2025).

En la actualidad existen diferentes estrategias para la eliminación y control de la contaminación. La biotecnología es toda innovación tecnológica que utilice recursos biológicos para la creación o modificación de procesos para remediar un problema de contaminación (Márquez Reyes, 2013). El uso de la biotecnología para la remoción de contaminantes se sigue explorando debido a su versatilidad, sustentabilidad y sostenibilidad que ha demostrado en los últimos años. Una de las estrategias más utilizadas para la remoción de metales pesados, basada en tecnologías de sorción, emplea diferentes tipos de materiales que son utilizados como adsorbentes; estos son generados a partir de materiales orgánicos e inorgánicos.

La adsorción es considerada una de las tecnologías más eficientes para remover diversos contaminantes. Los mecanismos que determinan su eficiencia son las características fisicoquímicas del adsorbente (Song *et al*., 2020) y la concentración inicial de iones metálicos.

Investigaciones previas realizaron experimentos a nivel laboratorio con reactores en lotes y columnas con la finalidad de comprender los mecanismos de reacción y la cinética asociada a la eliminación del Cr en donde tradicionalmente se implementan la pirita y el $\mathrm{Fe^0}$ demostrando que la interrelación de los factores logra una eficiencia en la remoción de Cr (Oral *et al*., 2022)

Sin embargo, una buena estrategia es generar biomateriales a partir de residuos agroindustriales. Los biomateriales son derivados de recursos naturales

renovables, diseñados para integrarse de manera biocompatible en sus diversas aplicaciones, las cuales son muy variadas, desde tratamiento de aguas, agentes de absorción, hidrogeles, entre otros.

Anteriormente, se determinó la absorción de Cr (VI) por Sayago *et al*., (2024) en un sistema con alta estabilidad (225 mg Cr/L) eliminando la necesidad de agentes químicos. El estudio fue desarrollado a diversas concentraciones iniciales (50, 100, 200, 300 y 600 mg/L), cuantificando la remoción en intervalos de 20 min. De igual manera, estudios evaluaron la remoción de Cr (VI) a diferentes temperaturas con una capacidad de adsorción de 140 mg Cr/L a altas temperaturas y 125 mg Cr/L a bajas temperaturas (Fernando, 2025). En donde la capacidad de adsorción se determinó suspendiendo 0.3 g de biomasa de celulosa bacteriana en 100 mL de solución de Cr (VI) por 140 min a 200 rpm.

La celulosa bacteriana (CB) es un biomaterial que puede generarse a partir de procesos de fermentación de Kombucha, empleando residuos agroindustriales (Garza Loera, 2026), es decir, la CB es un polímero extracelular sintetizado principalmente por bacterias. Cuenta con una alta pureza derivada de la ausencia de hemicelulosa y lignina, gran capacidad de retención de agua, excelente biodegradabilidad y afinidad biológica (Pineda *et al*., 2012). Es considerada una solución para el tratamiento de aguas debido a que su composición exhibe una adsorción significativa en el proceso de remoción de metales pesados en óptimas condiciones.

Otros estudios centrados en la búsqueda de adsorbentes no tóxicos, de bajo costo y con alta capacidad de adsorción han determinado que la CB cuenta con potencial para eliminar contaminantes presentes en el agua a través del intercambio de cationes. En dicho estudio realizado por Sayago *et al*., (2024) se desarrollaron experimentos de adsorción por lotes en constante agitación y bajo condiciones de pH neutro, lo cual, favorece el proceso de adsorción de la biomasa. Los resultados mostraron la capacidad de adsorción de la CB debido a la gran cantidad de sitios activos para la adsorción química de metales pesados, alcanzando los 225 $\mathrm{mg/L}$ después de cuatro ciclos de elución continua y reutilización. Destacando la presencia de grupos hidroxilo (OH), donde se acumulan distintos iones metálicos pesados.

El objetivo de la presente investigación es evaluar la capacidad de remoción de cromo total en agua sintética mediante una columna empacada con perlas de celulosa bacteriana (CB), alginato de sodio (AG) y polivinilpirrolidona (PVP).

Materiales y Métodos

1. Producción de celulosa bacteriana

Para la producción se utilizará té verde comercial (Hill Country Fare). Se utilizará agua a 85 ºC con 6 g/L de té verde y 50 g/L de dextrosa, dejando la infusión a 85 ºC durante 15 minutos. Se inoculará con 10 % V/V de inóculo de Kombucha. La mezcla se dejará fermentar por 20 días en condiciones de temperatura de 25±2 ºC.

Purificación de la celulosa bacteriana

Se retirará cuidadosamente la película de CB del medio de fermentación, se lavará con agua destilada para eliminar restos del medio. Posteriormente se licuará con NaOH (0.5 M) para posteriormente calentar a 80 °C durante 30 minutos con agitación suave. Finalizado el proceso, se lavará con abundante agua destilada hasta neutralizarla a pH 7.

2. Formulación de las perlas de celulosa.

Preparación de la celulosa bacteriana

Se pesará la CB hidratada según cada tratamiento (Cuadro 1).

Preparación del alginato de sodio (AG)

En agua destilada se colocará 2% del AG paulatinamente y se mantendrá en agitación a 400-600 rpm durante 30-60 min con el fin de permitir la hidratación y obtener una solución uniforme.

Preparación polivinilpirrolidona (PVP)

Se disolverá la cantidad adecuada de PVP (Cuadro 1) en agua destilada y se agitará hasta obtener una solución homogénea.

Mezclas de polímeros

La solución de PVP se incorporará lentamente a la de AG, manteniendo la agitación a 300-500 rpm durante 20-30 min. Posteriormente y de manera gradual, se adicionará la CB, agitando a 500-700 rpm durante 20-30 min.

Cloruro de calcio

Preparación de la solución de $CaCl_2$ (2% p/v) en agua destilada para la reacción de gelificación.

3. Formulación de las perlas de $CB + AG + PVP$

En un dosificador se colocará la mezcla $CB + alginato + PVP$ y se formarán gotas las cuales caerán en la solución de $CaCl_2$ y se dejarán durante 45 min para favorecer el entrecruzamiento

-Lavado de las perlas

Para eliminar $CaCl_2$ residual, polímero no incorporado, Ca^{2+} libre y $NaCI$ liberado; las perlas se lavarán en diferentes ocasiones con agua destilada y se recuperarán con un tamiz.

Cuadro 1-Formulaciones de las perlas de celulosa bacteriana + alginato de sodio+ polivinilpirrolidona.

	CB (% sólidos)	AG (%)	PVP (%)
T1	1.0	2.0	0
T2	1.0	2.0	0.5
T3	1.0	2.0	1.0
T4	1.0	2.0	1.5
T5	1.5	2.0	1.0
T6	0	0	0
T7	1.5	2.0	1.0

CB: celulosa bacteriana; AG: alginato de sodio; PVP: polivinilpirrolidona.

4. Caracterización de la Celulosa Bacteriana (CB).

Determinación de color

Se realizará con un colorímetro (Konica-Minolta) mediante las coordenadas CIE-L*a*b* en tres puntos distintos de la perla en seco, utilizando un fondo blanco y negro (AL-Kalifawi & Hassan, 2014).

Tamaño de partículas

Se medirán perlas al azar con un medidor de espesor digital (n=10).

Ensayo de Biodegradabilidad

Se analizará por solubilidad en agua y degradación en suelo. Al inicio se pesarán las perlas y se colocarán en bolsas de gasa, las cuales se colocarán a 7 cm de profundidad en un suelo activo con una humedad relativa del 50%.

Los experimentos se realizarán de forma independiente por triplicado durante un periodo de 45 días, analizando cada 7 días los primeros 28 días y posteriormente cada tercer día. Se tomará el peso final y se calculará la degradación como porcentaje de pérdida de peso (WL) según lo descrito por Kaya *et al*., (2018) utilizando la ecuación 1.

$$WL(\%) = \frac{Perdida\ de\ peso}{Peso\ inicial} * 100 \quad ec(1)$$

Solubilidad en agua

Se utilizarán perlas hidratadas que se colocarán en 15 mL de agua destilada y en agitación a 100 rpm por 24 h. Transcurrido el tiempo, se cuantificará el peso final de la perla en fresco y finalmente se meterá a secar para obtener el peso final seco. La solubilidad de agua se determinará utilizando la ecuación 2

$$\%Solubilidad = \frac{P.S.I - P.S.F}{P.S.F} * 100 \ \ ec(2)$$

Dónde: P.S.I es peso seco inicial y P.S.F peso seco final.

FTIR-ART

La caracterización de espectroscopía (FTIR) se realizará mediante la técnica de reflexión total atenuada (ATR), con 25 barridos (Thermo Scientific Nicolet iS10 FT-IR) a una longitud de onda entre 4000 a $400\mathrm{cm}^{-1}$.

Microscopia electrónica De Barrido (SEM)

Para conocer la morfología de la superficie, se utilizará la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) con un microscopio electrónico de barrido SM-510 (TOPCON, Japón) a 15 kV. Las muestras serán previamente recubiertas con oropaladio durante 90 s, con una distancia de trabajo de 18 mm. Las muestras se colocarán en cinta de carbono de doble cara conductora, y se fijarán previamente a aluminio. Las muestras se recubrirán con una fina capa de oro utilizando un Sputter Denton Vacuum modelo DESK II.

Análisis de Difracción De Rayos X (XRD)

El ordenamiento atómico de la perla se determinará por difracción de rayos X, utilizando un difractómetro de polvo Siemens D500, con un voltaje de 35 kV y una corriente de 25 mA con Cu Kα = 1,5406 Å. Los difractogramas se obtendrán con el rango del ángulo de Bragg (2θ) de 5◦ y 35◦ con la configuración de difracción de polvo en geometría Bragg-Brentano.

Calorimetría Diferencial De Barrido (DSC)

Se determinará en un TA (DSC 2500). Las muestras se colocarán en crisoles de aluminio en un rango de temperatura entre 0 °C y 350 °C bajo una atmósfera de nitrógeno siguiendo la norma ASTM D3418-15.

Propiedades Mecánicas

Previamente, las perlas serán acondicionadas durante 48 h a temperatura ambiente (25 °C) y humedad relativa (HR) del 58% generada por una solución salina sobresaturada de NaBr.

Se implementará un analizador de texturas XT Express Enhanced (Stable Micro

Systems, Inglaterra) para determinar la resistencia a la compresión y la fuerza de ruptura, el módulo de elasticidad, la viscoelasticidad, la capacidad de recuperación elástica y se hará un perfil de análisis de textura para determinar la dureza, la cohesividad y la adhesividad.

Método por peso relación de hinchamiento en masa, Qw.

Se pesará la perla de polímero seca W_s, colocarla en agua destilada durante el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio, por último, eliminar el exceso de líquido de la superficie y pesarla W_h. El experimento se realizará a diferentes tiempos con el fin de graficar Q frente al tiempo (0 a 72 h) y se utilizará la ecuación 3

$$Qw = \frac{W_h - W_s}{W_s} \quad ec(3)$$

W_h peso de perla hinchada y W_s peso de perla seca.

Pérdida de masa

Se colocará 1 g de perlas en 100 mL de Cr (10 mg/L) y se evaluará la degradación química o lixiviación de la PVA/AG tras ciclos de agitación en la solución de Cr. Se empleará la ecuación 4.

$$\%ML = \frac{W_0 - W_f}{W_0} * 100 \quad ec(4)$$

Donde W_0 es el peso seco inicial de la perla y W_f es el peso seco tras la remoción y secado. Un $\%ML < 5\%$ se considera un indicador de excelente estabilidad química.

Cálculo de estabilidad estructural por lixiviación de calcio

Se colocará 1 g de perlas en 100 mL de Cr (10 mg/L) y se cuantificará indirectamente qué tanto se debilita el entrecruzamiento calculando la pérdida de masa corregida con la ecuación 5.

$$\%PM(72\ h) = \left(\frac{M_0 - M_{72}}{M_0}\right) * 100 \quad ec(5)$$

Donde M_0 es el peso de las perlas secas antes del tratamiento y M_{72} peso de las perlas tras 72 h en la solución de Cr, lavadas suavemente con agua destilada y secadas a 50 ºC a peso constante.

Reactor en lote

Condiciones para los sistemas en lote por triplicado por experimento

$$50\ mL\ de\ solución + 1g\ de\ perlas$$

En donde la concentración inicial es de $1, 5, 10, 25, 50, 100\ \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ de Cr. La variación de pH de 2-6 y las temperaturas de 25, 35 y 45 °C, con una agitación de 150 rpm en un periodo de tiempo de 24 h.

Variables a considerar:

Porcentaje de remoción

Evaluado mediante la siguiente ecuación 6:

$$\%R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} * 100 \quad ec(6)$$

Y capacidad de adsorción mediante la ecuación 7:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad ec(7)$$

Donde: C_0 es concentración inicial mg/L,C_e es la concentración final mg/L, V es el volumen de solución L y m la masa seca equivalente de adsorbente g.

5. El efecto del cromo en el alginato de calcio

El Cr en solución suele encontrarse como cromato; los aniones de este pueden competir químicamente o alterar la carga superficial de la perla. Por lo cual, se empleará una relación de 1 g de perlas en 100 mL de Cr (10 mg/L). Para determinar si la inestabilidad es por el pH, el agua o el propio Cr, se calculará el factor de degradación del contaminante utilizando la ecuación 8:

$$FD = \%P.M_{Cr} - \%P.M_{Blanco\,(agua)} \quad ec(8)$$

Donde: FD es el factor de degradación, $\%P.M_{Cr}$ porcentaje de pérdida de masa de las perlas expuestas al cromo y $\%P.M_{Blanco\,(agua)}$ porcentaje de pérdida de masa de las perlas en el experimento de control (agua).

En donde FD cercano a 0 significa que el Cr no destruye la matriz polimérica y un FD positivo alto demuestra que el Cr esta oxidando los grupos hidroxilo de la celulosa bacteriana/alginato, rompiendo los enlaces reforzados por el calcio.

Con el fin de comparar la capacidad de adsorción entre los ciclos (secuencia completa de adsorción) con la del primer ciclo, se empleará la siguiente ecuación 9:

$$\%FRC = \frac{q_{max,n}}{q_{max,1}} * 100 \quad ec(9)$$

Donde $\%FRC$ es el porcentaje de capacidad de remoción, $q_{max,n}$ es la capacidad máxima de adsorción obtenida en el ciclo n $(mg\,g^{-1})$, $q_{max,1}$ es la capacidad máxima de adsorción obtenida en el primer ciclo $(mg\,g^{-1})$.
Una caída drástica del FRC indica que el adsorbente está perdiendo estabilidad estructural o sitios activos (Sayago *et al*., 2024c).

6. Espectroscopía de Absorción Atómica por Flama (EAA)

Para la cuantificación de Cr se desarrollará el método con una longitud de onda ideal de 357.9 nm, un ancho de banda de 0.5 nm y una longitud de onda de emisión de 425.4 nm. Trabajando con flujos de aire y acetileno.
Las soluciones estándar a preparar son 5, 10, 20, 40, 80, 100, 300 y 600 mg/L.

7. Modelo de Langmuir y Freundlich

La isoterma de Langmuir–Freundlich describe y explica la distribución de energía de adsorción en la superficie de sorbetes heterogéneos. En donde, el comportamiento de Langmuir (ecuación 10) representa altas concentraciones de adsorbo y Freundlich (ecuación 11) las bajas concentraciones (Sun *et al*., 2022).
-Modelo Langmuir:

$$q_e = \frac{KLq_mC_e}{1 + KLC_e} \quad ec(10)$$

Donde: q_m es la capacidad de adsorción máxima (mg/g^{-1}), q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio, C_e es la concentración restante en la solución en equilibrio (mg/L^{-1}) y KL es la constante de

Langmuir ($\mathrm{L/mg^{-1}}$) la cual indica la afinidad en la adsorción del estudio.

Modelo Freundlich

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad ec(11)$$

Donde: $\mathrm{q_e}$ es la capacidad máxima de adsorción, $\mathrm{K_f}$ y n el coeficiente de Freundlich y el factor de heterogeneidad, respectivamente.

8. Regeneración del adsorbente

Posterior a la saturación, se detendrá la alimentación de Cr, se retirará el agua residual y se realizará un lavado con agua. Se incorpora un regenerante ácido suave $\mathrm{HCI}\ a\ 0.1\mathrm{M}$, por último, se lava y neutraliza para repetir el ciclo (5 ciclos).

9. Estabilidad en ciclos de reutilización

Para evaluar que el proceso sea económicamente viable, las perlas deben resistir la elución del Cr usualmente lavado con $\mathrm{NaOH\ o\ HCI}$ para volver a ser usadas. La estabilidad cíclica se determinará comparando la eficiencia de remoción a lo largo de los ciclos empleando la ecuación 12:

$$\%R_n = \frac{C_0 - C_e}{C_0} * 100 \quad ec(12)$$

10. Reactor continuo

La columna de vidrio será empacada con las perlas de CB+AG+PVP que den mejor resultado en la fase en lote y operará de igual manera con las mejores condiciones de pH, temperatura y concentración previamente establecidas.

En su operación se determinará la concentración de Cr por EAA para determinar el porcentaje de remoción, la curva de ruptura (ecuación 13 y ecuación 14), punto de ruptura (ecuación 15) o punto de agotamiento (ecuación 16), mediante las cuales se determinará la capacidad de adsorción y el tiempo efectivo de operación del sistema.

Curva de ruptura:

$$\frac{C_t}{C_0} vs. tiempo\ ec(13)$$

$$\frac{C_t}{C_0} vs. volumen\ tratado\ ec(14)$$

Punto de ruptura:

$$\frac{C_t}{C_0} = 0.05\ ec(15)$$

Punto de agotamiento:

$$\frac{C_t}{C_0} = 0.90\ ec(16)$$

Donde: $\mathrm{C_t}$ indica la concentración del contaminante (Cr) en la salida de columna en el tiempo y $\mathrm{C_0}$ es la concentración inicial del contaminante en la entrada de la columna.

Por último, se evaluará su desempeño y capacidad de adsorción de acuerdo con los modelos de: Yoon Nelson (ecuación 17), Thomas (ecuación 18) y Adams Bohart (ecuación 19).

Yoon-Nelson $$\boldsymbol{In\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right) = k_{YN}\,(t - \tau)\ \ ec(17)}$$

Thomas $$\boldsymbol{\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + exp\left[k_{Th}\left(\frac{q_0 m}{Q - C_0 t}\right)\right]}}\ ec(18)$$

Adams-Bohart $\boldsymbol{In\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k_{AB}C_0 t - k_{AB}N_0\frac{z}{v}}$ ec(19)

Yoon Nelson donde: C_t es la concentración del contaminante (Cr) en el efluente en el tiempo t, C_0 es la concentración inicial del contaminante, k_{YN} es la constante de velocidad del modelo $(\min^{-1})$, t es el tiempo de operación y τ es el tiempo requerido para alcanzar el 50% de ruptura o saturación.

Thomas donde: k_{YN} es la constante cinética del modelo de Thomas $(mL\ mg^{-1}\ min^{-1})$, q_0 es la capacidad máxima de adsorción del adsorbente $(mg\ g^{-1})$ y m es la masa del adsorbente contenida en la columna (g), Q es el caudal de alimentación $(mL\ min^{-1})$ y t es el tiempo de operación (min).

Adams Bohart donde:
k_{AB} es la constante cinética del modelo $(L\ mg^{-1}min^{-1})$, t es el tiempo de operación y N_0 es la capacidad de adsorción del lecho $(mg\ L^{-1})$, Z es la altura del lecho del adsorbente (cm) y U_0 es la velocidad lineal superficial del fluido a través de la columna $(cm\ min^{-1})$.

Plan de trabajo y calendarización

Cuadro 2-Plan de trabajo y ccalendarización de actividades.

	2026		2027	
	Ene.-Jun.	**Ago.-Dic.**	**Ene.-Jun.**	**Ago.-Dic.**
Redacción del anteproyecto	X			
Análisis y pruebas de laboratorio		X		
Evaluación por estadísticos	X			
Escrito final de la tesis				X
Defensa de tesis				X

Desglose financiero

Cuadro 3-Desglose financiero

	Monto para utilizar	**Fuente del recurso**
	$300,000	ProACTI Programa de apoyo a la ciencia, tecnología e innovación.
Total	**$300,000**	

Agradecimientos

A el comité de Tesis,
Facultad de agronomía-UANL.

Referencias Bibliográficas

AL-Kalifawi, E. J., & Hassan, I. (2014). Factores que influyen en el rendimiento de celulosa bacteriana de Kombucha (Khubdat Humza). *Revista Científica de Bagdad*, *11*, 1420–1428.

Fernando, C. S. U. (2025). Determining the Impact of Temperature on Cr (IV) Adsorption Using Bacterial Cellulose Biomass as an Adsorbent. *Processes*, *13*(11), 3493. https://doi.org/10.3390/pr13113493

Garza Loera, M. A. (2026). Revalorización De Residuos Agroindustriales Para La Producción Y Caracterización De Celulosa Bacteriana Como

Potencial Sustrato Germinador De Lisianthus [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Agronomía .

Márquez Reyes, J. M. (2013). Desarrollo Optimización E Integración De Tecnologías Sustentables A Base De Un Biorreactor Empacado De Flujo Ascendente Y Un Humedal Artificial De Flujo Horizontal Sub Superficial Para El Tratamiento De Agua Contaminada Con Cromo Y Plomo [Tesis de Posgrado]. Facultad de Ciencias Biológicas.

Oral, O., Yigit, A., & Kantar, C. (2022). Role of reactor type on Cr(VI) removal by zero-valent iron in the presence of pyrite: Batch versus sequential batch reactors. *Journal of Environmental Management*, *320*, 115854. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115854

Pineda, L. D. C., Mesa, L. A. C., & Riascos, C. A. (2012). Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión. *Ingeniería y Ciencia*, *8*, 307–335.

Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., & Aguilar, A. M. L. (2024a). Bacterial Cellulose-Derived Sorbents for Cr (VI) Remediation: Adsorption, Elution, and Reuse. *Polymers*, *16*(18), 2605. https://doi.org/10.3390/polym16182605

Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., & Aguilar, A. M. L. (2024b). Bacterial Cellulose-Derived Sorbents for Cr (VI) Remediation: Adsorption, Elution, and Reuse. *Polymers*, *16*(18), 2605. https://doi.org/10.3390/polym16182605

Sayago, U. F. C., Ballesteros, V. B., & Aguilar, A. M. L. (2024c). Bacterial Cellulose-Derived Sorbents for Cr (VI) Remediation: Adsorption, Elution, and Reuse. *Polymers*, *16*(18), 2605. https://doi.org/10.3390/polym16182605

Secretaría de Salud. (2022, May 2). *NOM-127-SSA1-2021 Agua para uso y consumo humano-Limites permisibles para la calidad del agua.* . Diario Oficial de La Federación. platiica.economica.gob.mx

Singh, V., Singh, A. K., Abhishek, K., Kumar, V., Ranjan, R., Kumari, S., Vedika, S., Bhat, A. H., Mishra, V., & Kumar, A. (2025). Sustainable reduction of Cr (VI) by green synthesized chitosan coated copper (II) nanoparticles in batch reactor system: Isotherm, thermodynamics and kinetic study. *International Journal of Biological Macromolecules*, *322*, 146868. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146868

Song, S., Liu, Z., Zhang, J., Jiao, C., Ding, L., & Yang, S. (2020). Synthesis and Adsorption Properties of Novel Bacterial Cellulose/Graphene Oxide/Attapulgite Materials for Cu and Pb Ions in Aqueous Solutions. *Materials*, *13*(17), 3703. https://doi.org/10.3390/ma13173703

Sun, Z., Tian, C., Yang, T., Fu, J., Xu, H., Wang, Y., & Lin, Z. (2022). A MOF-based trap with strong affinity

toward low-concentration heavy metal ions. *Separation and Purification Technology*, *301*, 121946. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121946

Desarrollo y validación de un Gemelo Digital Inteligente mediante la integración de información multimodal e inteligencia artificial para el monitoreo y predicción del estrés hídrico en *Opuntia ficus-indica*

Isabel Alejandra Félix-Rocha*; Alejandro Isabel Luna-Maldonado[1]; Efraín Alcorta-García[2]; Julia Mariana Márquez-Reyes[1]; Héctor Flores-Breceda[1]; Jesús Rodolfo Valenzuela-García[3].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2]Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, A.P. 076 Suc. F., Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66450 México.
[3]Departamento de maquinaria agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315. Saltillo, Coahuila, México.
*Email: Isabel.felixro@uanl.edu.mx

Resumen. La agricultura enfrenta importantes desafíos derivados del cambio climático y la creciente escasez de agua, los cuales comprometen la productividad de los cultivos y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Ante este panorama, resulta necesario desarrollar estrategias innovadoras que favorezcan el uso eficiente de los recursos y permitan anticipar las condiciones de estrés en los cultivos. La integración de la agricultura de precisión con los gemelos digitales representa una alternativa prometedora, ya que permite combinar información de diferentes fuentes para monitorear, simular y predecir el comportamiento de los sistemas agrícolas, facilitando la toma de decisiones oportunas. En este contexto, el nopal (*Opuntia ficus-indica*) destaca por su capacidad de adaptación a condiciones ambientales adversas y su importancia alimentaria y nutricional, lo que lo convierte en un cultivo de interés ante los escenarios de cambio climático. El presente protocolo de investigación propone desarrollar y validar un Gemelo Digital Inteligente del nopal, mediante la integración de información obtenida a partir de imágenes RGB e hiperespectrales, sensores ambientales y variables fisiológicas y morfológicas. Mediante técnicas de inteligencia artificial, se busca estimar el estado de estrés hídrico del cultivo y predecir su evolución temporal, con el propósito de generar una herramienta de monitoreo y apoyo a la toma de decisiones para optimizar el manejo del agua.
Palabras clave. Gemelo digital, *Opuntia ficus-indica*, estrés hídrico, agricultura de precisión, inteligencia artificial.

Abstract. Agriculture faces significant challenges arising from climate change and increasing water scarcity, which threaten crop productivity and the sustainability of agricultural systems. In this context, developing innovative strategies to promote efficient resource use and anticipate crop stress conditions has become essential. The integration of precision agriculture and digital twins represents a promising approach, as it enables the combination of information from multiple sources to monitor, simulate, and predict crop behavior, thereby supporting timely decision-making. Within this framework, prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) stands out for its ability to adapt to adverse environmental conditions and its nutritional and food value, making it a crop of particular interest under climate change scenarios. This research protocol proposes the development and validation of an Intelligent Digital Twin of prickly pear cactus through the integration of information

obtained from RGB and hyperspectral imagery, environmental sensors, and physiological and morphological variables. By employing artificial intelligence techniques, the study aims to estimate crop water stress status and predict its temporal evolution, with the ultimate goal of developing a monitoring and decision-support tool to optimize water management.
Keywords: Digital twin, Opuntia ficus-indica, water stress, precision agriculture, artificial intelligence

Introducción

La producción agrícola enfrenta condiciones ambientales cada vez más variables asociadas con el cambio climático, la disponibilidad limitada de agua, la salinidad y las temperaturas extremas. Estos factores pueden modificar el crecimiento, desarrollo, productividad y calidad de los cultivos, por lo que resulta necesario desarrollar estrategias de monitoreo capaces de detectar oportunamente alteraciones en el estado fisiológico de las plantas y anticipar sus posibles efectos. En este contexto, la agricultura de precisión y las tecnologías de monitoreo no destructivo representan alternativas para mejorar la gestión de los sistemas agrícolas mediante la adquisición, integración y análisis de información relacionada con las condiciones ambientales y la respuesta de los cultivos.

Entre las especies vegetales con potencial para enfrentar condiciones de disponibilidad limitada de agua destaca el nopal (*Opuntia ficus-indica*), debido a sus características fisiológicas y morfológicas que favorecen su adaptación a ambientes áridos y semiáridos. Su importancia alimentaria, nutricional y productiva ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a comprender su respuesta ante diferentes condiciones ambientales.

En particular, se ha demostrado que los distintos regímenes de disponibilidad de agua producen cambios medibles en variables relacionadas con el crecimiento y el estado de los cladodios (Valenzuela-García *et al*., 2025). Asimismo, las modificaciones fisiológicas y bioquímicas durante el desarrollo y almacenamiento de los cladodios pueden caracterizarse mediante variables morfológicas, colorimétricas y bioquímicas (Valenzuela-García *et al*., 2026).

La evaluación del estado fisiológico de las plantas mediante métodos convencionales puede requerir mediciones puntuales, procedimientos especializados y, en algunos casos, muestreos destructivos. Como alternativa, el fenotipado no destructivo permite obtener información de las plantas sin alterar significativamente su desarrollo, mediante técnicas de adquisición y procesamiento de imágenes. Estas tecnologías hacen posible cuantificar características visuales y espectrales que pueden relacionarse con diferentes atributos de los cultivos y utilizarse para desarrollar modelos de estimación y predicción (Fahlgren *et al*., 2015).

Entre estas tecnologías, las imágenes RGB permiten caracterizar características morfológicas, geométricas y colorimétricas de los tejidos vegetales, mientras que las imágenes hiperespectrales proporcionan información detallada de la respuesta espectral en diferentes longitudes de onda.

La integración de ambas fuentes de información puede ofrecer una caracterización más completa del estado de las plantas, al combinar atributos visuales con patrones espectrales asociados con cambios en sus tejidos. En *O. ficus-indica*, se han desarrollado modelos de aprendizaje automático utilizando información hiperespectral para predecir atributos nutricionales y morfológicos de cladodios comerciales, demostrando el potencial de estas tecnologías para realizar caracterizaciones no destructivas (Arredondo Valdez *et al*., 2026).

El uso de imágenes hiperespectrales también ha demostrado su utilidad en la detección de condiciones de estrés vegetal. Arredondo-Valdez *et al*. (2026) desarrollaron un método basado en imágenes hiperespectrales y una red neuronal convolucional tridimensional (3D-CNN) para detectar estrés salino latente en *Opuntia ficus-indica*, incluso antes de que las alteraciones fueran claramente identificables mediante observación visual. Este resultado demuestra que la información espectral puede contener patrones relacionados con cambios fisiológicos que no necesariamente son evidentes mediante una inspección convencional. De manera complementaria, se han desarrollado metodologías no destructivas para analizar la dinámica del estrés hídrico en esta especie mediante la integración de imágenes hiperespectrales e imágenes RGB obtenidas con vehículos aéreos no tripulados (UAV), ampliando las posibilidades de evaluar la respuesta de las plantas a través del tiempo (Arredondo-Valdez *et al*., 2026).

Paralelamente, la inteligencia artificial ha adquirido una importancia creciente en la agricultura de precisión debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de información e identificar relaciones complejas entre variables ambientales, características fenotípicas y respuestas fisiológicas. Los algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo permiten desarrollar modelos de clasificación, regresión y predicción a partir de información procedente de imágenes y sensores. En particular, la integración de inteligencia artificial, Internet de las Cosas (IoT) y sistemas de monitoreo permite generar herramientas orientadas a la detección de condiciones de estrés, el análisis de variables ambientales y la toma de decisiones basada en información actualizada (Rojas-Duarte *et al*., 2026).

En el caso de *O. ficus-indica*, los resultados obtenidos mediante modelos de aprendizaje automático e imágenes hiperespectrales demuestran que es posible relacionar información adquirida de manera no destructiva con atributos físicos y nutricionales de los cladodios (Arredondo Valdez *et al*., 2026). Asimismo, el empleo de arquitecturas de aprendizaje profundo para detectar estrés salino evidencia la posibilidad de extraer automáticamente patrones espaciales y espectrales relacionados con estados fisiológicos específicos (Arredondo-Valdez *et al*., 2026). Estos avances constituyen una base importante para desarrollar sistemas capaces de integrar diferentes fuentes de información y mejorar la caracterización del estado de los cultivos.

Sin embargo, la detección o estimación del estado de una planta en un momento determinado no necesariamente permite comprender cómo evolucionan sus condiciones fisiológicas a través del tiempo. Para anticipar el comportamiento de un cultivo es necesario considerar la información obtenida en diferentes momentos, identificar tendencias y establecer relaciones entre las condiciones ambientales y las respuestas de las plantas. La incorporación de observaciones temporales permite avanzar desde una evaluación puntual hacia el análisis de la trayectoria del estrés y el desarrollo de modelos capaces de estimar estados futuros. En este sentido, el estudio de la dinámica del estrés hídrico en *Opuntia ficus-indica* mediante imágenes RGB e hiperespectrales constituye un antecedente relevante para el desarrollo de modelos predictivos con una perspectiva temporal (Arredondo-Valdez *et al*., 2026).

Una alternativa para integrar estas capacidades es el concepto de Gemelo Digital, entendido como una representación digital de un sistema físico que se actualiza mediante el intercambio de información entre ambos. En agricultura, los Gemelos Digitales se han propuesto como herramientas capaces de integrar sensores, bases de datos, modelos computacionales e inteligencia artificial para representar sistemas agrícolas, analizar su comportamiento y apoyar la toma de decisiones (Purcell & Neubauer, 2023). Su principal potencial radica en establecer una conexión entre el sistema físico y su representación virtual, de manera que la incorporación de nuevos datos permita actualizar el modelo y evaluar diferentes escenarios.

Diversas investigaciones han identificado aplicaciones de los Gemelos Digitales en cultivos, invernaderos y sistemas de producción agrícola, destacando su capacidad para conectar información del entorno físico con modelos digitales y facilitar el análisis de sistemas complejos (Pylianidis *et al*., 2021). Asimismo, las revisiones especializadas señalan que su implementación requiere integrar tecnologías de adquisición de datos, comunicación, modelación matemática, inteligencia artificial y análisis predictivo (Tagarakis *et al*., 2024). No obstante, también persisten desafíos relacionados con la integración de fuentes heterogéneas de información, la interoperabilidad, la actualización de los modelos y la validación de la correspondencia entre el sistema físico y su representación digital (Wang, 2024).

En este contexto, el desarrollo de un Gemelo Digital aplicado a una planta individual de *Opuntia ficus-indica* representa una oportunidad para integrar información espectral, visual, ambiental, fisiológica y morfológica dentro de una arquitectura computacional dinámica. Las imágenes RGB e hiperespectrales pueden proporcionar información complementaria sobre las características de los cladodios, mientras que los sensores ambientales permiten registrar las condiciones en las que se desarrolla la planta. A su vez, las mediciones fisiológicas y morfológicas pueden utilizarse como variables de referencia para caracterizar su estado y evaluar la confiabilidad de los modelos

predictivos. La integración de estas fuentes permitiría construir una representación digital que se actualice conforme se incorporen nuevas observaciones.

A pesar de los avances en fenotipado no destructivo, detección de estrés mediante imágenes hiperespectrales, aprendizaje automático y modelación de la dinámica hídrica en *Opuntia ficus-indica*, todavía existe una oportunidad de investigación en la integración de estas tecnologías dentro de una representación digital dinámica a escala de planta individual. En particular, resulta necesario desarrollar y validar una arquitectura que no solamente permita identificar o estimar el estado de estrés en un momento determinado, sino que también incorpore información temporal para analizar su evolución y generar predicciones sobre el comportamiento futuro de la planta. Esta integración constituye el principal desafío científico y tecnológico que aborda la presente investigación.

Por lo anterior, este proyecto propone desarrollar y validar un *Gemelo Digital Inteligente de Opuntia ficus-indica* mediante la integración de imágenes RGB e hiperespectrales, sensores ambientales y variables fisiológicas y morfológicas. La información será procesada mediante técnicas de inteligencia artificial y modelación temporal para estimar el estado de estrés hídrico de la planta y predecir su evolución a través del tiempo. Con ello, se busca avanzar desde los métodos convencionales de monitoreo y evaluación puntual hacia una representación digital dinámica capaz de caracterizar el estado actual de la planta, analizar su trayectoria y generar estimaciones de su comportamiento futuro, contribuyendo al desarrollo de herramientas para mejorar el monitoreo y la gestión eficiente del agua en este cultivo.

Pregunta de investigación

¿En qué medida es posible desarrollar y validar un Gemelo Digital Inteligente de *nopal*, mediante la integración de imágenes RGB e hiperespectrales, variables ambientales y características fisiológicas y morfológicas, para estimar el estado de estrés hídrico y predecir su evolución temporal mediante técnicas de inteligencia artificial?

Justificación

La presente investigación surge de la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas que contribuyan al manejo eficiente del agua en la agricultura, particularmente ante los escenarios de creciente escasez hídrica y variabilidad climática que afectan a la región noreste de México. En este contexto, la agricultura de precisión representa una alternativa para mejorar el monitoreo de los cultivos y favorecer la toma de decisiones basada en información.

La importancia científica del proyecto radica en avanzar desde los modelos convencionales de detección y estimación del estrés vegetal hacia una representación digital multimodal, dinámica y predictiva del estado de una planta individual. La investigación permitirá estudiar las relaciones entre las condiciones ambientales y las respuestas espectrales, morfológicas y fisiológicas de *Opuntia ficus-indica*, generando conocimiento sobre

variables que pueden utilizarse para caracterizar y monitorear el estrés hídrico mediante métodos no destructivos.

Desde el punto de vista tecnológico, el proyecto permitirá desarrollar una arquitectura integral que articule la adquisición de datos, el procesamiento de imágenes RGB e hiperespectrales, la incorporación de sensores ambientales, la integración de información multimodal y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y modelación temporal. Estos componentes se integrarán en una representación digital de la planta que podrá actualizarse conforme se obtengan nuevas observaciones y generar estimaciones sobre la evolución de su estado hídrico.

La contribución a la Ingeniería Mecatrónica consiste en el diseño, desarrollo e integración de un sistema inteligente de percepción, adquisición de datos, procesamiento de información y modelación computacional aplicado a un sistema biológico complejo. El proyecto involucra áreas como instrumentación, sensores, sistemas embebidos, procesamiento digital de imágenes, inteligencia artificial e integración de sistemas.

Desde la perspectiva agrícola, la tecnología desarrollada podrá contribuir al monitoreo oportuno de las condiciones de estrés hídrico y proporcionar información anticipada para apoyar decisiones relacionadas con el manejo del agua. Aunque el proyecto no necesariamente contempla la automatización directa del riego, la información generada podrá constituir una base tecnológica para futuras aplicaciones de agricultura de precisión y control inteligente.

La selección de *Opuntia ficus-indica* permitirá aprovechar conocimientos y experiencia previa en su caracterización morfológica, adquisición de imágenes RGB e hiperespectrales, percepción remota mediante vehículos aéreos no tripulados, aprendizaje automático y evaluación de estrés hídrico. Esta continuidad científica y tecnológica permitirá establecer una base experimental para el desarrollo del sistema propuesto y reducir los riesgos asociados con su implementación.

Finalmente, la investigación busca contribuir al desarrollo de nuevas aplicaciones de los Gemelos Digitales en sistemas agrícolas, particularmente en cultivos adaptados a condiciones de disponibilidad limitada de agua, mediante una propuesta que integra percepción multimodal, inteligencia artificial y modelación temporal a escala de planta individual.

Objetivo general

Desarrollar y validar un Gemelo Digital Inteligente de *Opuntia ficus-indica* capaz de integrar información proveniente de imágenes RGB e hiperespectrales, sensores ambientales y variables fisiológicas y morfológicas para estimar el estado de estrés hídrico y predecir su evolución temporal mediante técnicas de inteligencia artificial.

Objetivos específicos

a) Caracterizar cambios espectrales, morfológicos y fisiológicos de las

variedades de *Opuntia ficus-indic**a*** bajo estrés hídrico.

b) Desarrollar y evaluar modelos de IA multimodales y temporales para estimar el estrés hídrico de Opuntia ficus-indica.

c) Diseñar y validar un Gemelo Digital de *Opuntia ficus-indica* para representar y predecir su evolución bajo estrés hídrico.

Marco teórico

1. Gemelos Digitales en la agricultura

El concepto de Gemelo Digital ha adquirido creciente relevancia en los últimos años debido a los avances en tecnologías de adquisición de datos, conectividad, modelación computacional e inteligencia artificial. Aunque su origen y desarrollo se encuentran asociados con otros sectores industriales, su aplicación en la agricultura ha despertado interés por las posibilidades que ofrece para representar, monitorear y analizar sistemas biológicos y productivos complejos. La literatura especializada identifica un crecimiento de las investigaciones sobre Gemelos Digitales agrícolas, particularmente a partir de 2020, impulsado por la incorporación de tecnologías de agricultura de precisión y sistemas inteligentes de monitoreo (Pylianidis *et al*., 2021; Purcell & Neubauer, 2023; Tagarakis *et al*., 2024).

En términos generales, un Gemelo Digital puede definirse como una representación digital de un sistema físico que mantiene una relación con este mediante el intercambio y la actualización de información. A diferencia de una representación digital estática o de un modelo de simulación convencional, un Gemelo Digital incorpora datos del sistema físico para actualizar su estado y permitir el análisis de su comportamiento bajo diferentes condiciones. En agricultura, esta capacidad permite representar cultivos, condiciones ambientales y procesos productivos, facilitando el monitoreo y la evaluación de diferentes escenarios (Wang, 2024).

La implementación de un Gemelo Digital agrícola puede organizarse en tres componentes funcionales. El primero corresponde a la adquisición de información del sistema físico mediante sensores, cámaras y otras tecnologías de percepción. El segundo comprende la integración, procesamiento y análisis de los datos mediante modelos matemáticos, simulaciones y algoritmos de inteligencia artificial. El tercero corresponde a la representación digital, el análisis predictivo y la generación de información para apoyar la toma de decisiones. Estos componentes establecen una relación entre el sistema físico y su representación computacional, permitiendo actualizar el modelo conforme se incorporan nuevas observaciones.

2. Adquisición e integración de información mediante sensores e imágenes

La adquisición de información constituye uno de los componentes fundamentales de un Gemelo Digital. En los sistemas agrícolas, esta actividad puede realizarse mediante redes de sensores conectados a través del Internet de las Cosas (IoT), cámaras digitales, sistemas de percepción remota y dispositivos de medición ambiental.

Entre las variables que pueden monitorearse se encuentran la temperatura y humedad ambiental, humedad y temperatura del sustrato, radiación, disponibilidad de agua y otras condiciones relacionadas con el desarrollo de los cultivos. La selección de estas variables depende del sistema biológico estudiado y de los procesos que se desean representar mediante el modelo digital.

Además de los sensores ambientales, las tecnologías de adquisición de imágenes permiten obtener información sobre las características físicas y fisiológicas de las plantas. Las cámaras RGB proporcionan información relacionada con el color, la geometría y la morfología de los tejidos vegetales, mientras que los sistemas hiperespectrales permiten registrar la respuesta espectral en múltiples longitudes de onda. La combinación de ambas tecnologías puede proporcionar información complementaria para caracterizar el estado de los cultivos y detectar cambios asociados con condiciones de estrés.

En Opuntia ficus-indica, las investigaciones recientes han demostrado la utilidad de las imágenes RGB e hiperespectrales para caracterizar atributos morfológicos, nutricionales y respuestas asociadas con condiciones de estrés hídrico y salino (Arredondo-Valdez *et al*., 2026). Estos antecedentes permiten considerar la integración de diferentes fuentes de percepción como una estrategia para mejorar la representación del estado de una planta individual.

3. Inteligencia artificial y modelación predictiva

La inteligencia artificial constituye una herramienta fundamental para analizar la información generada por los sistemas de adquisición de datos. En particular, los algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) permiten identificar relaciones entre variables ambientales, características espectrales y atributos fisiológicos o morfológicos de los cultivos.

Entre las metodologías utilizadas se encuentran los algoritmos de regresión, árboles de decisión, máquinas de soporte vectorial, bosques aleatorios y redes neuronales. Por otra parte, las técnicas de aprendizaje profundo (*Deep Learning*) permiten procesar información de mayor complejidad, incluyendo imágenes y datos multidimensionales, mediante arquitecturas como las redes neuronales convolucionales.

Cuando se integran diferentes fuentes de información, como imágenes RGB, información hiperespectral, variables ambientales y mediciones fisiológicas, se establece un problema de aprendizaje multimodal. Este enfoque permite aprovechar las características complementarias de cada fuente para generar estimaciones más completas del estado de la planta.

Adicionalmente, la incorporación de información obtenida en diferentes momentos permite desarrollar modelos temporales capaces de analizar la evolución de las variables estudiadas. A diferencia de los modelos que utilizan

únicamente observaciones individuales, los modelos temporales consideran la secuencia de mediciones para identificar tendencias y estimar estados futuros. Esta capacidad resulta especialmente importante para estudiar procesos dinámicos como el desarrollo vegetal y la evolución del estrés hídrico.

4. Representación digital y apoyo a la toma de decisiones

La representación digital constituye el componente mediante el cual se integra la información obtenida del sistema físico con los modelos computacionales. En un sistema agrícola, esta representación puede incorporar variables ambientales, características morfológicas, información espectral y estimaciones generadas mediante algoritmos de inteligencia artificial.

La actualización de esta representación mediante nuevas observaciones permite mantener una descripción del estado del sistema físico y analizar su comportamiento a través del tiempo. Cuando se incorporan modelos predictivos, el Gemelo Digital puede utilizarse para estimar posibles cambios en las condiciones del cultivo y generar información anticipada para apoyar la toma de decisiones.

En los sistemas agrícolas automatizados, esta información puede utilizarse para activar actuadores relacionados con el riego, la iluminación, la ventilación o el control de temperatura. Sin embargo, la incorporación de actuadores no constituye un requisito indispensable para el desarrollo de un Gemelo Digital. Su implementación también puede limitarse al monitoreo, la representación computacional, la simulación y la predicción, sin ejecutar acciones de control sobre el sistema físico.

Esta distinción es relevante para el presente proyecto, debido a que el alcance tecnológico se orienta principalmente al desarrollo de una representación digital inteligente de una planta individual de *Opuntia ficus-indica*, sin que necesariamente se contemple la automatización del sistema de riego.

5. Aplicación de los Gemelos Digitales a Opuntia ficus-indica

La aplicación de Gemelos Digitales en la agricultura ha avanzado mediante la integración de sensores, imágenes, modelos matemáticos y técnicas de inteligencia artificial. Sin embargo, la aplicación de estas arquitecturas a escala de planta individual presenta oportunidades de investigación relacionadas con la integración de información multimodal, la representación de procesos biológicos y la predicción de cambios fisiológicos.

En el caso de *Opuntia ficus-indica*, existen antecedentes de investigación relacionados con la caracterización morfológica y nutricional, la detección de estrés salino mediante imágenes hiperespectrales y el análisis de la dinámica del estrés hídrico mediante imágenes RGB e hiperespectrales. Estos desarrollos proporcionan una base científica y tecnológica para integrar diferentes fuentes de información en una arquitectura computacional orientada al monitoreo y la predicción del estado de la planta.

A partir de estos antecedentes, el desarrollo de un Gemelo Digital Inteligente de nopal representa una oportunidad para integrar información ambiental, espectral, morfológica y fisiológica dentro de una representación digital actualizable. La aplicación de técnicas de inteligencia artificial permitiría estimar el estado de estrés hídrico y analizar su evolución temporal, avanzando desde la detección puntual hacia una representación dinámica y predictiva de la planta.

La propuesta busca, por tanto, integrar tecnologías de instrumentación, adquisición de imágenes, procesamiento de información, inteligencia artificial y modelación computacional para desarrollar una herramienta de monitoreo y apoyo a la toma de decisiones en el manejo del agua.

Hipótesis general

La integración multimodal y temporal de información obtenida mediante imágenes RGB e hiperespectrales, sensores ambientales y variables fisiológicas y morfológicas, mediante técnicas de inteligencia artificial, permitirá desarrollar y validar un Gemelo Digital Inteligente de Opuntia ficus-indica capaz de representar el estado de la planta y estimar y predecir la evolución temporal de su estrés hídrico.

Hipótesis específicas

a) Las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica producirán cambios cuantificables en las características espectrales, morfológicas y fisiológicas de las variedades de Opuntia ficus-indica, lo que permitirá distinguir sus diferentes estados de estrés hídrico.

b) Los modelos de inteligencia artificial que integren información multimodal RGB, hiperespectral, ambiental, fisiológica y morfológica presentarán un mejor desempeño en la estimación del estado de estrés hídrico que los modelos desarrollados a partir de una sola fuente de información.

c) La incorporación de información temporal al Gemelo Digital permitirá mejorar la predicción de la evolución del estrés hídrico de Opuntia ficus-indica respecto a los modelos que utilicen únicamente información de una medición individual.

Materiales y Métodos

Conceptualización del Gemelo Digital

El Gemelo Digital se definirá como una representación computacional dinámica de una planta de *Opuntia ficus-indica*, vinculada con su sistema físico mediante la actualización periódica de información obtenida a partir de imágenes, sensores ambientales y mediciones fisiológicas y morfológicas. Esta representación permitirá estimar el estado actual de la planta y predecir la evolución temporal de su condición de estrés hídrico mediante modelos de inteligencia artificial.

El flujo del sistema se inicia en el Sistema físico (*Opuntia ficus-indica* y su entorno), desde donde la capa de Sensores e imágenes captura datos brutos térmicos, ambientales y visuales que son sometidos a un Procesamiento previo para su limpieza y extracción de características; posteriormente, la Fusión multimodal integra estas fuentes heterogéneas (0_t) en

una representación unificada que alimenta al Modelo de IA para inferir la condición actual de la planta, consolidando así el Estado digital S_t $(S_t = f(O_t, \hat{X}_t, C_t))$ en un vector de métricas que finalmente pasa por un Modelo temporal capaz de predecir el Estado futuro $S_{t+\Delta t}$ $(S_{t+\Delta t} = g(S_t, C_{t+\Delta t})$ y simular su evolución ante distintas condiciones ambientales.

Se considerarán como factores experimentales principales la disponibilidad hídrica y la variedad. Las condiciones deberán generar niveles diferenciables de estrés sin provocar mortalidad prematura.

Cultivo
Opuntia ficus-indica.

Condiciones e
Las macetas de ***Opuntia ficus-indica*** estarán bajo condiciones ambientales naturales (no controladas). Por lo anterior queda expuesto a variaciones de radiación solar, temperatura, viento y precipitación propias de la región.

Unidad Experimental
Maceta individual con nopal correspondiente.

Diseño experimental
Diseño
Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA)

Tratamientos
T1 Nopal variedad Atlixco
T2 Nopal variedad Copena

Repeticiones
10 repeticiones por variedad

Ejemplo:
2 tratamientos x 2 repeticiones = 20 plantas

La tesis tendrá cuatro grupos principales de información. RGB, Hiperespectral y Variables ambientales y Variables fisiológicas y morfológicas.

RGB
Se obtendrán imágenes RGB estandarizadas, a partir de las cuales se extraerán diversas variables de interés, como el área, la geometría, el tamaño, el color, la textura, la arquitectura, la cobertura y las características morfológicas.

Hiperespectral
Se adquirirán imágenes hiperespectrales durante el desarrollo del experimento, cuyo procesamiento incluirá la calibración, la corrección radiométrica, la eliminación de ruido, la segmentación, la extracción de firmas espectrales, la selección de bandas relevantes, el cálculo de índices espectrales y, cuando sea necesario, la reducción de dimensionalidad.

Variables ambientales
Se registrarán, según la disponibilidad, variables ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la humedad y temperatura del sustrato, la conductividad eléctrica, la disponibilidad de agua y la radiación, las cuales tendrán especial importancia en el desarrollo del componente predictivo.

Variables fisiológicas y morfológicas
Se utilizarán como variables de referencia el contenido relativo de agua, la temperatura foliar, el contenido de clorofila, la conductancia estomática cuando sea posible, así como variables de crecimiento

y desarrollo como el área, la altura, el diámetro y la biomasa, además de las características del fruto cuando corresponda.

Plan de trabajo y calendarización

Cuadro 1. Cronograma de actividades dividido en periodos de 6 meses.

	2026-2027		2027-2028	
	Ago.-Dic.	**Ene.-Jun.**	**Ago.-Dic.**	**Ene.-Jun.**
Revisión bibliográfica y ajuste del diseño experimental	1-3 Mes			
Adquisición de imágenes RGB/HSI	3-4 Mes	6-10 Mes		
Registro mediante sensores ambientales	3-4 Mes	6-10 Mes		
Mediciones fisiológicas	3-4 Mes	6-10 Mes		
Construcción y organización de la base de datos	3-4 Mes			
Preprocesamiento y análisis de imágenes	4-5 Mes	6 Mes		
Desarrollo y entrenamiento de modelos de IA	4-5 Mes	6 Mes		
Fusión de información multimodal	5 Mes	6 Mes		
Desarrollo del modelo temporal	5 Mes	6 Mes		
Diseño de arquitectura del Gemelo Digital	5 Mes			
Integración de modelos, sensores y variables fisiológicas	5 Mes	6 Mes		
Validación del Gemelo Digital	5 Mes	6 Mes		
Análisis estadístico e integración de resultados		6 Mes		
Elaboración del informe técnico final			13-17 Mes	
Detalles finales y correcciones			13-17 Mes	18-19 Mes

Desglose financiero

A continuación, se muestra el cuadro con un desglose del material requerido y sus costos.

Cuadro 2. Desglose financiero de materiales del proyecto.

Materiales	**Monto para utilizar**	**Fuente del recurso**
Estación Meteorológica	$2,400	(PAIyDCH) 82-INTER-2026)
Componentes electrónicos	$41,500	(PAIyDCH) 82-INTER-2026)

Cámara de seguridad	$4,500	(PAIyDCH) 82-INTER-2026)
Macetas	$2,000	(PAIyDCH) 82-INTER-2026)
Garita	$5,700	(PAIyDCH) 82-INTER-2026)
Material vegetal	$2,000	(PAIyDCH) 82-INTER-2026)
TOTAL	**$58, 100**	

Agradecimientos

Al Programa de Apoyo a la Investigación y Divulgación Científica y Humanística (PAIyDCH) 82-INTER-2026) de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el financiamiento otorgado para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, el primer autor agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECHITI) por la beca otorgada para sus estudios de maestría.

Referencias Bibliográficas

Arredondo-Valdez, J., Rodríguez-Garza, H. A., Flores-Breceda, H., Rangel-Nava, Z. E., Aranda-Ledesma, N. E., Valenzuela-García, J. R., Hinojosa-Rivera, M., Kumar, A., Luna-Maldonado, U., & Luna-Maldonado, A. I. (2026). Latent salinity stress detection in Opuntia ficus-indica using hyperspectral imaging and a 3D-CNN framework. *Sensors*, 26(12), 3641. https://doi.org/10.3390/s26123641

Arredondo Valdez, J., García López, J. I., Flores Breceda, H., Kumar, A., Valdez Cepeda, R. D., & Luna Maldonado, A. I. (2026). Predicting nutritional and morphological attributes of fresh commercial Opuntia cladodes using machine learning and imaging. *Journal of Imaging,* 12(2), 67. https://doi.org/10.3390/jimaging12020067

Arredondo-Valdez, J., Zúñiga-Hernández, B. S., Luna-Maldonado, U., Flores-Breceda, H., Sinagawa-García, S. R., Valenzuela-García, J. R., Kumar, A., Valdez-Cepeda, R. D., & Luna-Maldonado, A. I. (2026). A non-destructive methodological approach for modeling continuous drought stress dynamics in Opuntia ficus-indica using hyperspectral and UAV RGB imagery. *AgriEngineering*, 8(6), 211. https://doi.org/10.3390/agrienginee ring8060211

Fahlgren, N., Gehan, M. A., & Baxter, I. (2015). Lights, camera, action: High-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Current Opinion in Plant Biology,* 24, 93–99. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.02.006

Purcell, W., & Neubauer, T. (2023). Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100094. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094

Pylianidis, C., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2021). Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 105942.

https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942

Rojas-Duarte, A., Rodríguez-Fuentes, H., Luna-Maldonado, A. I., Parra-Saldívar, R., Iqbal, H. N. M., Niño-Medina, G., Márquez-Reyes, J. M., & Gutiérrez-Soto, G. (2026). The integration of artificial intelligence in plant factories: Transforming the future of sustainable agriculture, a semi-systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 250, 111933. https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111933

Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. D. (2024). Digital twins in agriculture and forestry: A review. *Sensors*, 24(10), 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117

Valenzuela-García, J. R., Luna-Maldonado, A. I., Méndez-Dorado, M. A., Cadena-Zapata, M., Arredondo-Valdez, J., López-López, J. A., Valenzuela-Carrizales, M. G., de la Peña-Casas, B. E., & Gonzalez-Ramirez, H. E. (2025). Effects of water stress on Opuntia ficus-indica under three different irrigation regimes. *Journal of Applied Horticulture*, 27(3), 508–512. https://doi.org/10.37855/jah.2025.v27i03.92

Valenzuela-García, J. R., Luna-Maldonado, A. I., Méndez-Dorado, M. A., Cadena-Zapata, M., Arredondo-Valdez, J., Valenzuela Carrizales, M. G., López López, J. A., de la Peña-Casas, B. E., López-López, G. F., Buendía-García, A., & Gómez-Leyva, J. F. (2026). Phenotyping the physiological and biochemical changes of nopal cladodes during early postharvest storage. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1648343. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1648343

Wang, L. (2024). Digital twins in agriculture: A review of recent progress and open issues. *Electronics*, 13(11), 2209. https://doi.org/10.3390/electronics13112209

Obtención de microalgas de sistemas de tratamiento de aguas para la biorremediación de efluentes y la aplicación de la biomasa y el agua tratada en un sistema hidropónico.

Noé Arath Cardiel-Damas[1*]; Celestino Garza-Gómez[1]; Rocío Alejandra Chávez-Santoscoy[2]; Héctor Flores-Breceda[1]; Daniel Misael Garza-García[3]; Jesús Alberto Lara-Reyes[1].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 19221778.
[2]Escuela de Ingeniería y ciencias, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Col. Tecnológico, Monterrey, Nuevo León, México., C.P. 64849.
[3]Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. Av. Manuel L. Barragán s/n, Niños Héroes, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., CP 66555.
*Email: noe.cardieldms@uanl.edu.mx

Resumen. Cada año se gastan 450 mil millones de m³ de agua en labores domésticos e industriales, pero solo 188.1 mil millones de m³ son tratados. Los efluentes de la industria automotriz en el pintado contienen una gran cantidad de contaminantes que no se pueden remediar en las plantas tratadoras y aunque se ha optado por usar diversos pretratamientos no hay uno que asegure una buena eficacia. Así mismo, aunque se usen equipos especializados como la osmosis inversa (RO) para tratar los efluentes y conseguir agua tratada de calidad, los elementos contaminantes se acumulan en el agua de rechazo de osmosis (ROI), para esta agua no existe una forma estandarizada para tratarla, pero verterla causaría daños en los ecosistemas. En diversos estudios las microalgas han demostrado la capacidad de biorremediar los efluentes industriales y ROI siendo capaces de eliminar metales pesados y nutrientes dañinos de las aguas tratadas. Por otro lado, las microalgas han demostrado que en sistemas hidropónicos pueden mejorar la eficacia de crecimiento de las plantas. Por lo que se plantea usar diversas cepas de microalgas para la biorremediación de efluentes industriales y ROI aprovechando los productos: el agua tratada y biomasa en sistemas hidropónicos promoviendo una economía circular.
Palabras clave. Algas, fitorremediación, aguas residuales, agua de reflejo de osmosis.

Abstract. Each year, 450 billion m³ of water are used in domestic and industrial activities, but only 188.1 billion m³ are treated. Effluents from the automotive industry's painting processes contain a large amount of contaminants that cannot be remediated in treatment plants, and although various pretreatments have been adopted, none ensures good efficiency. Likewise, even when specialized equipment such as reverse osmosis (RO) is used to treat effluents and obtain high-quality treated water, the contaminants accumulate in the reverse osmosis reject water (ROI). For this water, there is no standardized way to treat it, but discharging it would cause damage to ecosystems. In various studies, microalgae have demonstrated the ability to bioremediate industrial effluents and ROI, being capable of removing heavy metals and harmful nutrients from treated water. On the other hand, microalgae have been shown to improve plant growth efficiency in hydroponic systems. Therefore, the use of various microalgae strains is proposed for the bioremediation of

industrial effluents and ROI, taking advantage of the products—treated water and biomass—in hydroponic systems, thereby promoting a circular economy.
Keywords: algae, phytoremediation, wastewater, reflect osmosis water.

Introducción

Cada año se gastan aproximadamente 450 mil millones de m³ de agua en labores domésticos e industriales, representando el gasto doméstico el 70% (Geremia *et al.*, 2021). La Organización de las Naciones Unidas en su reporte del departamento de agua del 2023 (WWAP, 2023), prevé que para el año 2050 el rápido crecimiento de la población e industrial junto con el calentamiento global generen escasez de agua en la mitad de la población mundial. Existen varias alternativas para frenar el desgaste del agua como lo pueden ser el reusó de las aguas residuales mediante plantas tratadoras, se estima que al año se generan 359 mil millones de m³ de los cuales solo 188.1 mil millones de m³ son tratados (Jones *et al.,* 2021). Sin embargo, el mal manejo de desechos a llenado las aguas residuales de contaminantes dañinos para los ecosistemas y para la salud humana como lo pueden ser metales, pesticidas, productos farmacéuticos, hormonas, entre muchas otras que dificultan un eficaz tratamiento (Minhas *et al*., 2026; El-Sheekh *et al.,* 2025).

La industria automotriz se caracteriza por contar con efluentes difíciles de tratar, en específico las áreas pintado son las principales generadoras de aguas residuales, estas aguas suelen presentar características como: una alta demanda de oxígeno (DQO), alto niveles de solidos suspendidos y disueltos, hidrocarburos aromaticos, contaminación microbiana y la presencia de metales pesados como el zinc, níquel, plomo, cobre, cromo y cadmio. Esta gran carga ha hecho que las plantas tratadoras sean incapaces de eliminar la mayoría de los contaminantes, lo que conlleva a que su descarga sea perjudicial para el medio ambiente. Para disminuir esta situación se ha optado por realizar pretratamientos (Güven *et al.,* 2017; Viktoryová *et al*., 2022). En este ámbito se han desarrollado varios procesos para eliminar diversos contaminantes del efluente industrial como lo son: los métodos electroquímicos, el uso de polímeros para tratar metales, compostajes, lodos activados, producción de biopelículas, entre otros. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de estrategias todos han demostrado resultados ineficientes para un tratamiento eficaz del efluente (Güven *et al.,* 2017; Nair *et al.,* 2021).

Dentro de las plantas tratadoras de las industrias pueden existir equipos que permitan obtener un agua tratada de alta calidad, entre estos equipos se encuentra la osmosis reversa (RO). En este proceso se ejerce una gran presión hidráulica sobre una membrana lo que permite separar los contaminantes y obtener agua tratada, de esto proceso se genera un concentrado de hasta 4 o 7 veces de desechos, este concentrado es conocido como agua de rechazo de osmosis (ROI), este desecho contiene una alta carga de sales, contaminantes microbianos, disolventes y lixiviados, por lo que esta agua no puede ser desechada en el medio ambiente ni en el

alcantarillado. (Kholomyeva *et al*., 2020; Molitor *et al*., 2021; Hao *et al.,* 2026). Para el tratamiento de ROI se han utilizado diferentes estrategias que van desde estanques de evaporación, uso de pozos profundos y la descarga superficial hasta procesos que utilizan membranas, calor y uso de agentes biológicos (Hao *et al.,* 2026). Así mismo se han optado por realizar pretratamientos con los mismos métodos mencionados para evitar la deficiencia de RO por obstrucciones en sus poros por los mencionados contaminantes (Molitor *et al*., 2021).

Las microalgas surgen como una alternativa innovadora para tratar efluentes industriales del pintado automotriz y ROI. Se ha demostrado que las microalgas tienen una gran capacidad para tratar aguas residuales en diferentes ámbitos industriales, como en la industria porcina, lechera, farmacéutica, aceites, productoras de pintura, entre otras. (Kholomyeva *et al*., 2020). Así mismo en ROI, Hao *et al.,* 2026; Molitor *et al*., 2021). Dicha capacidad de las microalgas se ha estudiado en diferentes entornos con diferentes concentraciones de salinidad, pH, fármacos, entre otras cosas. Por lo que se ha podido denotar que la variedad de microalgas pose la capacidad de: fijar el dióxido de carbono, eliminar nutrientes como el: Fosfato, Nitrógeno, Amonio, Carbono, Calcio, Sílice, entre otros, y eliminar metales pesados como: el Cobre (65%), Zinc (80%), Hierro (100%), Aluminio (93%) y Magnesio (100%) (Kholomyeva *et al*., 2020; Hao *et al.,* 2026; Molitor *et al*., 2021). Por otro lado, también se ha encontrado que la biomasa resultante del tratamiento pose una alta concentración de lípidos, carbohidratos, proteínas y demás activos que puede ser revalorizada, sumando a esto el uso de un medio barato, que en este caso son las aguas residuales, favorece un sistema económico de producción e interés industrial para usar sistemas basados en microalgas (Mousavi *et al*., 2018; Hao *et al.,* 2026). Una de las formas para revalorizar la biomasa podría basarse en su uso en sistemas hidropónicos. Estos sistemas permiten una mayor eficacia y calidad en comparación con la agricultura tradicional (Huo *et al.,* 2020). Por el otro lado ya se ha demostrado que el uso de microalgas permite un mayor crecimiento de las plantas, absorción de nutrientes, estabilización del pH, una mejor calidad del agua entre otras cosas (Pathom-aree *et al*., 2024).

En base a la revisión, se propone identificar y utilizar las microalgas autóctonas de los efluentes industriales del pintado de tráileres y ROI para biorremediar los mencionados efluentes y valorizar el uso de la biomasa en sistemas hidropónicos.

Materiales y Métodos

Aislamiento.

Se tomó de un recipiente de un litro agua de rechazo de osmosis y dos tubos falcón de 50ml con agua residuales de los tanques de tratamientos de la empresa Internacional ubicada en Escobedo, N.L, a su vez también se colocaron 10ml en placas con agar BMM y BG-11. Tanto para el recipiente de litro como para los tubos falcón se tomaron 10ml para ser vertidos en matraces distintos que contenían 200ml de medio BMM y BG-11, para proporcionar condiciones óptimas de crecimiento, introdujeron mangueras conectadas a un

sistema de aireación con filtros de 0.4 micras a cada matraz individual y se colocaron en sistemas de luces led por periodos de 14/10 horas, a las placas inoculadas se les coloco en el mismo sistema de luz. Dando como resultado 7 matraces etiquetados por su precedencia y medio utilizado.

Después de dos semanas se observó bajo el microscopio la aparición de diversas microalgas, pero con la presencia cianobacterias y protozoarios parásitos, por lo que le agrego 0.32mg de amoxicilina (Días *et al*, 2015), luego a los 4 días se proporcionó 16mg de urea (Méndez *et al,* 2017) y 3.60g de bicarbonato de sodio (Peng *et al,* 2016), lo que disminuyo en gran manera los microrganismos mencionados.
Para conseguir cultivos monologales, se procedió a tomar 1 ml de los matraces y se colocaron en placas agar BMM, en estas placas se realizaron secciones de estrías paralelas y se colocaron bajo el mismo sistema led, posterior se seleccionaron colonias monologales bajo observación al microscopio y se repitió el paso de sembrar en placa para asegurar la anexidad (ANACC, 2020). Por último, se realizaron cortes en las placas monologales y se colocaron en 200ml de medio BMM con el sistema de aireación y luz led.

Una vez aisladas las cepas se tomó de los matraces inoculados 1ml para observar bajo el microscopio al 100x las características morfológicas de las distintas cepas aisladas, las cuales fueron identificadas por medio de las guías de Reyes *et al* (2023) y Serediak *et al* (2011).

Dando como resultado el aislamiento de las cepas:

- *Chlorococcum sp.*
- *Scenedesmus sp*
- *Chlorella sp*

Identificación molecular.

Para este medio se utilizará un kit de extracción molecular, se realizará un PCR con los primers de 18S rDNA y rbcl que permitirán después de secuenciarlo y comparar con la base de datos de GenBank, realizando una alineación y similitud junto con un árbol filogenético.

Biorremediación de efluentes.

Para el experimento se plantea usar solo 3 cepas aisladas por separado y mixto, en el Cuadro 1 se muestran los tratamientos a realizar, por cada tratamiento se inocularán $1x10^7$ de células de microalgas contadas en cámara Neubauer en 500ml de aguas sin esterilizar de TAR y ROI, midiendo diversos parámetros durante 15 días consecutivos. Como control negativo se usaría agua TAR y ROI sin inocular. Los tratamientos se pondrán a un periodo de 14/10 luz oscuridad bajo un sistema de luces led, a aireación constante a una temperatura de 25 grados. Los parámetros de medición para el inicio (Ruiz & García, 2020) y el final del experimento son los siguientes:

Cuadro 1. Tratamiento en efluentes industrial y ROI.

Numero	Tratamientos
1	Cepa 1.
2	Cepa 2.
3	Cepa 3.
4	Cepa 1,2 y 3.
Control	Agua ROI y TAR sin inoculo.

Las cepas corresponden a microalgas aisladas, se realizarán 3 réplicas por cada tratamiento.

Pruebas bioquímicas.

Proteínas.

Se realizará el método Warburg-Christian que permite medir de manera indirecta el contenido de proteína en la biomasa generada durante el experimento, en base a la lisis celular y la medición en espectrofotometría UV en los rangos 280nm y 260nm con la siguiente formula, proteína mg/ml:

$$mg = \frac{[(5 * \mathrm{A280}) - \mathrm{A260}] * \mathrm{Factor\ dilucion}}{4.635}$$

Fosfato.

Para determinar el fosfato en forma de ortofosfatos se realizará mediante método del ácido ascórbico en el cual se mide la espectrofotometría a 880nm y se realiza una curva por los días medidos.

Lípidos.

Por medio del método Bligh & Dyer se medirán los lípidos totales, a partir del uso de bases y estufas con crisoles se miden los pesos que generan en varios procesos y se usar la formula siguiente para cuantificar.

$$(CL)\% = \frac{WL}{WA} * 100$$

$CL =$ Contenido lipídico
$WL =$ Peso final del crisol con muestra
$WA =$ Peso inicial de 0.1 gramos en crisol

Nitratos totales.

Por medio del método Berthelot se determinarán nitratos en forma de amonio, para la cual se prepara una muestra de biomasa según el protocolo establecido usando la espectrometría UV a 635nm como parámetro de medición.

Clorofila.

Por medio del método Lichtenthaler y Wellburn se medirá clorofilas totales de la biomasa, por medio de agregar acetona, centrifugar y usar el vortex se puede medir la clorofila a y b junto con los carotenoides en la espectrofotometría UV a los rangos de 662, 645 y 470nm cuantificándose con las siguientes formulas.

Clorofila a (C_a):

$$C_a = 11.75 * A_{662} - 2.35 * A_{645}$$

Clorofila b (C_b):

$$C_b = 18.61 * A_{645} - 3.96 * A_{662}$$

Carotenoides totales (C_{x+c}):

$$C_{x+c} = \frac{1000 * A_{470} - 2.27 * C_a - 81.4 * C_b}{227}$$

Coliformes totales y fecales.

Bajo la norma NMX-AA-102-2006 que permite cuantificar coliformes se evaluara la remedición microbiana. Esta metodología se realizará al inicio, a la mitad del experimento y al final, se realizará siguiendo la metodología proporcionada por la norma mexicana para cuantificar las colonias formadoras de colonia (UFC) en placas de agar, tomando en cuenta el color según especifica la norma y usando la formula siguiente para cuantificar.

$$\frac{UFC}{100ml} = \frac{UFC\ enumeradas}{Volumen\ de\ la\ muestra}$$

Concentración de biomasa.

Se recolectará la biomasa midiendo por espectrofotometría a un rango de 680nm, luego se dejará secar por 48 horas para

pesarla y realizar una relación con la siguiente formula.

$$X = 1.7386 * \text{OD680 nm} + 0.0342\ (R^2 = 0.99)$$

Tasa de crecimiento y producción.

$$\mu = ln(W_f / W_0) / (t_f - t_0)$$

$$PB = (W_f - W_0) / (t_f - t_0)$$

W_f y W_0 es la concentración final y inicial de biomasa (X), t_f y t_0 es tiempo inicial y final.

Pruebas fisicoquímicas.

Conductividad eléctrica.

Se tomará una pequeña muestra de agua y se medirá con un conductímetro.

Metales.

Nos basaríamos en los métodos Standard Methods 3111B y 3111D para el procesamiento de las muestras por medio la espectrofotometría de absorbancia atómica para la detección de cromo, aluminio, plata, sodio, cloro y magnesio tanto para el medio y la biomasa.

Relación de Absorción de Sodio (SAR).

En base a las directrices de los Estados Unidos, esta fórmula permite determinar la solidificación del suelo mediante la fórmula:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Las concentraciones se expresan en mmol_c/L.

pH.

Se medirá el pH con un potenciómetro antes y durante el experimento del agua residual.

Alcalinidad.

Mediante la metodología descrita en la norma NMX-AA-036-SCFI-2001 se realizará una titulación con Ácido sulfúrico se medirá la alcalinidad del agua con la siguiente formula en mg/L.

$$CacO_3 = A * N(50)\frac{(1000)}{100}$$

$A =$ Es el volumen total de ácido gastando en la titulación al vire del anaranjado de metilo (ml)

$N =$ Es la normalidad de la solución de ácido sulfúrico.

$100 =$ Es el volumen de la muestra en ml

$50 =$ Es el factor para convertir eq/L a mg CacO3/L.

Dureza total.

En base a la norma NMX-AA-072-SCFI-2001 implementares esta debido a que cuantifica sales por medio del uso de una titulación de EDTA.

$$CaCO_3 = (A - B) * C * \frac{1000}{D}$$

$A =$ Son los mL de EDTA gastados en la titulación en la muestra.

$B =$ Son mL de EDTA gastados en la titulación en el blanco (si fue utilizado).

$C =$ Son los mg de CaCO3 equivalentes a 1 mL de EDTA.

$D =$ Son los mL de muestra.

Solidos suspendidos totales, volátiles y fijos.

Basados en la norma NMX-AA-072-SCFI-2001 se realizará la desecación con crisoles y estufas se puede determinar los sólidos volátiles en biomasa y el agua tratada.

$$ST = (P_2 - P_1) * \frac{1000}{ml}$$

$$STv = (P_2 - P_3) * \frac{1000}{ml}$$

$$STf = (ST - Stv)$$

$P_1 =$ Peso inicial del crisol sin nada
$P_2 =$Peso luego del calentamiento
$P_3 =$Luego de volver a pesar
$1000 =$conversión para hacer Litros
$ml =$ ml utilizados

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

$$SST = ST - SD$$

Volátiles ($SSTv$)

$$SSTv = STv - SDv$$

Fijos ($SSTf$)

$$SSTf = STf - SDf$$

Demanda química de oxígeno.
En base a método Estándar Methods 5220 D, se realizará por medio del uso de ácidos y bases se puede medir en el espectrofotómetro UV en 600nm para medir la demanda química, haciendo una curva de calibración con un estándar de bifalato de potasio.

Eficiencia de remoción.
Para evaluar la eficiencia de remoción de cada parámetro medido se utilizará la siguiente formula en las unidades utilizadas:

$$Eficiencia(\%) = \frac{C_{entrada} - C_{salida}}{C_{entrada}}\ x\ 100$$

$C_{entrada}$: Es la concentración inicial del contaminante.

C_{salida}: Es la concentración final del contaminante.

Separación de Biomasa/Agua tratada.
Se separa por medio de una bomba de vacío usando un matraz kitasato y un filtro de una 1 micra, lo que permitirá separar la biomasa y el agua tratada los cuales serán almacenados en matraces y almacenados bajo 4 grados.

Sistema Hidropónico.
Se usará solo el tratamiento con mejores cualidades en la biorremediación de efluentes y de ROI usando tanto la biomasa como el agua tratada.

El experimento será diseñado de la siguiente forma, en un sistema hidropónico se evaluarán 4 tratamientos en el crecimiento de la planta *Apium graveolens Linn* (Apio) por su resistencia a la salinidad, estos tratamientos consistirán en el uso de la biomasa fresca (5%), el agua tratada y un control que será un medio estándar para sistemas hidropónicos como lo puede ser el NPK (12:4:6) 0.4% o Hoagland y serán aplicados de la siguiente manera:

Cuadro 2. Tratamiento en sistema Hidropónico.

Numero	Tratamientos
1	Biomasa con sustrato hidropónico
2	Biomasa con agua tratada
3	Agua tratada
4	Agua tratada con sustrato hidropónico
Control	Sustrato hidropónico

La biomasa y agua tratada se obtendrán del experimento previo "biorremediación de efluentes". Se realizarán 3 réplicas.

Caracterización vegetal.

Longitud de brote.

Se mide del soporte hasta la parte superior donde la hoja está abierta registrando el promedio, se mide al inicio y al final.

Longitud de raíz.

Se mide del soporte hasta la raíz más larga registrando el promedio, se mide a los 19 días del experimento.

Peso fresco g.

Las plantas se miden con balanza analítica, registrando el promedio, se mide a los 21 días.

Peso seco g.

Se secan a un horno a 60 grados y se pesa, se pesa a los 21 días.

Análisis estadístico.

Los datos serán analizados en el programa en Minitab mediante un diseño factorial de dos factores (efluente y cepas), será evaluado mediante la realización de un ANOVA, cuando se presente una diferencia se realizará una prueba Tukey para determinar el valor de medias, todos los análisis serán evaluados a un nivel de confianza a 95% ($p \leq 0,05$).

Plan de trabajo y calendarización

Durante todos los semestres se plantea ir trabajando con la revisión del escrito extenso de Tesis así como el avance de la escritura de los artículos, para el área experimental se plantea iniciar en los meses que acontecen Agosto a Diciembre 2026 el aislamiento, identificación morfológica y avances en la identificación molecular, el siguiente periodo Enero-Julio 2027 se plantea realizar el apartado de biorremediación de los efluentes, posterior en Agosto-Diciembre 2027 realizar el experimento del sistema hidropónico, por ultimo Enero-Junio 2028 abocarse en la escritura y revisión final de la tesis de maestría.

Cuadro 3. Cronogramas de actividades.

	2026-2027		2027-2028	
	Ago.-Dic.	Ene.-Jul.	Ago.-Dic.	Ene.-Jun.
Aislamiento de microalgas	X			
Identificación morfológica y molecular	X			
Biorremediación de efluentes		X		
Sistema Hidropónico			X	
Revisión avances de articulo	X	X	X	X
Revisión Tesis	X	X	X	X
Entrega Final de Tesis				X

Se llevará a cabo durante lo pautado en el programa de Maestría 2026-2028.

Desglose financiero

Los equipos, servicio y maquinaria se encuentran en el laboratorio de Remediación Ambiental por lo que no representa un gasto económico para la elaboración de esta Tesis.

Etapa 1: Compra de insumos para el aislamiento de microalgas: placas Petri, reactivos para la preparación de medio Bolt y medio BG-11 se estima un producto comercial de 850 pesos por medio, de las placas Petri se estima 500 pesos.

Etapa 2: Compra de kits de extracción molecular, primers y secuenciación, se estima un total de 10,100 pesos siendo conservadores.

Etapa 3: Compra de reactivos para realizar las pruebas para medir los parámetros en la biorremediación, existen varios que se ocupan como el anaranjado de metilo, Indicador negro de Eriocromo T, Biftalato de potasio, nitroprusiato y tartrato de antimonio, se estima en un total de 2450 pesos.

Etapa 4: Para la evaluación del sistema hidropónico habrá que comprar insumos como las semillas, si se compra las soluciones estándar para las plantas tanto NKP o Hoagland conforman un total 1100 pesos.

Etapa 5: Pagar eventos o publicaciones del trabajo realizado, un estimado de 6000 pesos.

Cuadro 4. Desglose financiero.

	Monto para utilizar	Fuente del recurso
Reactivos o insumo	$15,000	Recursos propios.
Equipo	$0	
Servicio	$0	
Maquinaria	$0	
Viáticos en general (combustible, peajes, etc.)	$1,500	
Eventos académicos	$6,000	
Total	**$22,500 MXN**	

Los gastos están en MXN (pesos mexicanos), se promedió varios insumos en diferentes paginas para obtener el promedio de gasto a utilizar.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Celestino Garza Gómez, a mis asesores y al SECIHTI por el apoyo.

Referencias Bibliográficas

ANACC Methods and Materials. (2020). Streak plating. CSIRO. https://research.csiro.au/anaccmethods/culture-handling/microalgal-isolation-techniques/streak-plating-2/

E.R. Jones, M.T.H. van Vliet, M. Qadir, M.F.P. Bierkens, (2021) Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse, Earth Syst. Sci. Data 13 237–254, https://doi.org/10.5194/essd-13-237- 2021.

El-Sheekh MM, El-Kassas HY, Ali SS (2025). Microalgae-based bioremediation of refractory pollutants: an approach towards environmental sustainability. Microb Cell Fact. Jan 14;24(1):19. doi: 10.1186/s12934-024-02638-0. PMID: 39810167; PMCID: PMC11734528.

Geremia, E., Ripa, M., Catone, C. M., & Ulgiati, S. (2021). A Review about Microalgae Wastewater Treatment for Bioremediation and Biomass Production—A New Challenge for Europe. Environments, 8(12), 136. https://doi.org/10.3390/environments8120136

Huo, S.; Liu, J.; Addy, M.; Chen, P.; Necas, D.; Cheng, P.; Li, K.; Chai, H.; Liu, Y.; Ruan, R (2020). The Influence of Microalgae on Vegetable Production and Nutrient Removal in Greenhouse Hydroponics. J. Clean. Prod. 243, 118563.

Kholomyeva, M., Vurm, R., Tajnaiová, L., Šír, M., Maslova, M. y Kočí, V. (2020). Ficoremediación de lixiviados de vertederos con Desmodesmus subspicatus : un tratamiento previo para la ósmosis inversa. Agua, 12 (6), 1755. https://doi.org/10.3390/w12061755

Méndez, C., & Uribe, E. (2017). Control of Branchionus sp. and Amoeba sp. in cultures of Arthrospira sp.. Latin American Journal of Aquatic Research, 40(3), 553-561. doi:http://dx.doi.org/10.3856/vol40-issue3-fulltext-5

Minhas, A. K., Gaur, S., Sunny, S., Paladugu, C., Ravishankar, G. A., Pereira, L., & Ambati, R. R. (2026). Microalgae-Based Wastewater Treatment Processes for the Bioremediation and Valorization of Biomass: A Review. Phycology, 6(1), 18. https://doi.org/10.3390/phycology6010018

Molitor HR, Schaeffer AK, Schnoor JL (2021). Sustainably Cultivating and Harvesting Microalgae through Sedimentation and Forward Osmosis Using Wastes. ACS Omega. Jun 25;6(27):17362-17371. doi: 10.1021/acsomega.1c01474. PMID: 34278122; PMCID: PMC8280685.

Mousavi, S., Najafpour, G.D., Mohammadi, M. *et al* (2018). Cultivation of newly isolated microalgae Coelastrum sp. in wastewater for simultaneous CO2 fixation, lipid production and wastewater treatment. Bioprocess Biosyst Eng 41, 519–530 https://doi.org/10.1007/s00449-017-1887-7

Na-Hui Hao, Jun Li, Ya-Rong Qi, Zhuo Chen, Yu-Ming Wang, Yu-Jia Gao, Xu-Cheng Cai, Yu Hong, Hong-Ying Hu, Yin-Hu Wu (2026). Microalgae-based bioremediation of reverse osmosis concentrate (ROC): Mechanisms, techno-economic bottlenecks, and circular bioeconomy perspectives, Desalination, Volume 638, 120574, ISSN 0011-9164, https://doi.org/10.1016/j.desal.2026.120574.

Pathom-aree, W., Sensupa, S., Wichaphian, A., Sriket, N., Kitwetch, B., Pekkoh, J., Sattayawat, P.,

Lomakool, S., Chromkaew, Y., & Srinuanpan, S. (2024). An Innovative Co-Cultivation of Microalgae and Actinomycete-Inoculated Lettuce in a Hydroponic Deep-Water Culture System for the Sustainable Development of a Food–Agriculture–Energy Nexus. *Horticulturae*, *10*(1), 70. https://doi.org/10.3390/horticulturae10010070

Peng, L., Lan, C.Q. and Zhang, Z. (2016), Cultivation of freshwater green alga Neochloris oleoabundans in non-sterile media co-inoculated with protozoa. Can. J. Chem. Eng., 94: 439-445. https://doi.org/10.1002/cjce.22407

Reyes Motavita, M. C., Díaz Barrios, M. C., & Hernández Castillo, B. E. (2023). Microalgas y cianobacterias: Fichas de morfoespecies. Biodiversidad acuática del Sitio Demostrativo de Ecohidrología PHI-UNESCO, DRMI-Sitio Ramsar Complejo Cenagoso de Zapatosa (Vol. 2). Fundación Natura; Ideam.

Ruiz A y García C (2020), Manual de Análisis de Laboratorio. Laboratorio de Remedición Ambiental, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Serediak, N., & Huynh, M. L. (2011). Algae identification lab guide: accompanying manual to the algae identification field guide. Agriculture and Agri-Food Canada.

Surya Nair K, Basavaraju Manu, Adani Azhoni (2021). Sustainable treatment of paint industry wastewater: Current techniques and challenges, Journal of Environmental Management, Volume 296, 113105, ISSN 0301-4797, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113105.

Viktoryová, N., Szarka, A., & Hrouzková, S. (2022). Recent Developments and Emerging Trends in Paint Industry Wastewater Treatment Methods. Applied Sciences, 12(20), 10678. https://doi.org/10.3390/app122010678

WWAP, The United Nations World Water Development Report (2023): Partnerships and cooperation for water., UNESCO, Paris, 2023. https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/en.

Revalorización de residuos de Nogal pecanero para la formulación de empaques bioactivos

Paola Anahí Torres-de León*; Romeo Rojas-Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila; Julia Mariana Márquez-Reyes.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399. *Email: paola.torresdl@uanl.edu.mx

Resumen. Las actividades de poda y manejo en el cultivo de nogal pecanero (*Carya illinoinensis*) generan importantes volúmenes de biomasa foliar y subproductos como la cáscara de nuez que actualmente carecen de estrategias integrales de revalorización sustentable. Por otro lado, la industria poscosecha enfrenta elevadas pérdidas económicas derivadas de la deshidratación, el ablandamiento y la senescencia acelerada de productos perecederos. Las ceras epicuticulares foliares y los extractos fenólicos bioactivos de la cáscara de nuez poseen una elevada hidrofobicidad y capacidad antioxidante, atribuidas a la presencia de ácidos grasos de cadena muy larga (VLCFAs) sintetizados por la familia génica *KCS* y a comuestos fenólicos. El objetivo de este proyecto es extraer y caracterizar la cera epicuticular del follaje residual y los extractos de la cáscara de *C. illinoinensis*, evaluando su funcionalidad en la formulación de un recubrimiento comestible biocompatible para la conservación poscosecha de un fruto modelo. La cera se obtendrá mediante un proceso de lixiviación limpia y *ecofriendly* con solventes orgánicos o soluciones aciduladas orgánicas (40–50 °C, 1–3 min) para evitar la extracción no deseada de clorofila. Se caracterizará por Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR), para identificar los grupos funcionales principales; su comportamiento térmico y punto de fusión (64–68 °C) por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC); su composición lipídica fina por Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS), así como el contenido de polifenoles totales (TPC), la capacidad de inhibición de la oxidación lipídica (LOI) y la actividad antioxidante (DPPH* y ABTS*$^{+}$). Posteriormente, mediante homogeneización de alto cizallamiento asistida por ultrasonido, se formularán emulsiones estables incorporando una matriz polimérica (pectina/quitosano) para su aplicación en el fruto modelo por inmersión (*dipping*). Los frutos se almacenarán en condiciones controladas (20 ± 2 °C y 85 ± 5 % HR) durante 18 días, evaluando periódicamente la pérdida de peso fisiológico (%), permeabilidad al vapor de agua (WVP), firmeza (N), color, pH, acidez titulable, sólidos solubles totales (°Brix) y control microbiológico contra fitopatógenos. Este estudio aportará una alternativa sustentable basada en la economía verde para revalorizar biomasa agrícola y sustituir ceras comerciales de elevado costo.
Palabras clave *Carya illinoinensis*, cera epicuticular, cáscara de nuez, recubrimientos comestibles, revalorización de residuos.

Abstract. Pruning activities and management in pecan orchards (*Carya illinoinensis*) generate significant volumes of residual foliage and by-products such as nutshells that currently lack efficient, sustainable valorization strategies. Concurrently, the postharvest industry faces substantial economic losses due to dehydration, softening, and accelerated senescence in perishable crops. Epicuticular leaf waxes and bioactive phenolic extracts from pecan nutshells exhibit high hydrophobicity and antioxidant capacity, attributed to very long-chain fatty acids (VLCFAs) synthesized by the *KCS* gene family and phenolic compounds. The objective of this project is to valorize *C. illinoinensis* residues through the extraction and

characterization of epicuticular leaf wax and bioactive nutshell extracts, evaluating their functionality in formulating a biocompatible bioactive packaging/coating for the postharvest preservation of a model fruit. The wax will be extracted via a clean, eco-friendly leaching process using organic solvents or acidulated solutions (40–50 °C, 1–3 min) to prevent undesirable chlorophyll co-extraction. Its structural profile will be characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to identify primary functional groups, its thermal behavior and melting point (64–68 °C) by Differential Scanning Calorimetry (DSC), its fine lipid composition by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS), as well as total phenolic content (TPC), lipid oxidation inhibition (LOI), and antioxidant capacity (DPPH* and ABTS $*^{+}$). Subsequently, using high-shear and ultrasound-assisted homogenization, stable emulsions will be formulated by incorporating a biopolymer matrix (pectin/chitosan) for application onto the model fruit via dipping. Fruits will be stored under controlled conditions (20 ± 2 °C and 85 ± 5 % RH) for 18 days, periodically assessing physiological weight loss (%), water vapor permeability (WVP), firmness (N), color, pH, titratable acidity, total soluble solids (°Brix), and microbiological control against phytopathogens. This study will provide a green technology strategy for agricultural biomass valorization and a viable alternative to costly commercial waxes in the food industry.
Keywords: *Carya illinoinensis*, epicuticular wax, pecan nutshell, edible coatings, waste valorization.

Introducción

En la producción agroindustrial del nogal pecanero (*Carya illinoinensis*), las labores de poda estacional y el procesamiento del fruto generan anualmente volúmenes considerables de biomasa residual foliar y cáscara de nuez (Corona-Ruiz *et al*., 2024; Cortés-Marín *et al*., 2023; Devidas *et al*., 2025; Liu *et al*., 2023). Habitualmente, estos subproductos carecen de un aprovechamiento estructurado, por lo que suelen acumularse en los huertos o quemarse a cielo abierto, generando emisiones contaminantes y riesgos fitosanitarios (Corona-Ruiz *et al*., 2024; Toledo *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024). Paralelamente, la industria agroalimentaria busca alternativas sostenibles para mitigar las mermas postcosecha en productos perecederos, causadas por deshidratación, pardeamiento y deterioro microbiológico (Gidado *et al*., 2024; Maringgal *et al*., 2020; Pashova, 2023).

Para proteger los frutos frescos, se ha consolidado el uso de recubrimientos comestibles de extracción *ecofriendly* con ácidos orgánicos (como ácido cítrico) que preservan la calidad cromática y estructural del biopolímero (Núñez-García *et al*., 2022).

Diversas investigaciones demuestran la viabilidad de revalorizar subproductos de *C. illinoinensis*. Por ejemplo, extractos fenólicos ricos en compuestos bioactivos (ácido gálico, elágico y taninos) obtenidos de la cáscara mediante tecnologías verdes como la extracción asistida por microondas (MAE) presentan un alto contenido de polifenoles totales (>440 mg GAE/g extracto) y una elevada actividad antioxidante medida por DPPH*, $ABTS^{*+}$ e inhibición de la oxidación lipídica (LOI) (Cortés-Marín *et al*., 2023; de la Rosa *et al*., 2011; Reyes-Vázquez *et al*., 2022). Además, estudios genómicos confirman que la cera epicuticular foliar de *C. illinoinensis* posee una rica fracción alifática

saturada (VLCFAs, n-alcanos C29-C33 y ésteres) regulada por la familia de genes *KCS* (Wang *et al*., 2023), constituyendo una barrera natural con elevado poder hidrofóbico.

A pesar de estos avances, la extracción *ecofriendly* y la caracterización detallada de la cera epicuticular y de los extractos bioactivos de la cáscara de *C. illinoinensis*, así como su combinación con matrices biopoliméricas mediante homogeneización por ultrasonido para desarrollar recubrimientos comestibles, no se han evaluado de manera integral. Esta propuesta resulta ventajosa pues revaloriza un recurso biológico local, abundante y de bajo costo (González-Sandoval *et al*., 2019; Pashova, 2023), aportando conocimiento científico original para la ingeniería de biosistemas.

Materiales y Métodos

2.1. Materiales

Se utilizará follaje residual y cáscara de nuez de nogal pecanero (*Carya illinoinensis*) obtenidos de las labores de poda y deshuesado en huertos de la región. Como matriz de prueba se seleccionará un fruto modelo perecedero en estado de madurez comercial, libre de daños físicos o mecánicos. Para la extracción *ecofriendly* y la formulación se utilizarán solventes de grado analítico (cloroformo, n-hexano, etanol 50 % v/v), ácido cítrico de grado alimentario, emulsificantes (Tween 80) y biopolímeros soporte (pectina cítrica y quitosano) (González-Sandoval *et al*., 2019; Luna-Sosa *et al*., 2020; Núñez-García *et al*., 2022).

2.2. Extracción y caracterización de la cera y fracciones bioactivas de cáscara

- **Preparación de la muestra:** Las hojas y la cáscara recolectadas se lavarán con agua destilada para eliminar impurezas y se secarán en estufa a 60°C hasta alcanzar peso constante. La cáscara se molerá hasta obtener un tamaño de partícula de 1 mm.
- **Extracción de la cera y polifenoles:** La cera epicuticular foliar se extraerá por inmersión breve en solvente/solución acidulada orgánica (40–50 °C, 1–3 min) (Núñez-García *et al*., 2022; Pashova, 2023). Por su parte, los bioactivos de la cáscara se obtendrán mediante extracción asistida por microondas (MAE, 75 °C, 15 min, etanol 50 % v/v) (Cortés-Marín *et al*., 2023). Los extractos se filtrarán y concentrarán en rotavapor.

Análisis funcional, químico y estructural:

- **Infrarrojo (FTIR):** Identificación de grupos funcionales en el rango 4000–650 cm^{-1}, evaluando las bandas de estiramiento alifático C–H (2953–2847 cm^{-1}), flexión del grupo C=O (1734 cm^{-1}) y el doblete cristalino en 729 y 718 cm^{-1} (Núñez-García *et al*., 2022).
- **Análisis térmico (DSC):** Determinación de la temperatura de fusión ($T_m \sim 64$--$68\,°C$), cristalización (T_c) y entalpía (ΔH_m) bajo atmósfera inerte de nitrógeno (Núñez-García *et al*., 2022).
- **Cromatografía de gases (GC-MS):** Análisis cuantitativo del perfil de ácidos grasos saturados de cadena

muy larga (VLCFAs) y alcanos (Wang *et al*., 2023).

- **Contenido fenólico y capacidad antioxidante:** Cuantificación de Polifenoles Totales (TPC, mg GAE/g) mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu, capacidad de remoción de radicales libres por DPPH* y ABTS*+ (μmol ET/g), e inhibición de la oxidación lipídica (LOI) (Cortés-Marín *et al*., 2023).

2.3. Formulación y homogeneización del recubrimiento

- **Preparación de la emulsión:** Se prepararán dispersiones acuosas combinando pectina cítrica (1.5–2.0 % w/v), la cera extraída (1.0–2.5 % w/v) y el extracto fenólico con glicerol (0.5 % v/v) como plastificante y Tween 80 como tensoactivo (González-Sandoval *et al*., 2019; Luna-Sosa *et al*., 2020). La mezcla se someterá a calentamiento (65–70 °C) y homogeneización de alto cizallamiento asistida por ultrasonido (2500 rpm) para asegurar una dispersión fina y estable de la fase lipídica (Ochoa *et al*., 2011).

2.4. Aplicación y evaluaciones en el fruto modelo

- **Aplicación:** Los frutos modelo se desinfectarán con una solución de hipoclorito de sodio (200 ppm), se secarán y se dividirán en los siguientes tratamientos: control (sin recubrimiento), matriz base biopolimérica y formulaciones con cera y extracto de nogal. Se aplicarán por inmersión (*dipping*, 30 s) y se secarán con flujo de aire forzado. Los frutos se almacenarán en cámara bajo ambiente controlado (20 ± 2 °C y 85 ± 5 % HR) durante 18 días (Kader, 2002; Miranda *et al*., 2022; Ochoa *et al*., 2011).

Evaluaciones postcosecha periódicas:

- **Pérdida de peso (%) y Permeabilidad (WVP):** Evaluación no destructiva midiendo la masa de un lote fijo ($n = 10$) cada 48 h y permeabilidad al vapor de agua en celdas gravimétricas (Wills & Golding, 2016; González-Sandoval *et al*., 2019).
- **Firmeza (N):** Medición destructiva cada 3 días en muestras independientes ($n = 5$) mediante penetrometría de pulpa con texturómetro (Kader, 2002).
- **Atributos fisicoquímicos y color:** Determinación de pH, acidez titulable, sólidos solubles totales (°Brix) en jugo y evaluación cromática CIELab (L^*, a^*, b^*) (González-Sandoval *et al*., 2019; Ochoa *et al*., 2011
- **Evaluación microbiológica y antifúngica:** Monitoreo de la severidad del daño e inhibición del crecimiento de fitopatógenos en superficie (*Colletotrichum*, *Fusarium*, *Penicillium*) (Ochoa *et al*., 2011).

2.5. Análisis estadístico

Se empleará un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial. Los datos se procesarán mediante Análisis de Varianza (ANOVA) y comparación de medias por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) empleando el software Minitab 17.

Plan de trabajo y calendarización

El plan de trabajo comprende las actividades secuenciales distribuidas en cuatro semestres para cumplir con los objetivos específicos del proyecto de investigación.

Cuadro 1. Calendarización de actividades para el desarrollo del proyecto de maestría.

Actividad / Período	2026-II (Sem 1)	2027-I (Sem 2)	2027-II (Sem 3)	2028-I (Sem 4)
Revisión bibliográfica y redacción del protocolo de tesis	X			
Muestreo y recolección de follaje residual de poda de *Carya illinoinensis*	X	X		
Acondicionamiento del material vegetal (lavado, secado y molienda)		X		
Extracción de la cera epicuticular mediante lixiviación con solvente		X		
Caracterización fisicoquímica de la cera (rendimiento, DSC, FTIR y GC-MS)		X	X	
Formulación y optimización de las emulsiones para recubrimiento comestible			X	
Aplicación del recubrimiento en fruto modelo y evaluación postcosecha			X	X
Análisis estadístico e interpretación de datos experimentales				X
Redacción del manuscrito científico y escritura de tesis de maestría			X	X
Defensa del examen de grado				X

Pie de Cuadro. Plan de actividades proyectado a cuatro semestres lectivos para el programa de Maestría en Ciencias.

Desglose financiero

El desglose financiero estimado para la ejecución del proyecto contempla insumos, reactivos de grado analítico, servicios analíticos instrumentales y viáticos de campo.

Cuadro 2. Desglose financiero estimado por rubros y fuentes de financiamiento.

Rubro	Monto estimado (MXN)	Fuente del recurso
Reactivos e insumos (cloroformo, n-hexano, estándares analíticos, agentes emulsionantes, material de vidrio)	$100,000.00	CONAFOR-TTCOAP6126160005
Equipo (mantenimiento menor de rotavapor y homogeneizador)	$8,000.00	CONAFOR-TTCOAP6126190002
Servicios analíticos (caracterización por FTIR, DSC y cromatografía de gases GC-MS)	$50,000.00	CONAFOR-IFPCAP6126050001
Maquinaria / Herramientas (consumibles de laboratorio y procesamiento)	$5,000.00	SECIHTI-PEE-2026-D-23
Viáticos en general (combustible y peajes para recolección de muestras en huertos)	$10,000.00	Recursos propios / Apoyo de campo
Eventos académicos (inscripción a congresos y difusión de resultados)	$10,000.00	Beca CONAHCYT / Apoyo de posgrado
Total	**$183,000.00**	

Pie de Cuadro. Los montos están expresados en pesos mexicanos (MXN) e incluyen la estimación global de costos para el desarrollo del proyecto experimental.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y a la Facultad de Agronomía.
Asimismo, a la SECIHTI por la beca otorgada para los estudios de posgrado. A los proyectos vigentes CONAFOR-TTCOAP6126160005, CONAFOR-TTCOAP6126190002, CONAFOR-IFPCAP6126050001 y SECIHTI-PEE-2026-D-23.
Finalmente, expreso mi gratitud a mi Comité Tutorial por su valiosa orientación y aportaciones en el diseño de esta propuesta.

Referencias Bibliográficas

Aranda-Ledesma, N. E., Bautista-Hernández, I., & Martínez-Ávila, G. C. G. (2022). Candelilla wax: Prospective suitable applications within the food field. *LWT*, 160, 113282.

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. (2023). *Tabulador de rubros elegibles y*

viáticos para proyectos de investigación y fortalecimiento de posgrados. Gobierno de México.

Corona-Ruiz, S. L., Díaz-Jiménez, L., & Carlos-Hernández, S. (2024). Catalytic gasification as a management strategy for wastes from pecan harvest. *Industrial Crops and Products*, 222, 119850.

Cortés-Marín, K., Gaspar-Ramírez, O., Salas-Espinoza, E., & Reyes-Vázquez, N. (2023). Evaluación de la actividad antioxidante de compuestos fenólicos extraídos con microondas de residuos de cáscara de nuez pecanera. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8, 816-824.

CTR Scientific. (2024). *Catálogo general de reactivos químicos, solventes analíticos y consumibles de laboratorio*. CTR Scientific México. https://www.ctr.com.mx

de la Rosa, L. A., Alvarez-Parrilla, E., & Shahidi, F. (2011). Phenolic compounds and antioxidant activity of kernels and shells of Mexican pecan (*Carya illinoinensis*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 152-162.

Devi, L. S., Kalita, S., & Kumar, S. (2022). Carnauba wax-based composite films and coatings: recent advancement in prolonging postharvest shelf-life of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 129, 296-305.

Devidas, S. B., Kashyap, U., & Reddy, S. G. E. (2025). Insecticidal activities of agro waste of *Carya illinoinensis* (Wangenh.) K. Koch for the management of sucking pests. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 63, 103400.

Gidado, M. J., Nagoor Gunny, A. A., & Salleh, N. H. M. (2024). Challenges of postharvest water loss in fruits: Mechanisms, influencing factors, and effective control strategies – A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, 101230.

González-Sandoval, D. C., Luna-Sosa, B., Martínez-Ávila, G. C. G., Rodríguez-Fuentes, H., Avendaño-Abarca, V. H., & Rojas, R. (2019). Formulation and characterization of edible films based on organic mucilage from Mexican *Opuntia ficus-indica*. *Coatings*, 9(8), 506.

Kader, A. A. (Ed.). (2002). *Postharvest technology of horticultural crops* (3rd ed., Publication 3311). University of California, Agriculture and Natural Resources.

Laboratorios Centrales UANL. (2024). *Catálogo de servicios y tarifas de análisis instrumentales (FTIR, DSC, GC-MS)*. Subdirección de Posgrado e Investigación, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Liu, Z., Jia, M., & Yu, J. (2023). Comparative analysis of the properties of biochars produced from different pecan feedstocks and pyrolysis temperatures. *Industrial Crops and Products*, 198, 116680.

Luna-Sosa, B., Martínez-Ávila, G. C. G., Rodríguez-Fuentes, H., Azevedo, A. G., Pastrana, L. M., Rojas, R., & Cerqueira, M. A. (2020). Pectin-based films loaded with hydroponic nopal mucilages: Development and

physicochemical characterization. *Coatings*, 10(5), 467.

Maringgal, B., Hashim, N., & Mohamed, M. T. M. (2020). Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 253-267.

Miranda, M., Sun, X., & Baldwin, E. (2022). Nano- and micro-sized carnauba wax emulsions-based coatings incorporated with ginger essential oil and hydroxypropyl methylcellulose on papaya: Preservation of quality and delay of post-harvest fruit decay. *Food Chemistry: X*, 13, 100249.

Núñez-García, I. C., Rodríguez-Flores, L. G., Guadiana-De-Dios, M. H., González-Hernández, M. D., Martínez-Ávila, G. C. G., Gallegos-Infante, J. A., González-Laredo, R., Rosas-Flores, W., Martínez-Gómez, V. J., Rojas, R., Villanueva-Fierro, I., & Rutiaga-Quiñones, M. (2022). Candelilla wax extracted by traditional method and an ecofriendly process: Assessment of its chemical, structural and thermal properties. *Molecules*, 27(12), 3735.

Ochoa, E., Saucedo-Pompa, S., Rojas-Molina, R., de la Garza, H., Charles-Rodríguez, A. V., & Aguilar, C. N. (2011). Evaluation of a candelilla wax-based edible coating to prolong the shelf-life quality and safety of apples. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6(1), 92-98.

Pashova, S. (2023). Application of plant waxes in edible coatings. *Coatings*, 13(5), 911.

Reyes-Vázquez, N., de la Rosa, L. A., Morales-Landa, J. L., García-Fajardo, J. A., & García-Cruz, M. Á. (2022). Phytochemical content and potential health applications of pecan [*Carya illinoinensis* (Wangenh) K. Koch] nutshell. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 22(2), 150-167.

Sigma-Aldrich. (2024). *Specification sheet and pricing index for analytical grade reagents and lipid standards*. Merck KGaA. https://www.sigmaaldrich.com

Toledo, P. F. S., Phillips, K., & Acebes-Doria, A. L. (2024). Canopy hedge pruning in pecan production differentially affects groups of arthropod pests and associated natural enemies. *Crop Protection*, 176, 106510.

Wang, H., He, T., & Li, Y. (2023). Genome-wide identification of *KCS* gene family in *Carya illinoinensis* and their roles under abiotic stress conditions. *Scientia Horticulturae*, 321, 112345.

Wang, L., Zhou, M., & Zhang, Q. (2024). Sequencing of leaf endophytic fungal communities of *Carya illinoinensis* revealed a dominance of pathogenic fungi. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 131, 102260.

Wills, R. B. H., & Golding, J. B. (2016). *Postharvest: An introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals* (6th ed.). CABI Publishing.

Uso de agroecosistemas como hábitat reproductor de la avifauna terrestre en Marín, Nuevo León

Rubén García-Espinosa[1*]; Maginot Ngangyo-Heya[1]; Lidia Rosaura Salas-Cruz[1]; Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena[1]; Marilyn Castillo-Muñoz[2].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.[1]
[2]Instituto de Veterinaria y Ecología. Av. 7 Ote., Centro histórico de Puebla, 72500 Heroica Puebla de Zaragoza, Puebla.[2]
*Email: ruben.garciaea@uanl.edu.mx

Resumen. Los agroecosistemas fragmentan el paisaje formando mosaicos a los cuales se les asigna un diferente uso en función de las actividades agrícolas que desarrolla. Las aves son algunos de los seres vivos que forman parte de múltiples ecosistemas y de las principales en sufrir los cambios y efectos de la fragmentación ocasionada por la agricultura, que lleva por consecuencia a la disminución y perdida del hábitat por falta de refugio, alimento o zonas de descanso. Las aves son bioindicadores de la salud del ecosistema y de los agroecosistemas; aunque algunas especies se ven afectadas por las actividades humanas y perdida de hábitat, otras se han adaptado debido al potencial de estos sistemas de funcionar como hábitat para algunas especies silvestres de aves. Esta investigación tiene como objetivo comparar la diversidad de aves entre distintos agroecosistemas por las estaciones del año evaluando parámetros ecológicos: abundancia, densidad y dominancia y variables dasométricas: cobertura y área basal. Además, los índices de riqueza de Shannon-Weiner, Simpson e índice de biodiversidad de Margalef para determinar la relación entre los agroecosistemas y los hábitos de la avifauna.
Palabras clave. Agricultura, cultivos, aves, ornitofauna

Abstract. Agroecosystems fragment the landscape, forming mosaics that are assigned different land uses depending on the agricultural activities carried out there. Birds are among the living organisms that are part of multiple ecosystems and are among the most affected by the changes and effects of fragmentation caused by agriculture, which results in habitat decline and loss due to a lack of shelter, food, or resting areas. Birds serve as bioindicators of the health of ecosystems and agroecosystems; although some species are affected by human activities and habitat loss, others have adapted due to the potential of these systems to function as habitats for certain wild bird species. The objective of this research is to compare bird diversity across different agroecosystems throughout the seasons by evaluating ecological parameters—abundance, density, and dominance—and dasometric variables—coverage and basal area. Additionally, the Shannon-Weiner and Simpson indices of species richness, as well as Margalef's biodiversity index, will be used to determine the relationship between agroecosystems and the habits of bird fauna.
Keywords: agriculture, birds, crops, avifauna.

Introducción

La agricultura es un invento del hombre y se ha practicado desde hace casi más de 10000 años y ha evolucionado hasta como la conocemos en la actualidad. Para satisfacer la demanda mundial de alimentos, el hombre ha intensificado los

procesos productivos de los sistemas agrícolas con el objetivo de optimizar el rendimiento de los cultivos, parte que ha resultado contradictoria para el medio ambiente (Verea *et al*., 2009).

Este modelo de producción ha llevado a un cambio entre la agricultura y el ecosistema y es causa de la crisis de la agricultura moderna y el abandono de las zonas rurales. La agricultura intensiva ha modificado el paisaje derivado de la sobre explotación de los recursos naturales.

Los sistemas agrícolas al igual que los sistemas naturales requieren de biodiversidad para mantenerse en equilibrio. Esta diversidad se compone de elementos como factores abióticos y bióticos (microorganismos, insectos, flora y fauna), siendo la base para el desarrollo de agroecosistemas sanos (Sans, 2007).

El cambio de uso de suelo y la intensificación de la agricultura ha afectado considerablemente esta diversidad, siendo las aves una de las especies más afectadas por estos cambios, al perturbar el hábitat donde realizan actividades de alimentación, reproducción o descanso.

No obstante, diversos autores han encontrado relación entre los agroecosistemas y diversas especies de aves. Aunque la presencia de aves no significa que estos sistemas brinden lo que un área natural, estas áreas pueden servir como fuente de alimento, refugio y protección, sitios para anidación, reproducción y conectividad de rutas migratorias para aves residentes y migratorias (Diaz *et al*., 2014).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es evaluar la composición avifaunística de distintos agroecosistemas en Marín, Nuevo León, para determinar su relación con la estructura de la vegetación, así como su influencia en la conservación.

Materiales y Métodos

La investigación se realizará en el campus académico-experimental Marín de la Facultad de Agronomía (Figura. 1) localizado en el municipio de Marín, Nuevo León, ubicado en la provincia fisiográfica de la Llanura Costera del Golfo del Norte. La altitud es de 400 msnm, con un clima semiseco cálido con lluvia escasa todo el año, precipitación media anual entre los 600 y 700 mm. La temperatura media mensual más alta se registra en agosto (40° C) y la mínima en diciembre (5.4° C) (CONAGUA, 2026).



Figura 1. Área de estudio. Campus Marín de la Facultad de Agronomía UANL. Se muestran polígonos norte, centro y sur.

Sitios de muestreo

Los sitios de muestreo se determinaron con base a trabajos previos de caracterización del suelo y se dividieron en dos grupos: Agroecosistemas y Areas Naturales. El primero se subdividió en Presas (PR) que se utilizan para pesca deportiva, actividades recreativas y riego de pastizales; Pastizales (PAS), donde se siembra zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*) que se utiliza para elaborar pacas y alimentar ganado; y Cítricos (CIT), caracterizado por el cultivo de toronja (*Citrus x paradisi*). El segundo se dividió en Agostadero (AGO), caracterizado por vegetación de Matorral espinoso tamaulipeco; y Vegetación Riparia (VR) (Figura 2). Posteriormente se seleccionaron puntos de muestreo para cada sitio (Diaz-Reyes *et al*., 2020).



Figura 2. Sitios de muestreo. a) Presas, b) Pastizal, c) Cítricos; d) Agostadero; e) Vegetación riparia.

Puntos de muestreo

Los puntos de muestreo se seleccionaron con base a visitas de campo y se eligieron según la accesibilidad para cada sitio y representatividad de cada componente (Espinoza-Bretado & Navar, 2005), después fueron georreferenciados mediante GPS Garmin®.

Muestreo de Vegetación

El muestreo de la vegetación será utilizando el método de transectos para Presas, Vegetación Riparia y Agostadero. Se realizará un inventario y caracterización de la estructura horizontal y composición de la vegetación de cada sitio (Ferro-Diaz, 2015). Las variables ecológicas que se determinaran son: Densidad (abundancia), Densidad relativa, Dominancia (cobertura) Dominancia relativa, Frecuencia, Frecuencia relativa e Indice de valor de importancia (Valdéz *et al*., 2018) en un área mínima de muestreo representativa (10%) de la extensión total de cada componente del paisaje. Para Cítricos (CIT) se considerará el marco de plantación y la densidad de siembra. Además, se utilizará el índice de Shannon-Weiner e índice de Simpson para determinar riqueza y el índice de diversidad de Margalef.

Densidad (Abundancia)

La abundancia hace referencia al número de individuos presentes en determinada área, y clasificada en términos relativos (Ferro-Diaz, 2015).

$$Ai = Ni/E$$

Dónde:
Ai= Densidad absoluta
Ni= Número de individuos de la especie i
E= Superficie de muestreo

Densidad relativa

La densidad se refiere al número de individuos en una determinada especie respecto a la densidad total (Maza-Villalobos *et al*., 2014) y se expresa de la siguiente forma:

$$ARi = [Ai/\Sigma i = 1 \ldots n\ A\ i]\text{x}100$$

Dónde:
ARi= Densidad relativa de la especie i respecto a la densidad total
Ai= Densidad absoluta

Dominancia (Cobertura). La cobertura se relaciona a una superficie cubierta por las partes aéreas de los individuos de una especie o varias especies (Minorta-Cely *et al*., 2019). Se expresa de la siguiente forma:

D i = Ab i / E(ha)

Dónde:
Di es la cobertura absoluta,
Ab el área de copa de la especie *i* y
E la superficie (ha).

Dominancia relativa

Identifica las especies de plantas que tienen mayor importancia dentro de una comunidad vegetal, debido al espacio que ocupan y la superficie que cubren (Graciano-Ávila *et al*., 2020).

$$DR\ i\ =\ [D\ i\ /\ (\sum i = 1 \ldots n\ D\ i\ ]\ x\ 100$$

Dónde:
Donde DR_i = cobertura relativa de la especie *i* respecto a la cobertura y
D_i e= la cobertura absoluta.

Frecuencia

F i = P i / NS.

Dónde F i = la frecuencia absoluta,
P i = el número de sitios en el que está presente la especie i y
NS = el número total de sitios de muestreo.

Frecuencia relativa

$$FR\,i\; =\; [F\,i\,/\sum i = 1 \ldots n\,F\,i\,]\,x\,100.$$

Dónde FR i = la frecuencia relativa de la especie i respecto a la suma de las frecuencias, y F i = la frecuencia absoluta.

Índice de Valor de importancia (IVI)

$$IVI\; =\; AR\,i\; +\; DR\,i\; +\; FR\,i\,/\,3$$

Área basal

Es la superficie que ocupa transversalmente el tronco de un árbol a la altura de pecho (1.30 m).

Monitoreos de aves

Previo al comienzo de las actividades se llevará a cabo una prospección de campo para la familiarización de cada sitio y precisión en la identificación visual y auditiva (Martin & Gaupel, 1993). La identificación de nidos se efectuará mediante observación directa utilizando el método de puntos de conteo durante 20 minutos dentro de cada uno de los diferentes sitios, una vez por semana cada mes durante la época reproductiva (Torres & Hijle, 2026) y será durante las primeras 4 horas posteriores al amanecer (Xu *et al*., 2025). la identificación de aves se realizará mediante el uso de bibliografía científica y guías de campo de referencia regional (Moreno *et al*., 2023).

Posterior a la identificación, los nidos serán clasificados con base a lo propuesto por Harte, 1989. y las aves serán clasificadas como residentes todo el año o residentes de verano según su presencia, basados en la Sociedad Americana de Ornitología (Chesser *et al*., 2026). Además, se reportará el estatus de conservación según la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010) (Cayetano-Rosas *et al*., 2023), y la Lista Roja de la Unión Internacional por la Conservación de la Naturaleza (IUCN). Con la información obtenida, se determinarán los índices de Shannon-Weiner, Simpson y Margalef.

Riqueza de especies

Para determinar la riqueza de especies se utilizarán los índices de Shannon-Weiner y de Simpson (Espinoza-Bretado & Navar, 2005).

El índice de Shannon-Wiener (H') considera la riqueza y equidad de las especies. El valor permite relacionar la heterogeneidad estructural.

$$\mathrm{H}\text{^}' = -\sum pi\,(\ln pi)$$

Dónde:

pi= es la proporción del total de la muestra encontrada para la especie i y ln= logaritmo natural.

El índice de diversidad de Simpson muestra la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar pertenezcan a especies distintas (Galván-Moreno *et al*., 2025).

$$D = \sum(pi)\text{^}2$$

Índice de diversidad de Margalef

El índice de biodiversidad de Margalef **(Dmf)** mide la biodiversidad del número de especies por número de individuos en determinada área de muestra (Margalef, 1951).

$$Dmg = (S-1)/ln\,N$$

Dónde:
S= Número total de especies
N= Número total de individuos

Plan de trabajo y calendarización

El plan de trabajo y calendarización de las actividades se muestran en el **Cuadro 1.**

Cuadro 1. Plan de trabajo y calendarización.

	2026	2027		2028
	Ago.-Dic.	Ene.-Jun.	Ago.-Dic.	Ene.-Jun.
Protocolo de investigación	✓			
Definición de sitios de muestreo	✓			
Calendarización de muestreos y preparación de materiales	✓			
Zonificación de puntos de muestreo	✓			
Muestreos de aves y vegetación		✓	✓	
Análisis de datos de la estructura de la cubierta vegetal		✓		
Análisis de datos de la diversidad de aves y estacionalidad			✓	
Análisis de correlación para determinar funcionalidad ecológica				✓
Redacción de artículo científico				✓
Redacción y defensa de tesis				✓

Desglose financiero

El costo de los materiales e insumos se encuentran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Desglose financiero del proyecto de investigación.

	Monto para utilizar	Fuente del recurso
Binoculares y guías de campo.	$2,500	Beca SECIHITI Y proyecto de investigación UANL Clave: 404-CAAFE-2026.
Cinta métrica, cuerdas y estacas.	$900	
Cámara fotográfica	$15,000	
Lente macro para cámara fotográfica	$6,000	
Gasolina	$5,000	
Comida	$1,800	
Congresos	$11,000	
Total	**$42,200**	

Agradecimientos

Se agradece a la SECIHTI por la beca de manutención asignada y al personal de la FAUANL campus Marín y a la Subdirección de Posgrado e Investigación por facilitar las instalaciones para el desarrollo del proyecto.

Referencias Bibliográficas

Cayetano-Rosas, H., Ramírez Hernández, M., Gómez-Garduño, J., Piñón Santoyo, N., Bautista-Trejo, R., Valverde Nieto, J. G., & Ramírez-Albores, J. E. (2023). Composición espacial y temporal de aves

acuáticas y rapaces en humedales del centro de México. *Cuadernos de Investigación UNED*, *15*(1), 105-118.

Desarrollo. (s/f). *Normales Climatológicas por Estado*. Gob.mx. Recuperado el 28 de octubre de 2026, de https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=nl

Díaz-Bohórquez, A. M., Bayly, N. J., Botero, J. E., & Gómez, C. (2014). Aves migratorias en agroecosistemas del norte de Latinoamérica, con énfasis en Colombia. *Ornitología Colombiana*, (14), 3.

Díaz-Reyes, C., Granados-Sánchez, D., Uribe-Gómez, M., Rodríguez-Trejo, D. A., & Granados Victorino, R. L. (2020). Ordenación de la vegetación de las sierras y llanuras occidentales municipio de Catorce, San Luis Potosí. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *11*(4), 713-725.

Domínguez Gómez, T. G., Hernández González, B. N., González Rodríguez, H., Cantú Silva, I., Alanís Rodríguez, E., & Alvarado, M. D. S. (2018). Estructura y composición de la vegetación en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental. *Revista mexicana de ciencias forestales*, *9*(50), 9-34.

Espinoza-Bretado, R., & Návar, J. (2005). Producción de biomasa, diversidad y ecología de especies en un gradiente de productividad en el matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *11*(1), 25-31.

Ferro-Díaz, J. (2015). Manual revisado de métodos útiles en el muestreo y análisis de la vegetación. Revised Manual of useful methods for sampling and analysis of vegetation.

Galván-Moreno, V. S., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Quiñones-Barraza, G., & Rascón-Solano, J. (2025). Comparación de métodos de muestreo para caracterizar bosques de pino-encino en el norte de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, *12*(SPE5).

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Corral-Rivas, J. J. (2020). Cambios estructurales de la vegetación arbórea en un bosque templado de Durango, México. *Acta botánica mexicana*, (127).

Margalef, R. (1951). Diversidad de especies en las comunidades naturales.

Martin, T. E., & Geupel, G. R. (1993). Nest-Monitoring Plots: Methods for Locating Nests and Monitoring Success (Métodos para localizar nidos y monitorear el éxito de estos). *Journal of field Ornithology*, 507-519.

Maza-Villalobos, S., Macedo-Santana, F., Rodríguez-Velázquez, J., Oyama, K., & Martínez-Ramos, M. (2014). Variación de la estructura y composición de comunidades de árboles y arbustos entre tipos de

vegetación en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. *Botanical Sciences*, *92*(2), 243-258.

Minorta-Cely, V., Rangel-Ch, J. O., Castro-Lima, F., Aymard-C, G., & Rangel-Ch, O. J. (2019). La vegetación de la serranía de Manacacías (Meta) Orinoquía colombiana. *En: Rangel-Ch OJ.(ed.). Colombia Diversidad Biótica XVII: La región de la serranía de Manacacías (Meta) Orinoquía colombiana. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá*, 247-358.

Moreno-Vera, A., Jimenez-Romero, E., Herrera-Feijoo, R. J., Carranza, M., & Saltos-Navia, J. (2023). Análisis de la diversidad de aves y plantas en diferentes coberturas de vegetación en la finca experimental “La Represa”, Quevedo–Ecuador. *Green World Journal*, *6*(02).

Sans, F. X. (2007). La diversidad de los agroecosistemas. *Ecosistemas*, *16*(1).

Torres-Guzmán, R., & Hilje, B. (2026). Diversidad y composición de especies de aves y mamíferos en distintos usos de la tierra en la parte alta de la Zona Protectora del Río Tiribí, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, *23*(53), 28-40.

Valdez M., Carlos Gerardo, Guzmán L., Marco Antonio, Valdés G., Arcadio, Forougbakhch P., Rahim, Alvarado V., Marco Antonio, & Rocha E., Alejandra. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. Revista de Biología Tropical, 66(4), 1674-1682. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32135

Verea, C., Araujo, M. A., Parra, L., & Solórzano, A. (2009). Estructura de la comunidad de aves de un monocultivo frutícola (naranjo) y su valor de conservación para la avifauna: estudio comparativo con un cultivo agroforestal (cacao). *Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales*, *172*, 51-68.

Xu, W., Xu, Y., Han, Z., Yao, J., Tryjanowski, P., & Wang, H. (2025). Disentangling the relative effects of semi-natural habitats within different landscape agricultural intensities on bird communities. *Avian Research*, *16*(1), 100228.

Evaluación de *Sinorhizobium meliloti* como solubilizadora de fósforo en plántulas de alfalfa (*Medicago sativa* L.)

Paola Montserrat Navarro-Ibarra[1*]; Guadalupe Gutiérrez-Soto[1]; Iosvany López-Sandin[2]; Jesús Andrés Pedroza-Flores[1]; Isidro H. Almeyda-León [3]; Hafiz N.Iqbal[1].
[1] Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2] Departamento de Ingeniería; Universidad Emiliano Zapata, Avenida Rodrigo Gómez, Sector Heroico s/n, Monterrey, NL, México, C.P. 64260;
[3] INIFAP-Campo Experimental General Terán, Carr. Montemorelos-China km. 31, General Terán, Nuevo León, México. C.P. 67400
*Email: paola.navarroibr@uanl.edu.mx

Resumen. El fósforo es el segundo macronutriente más importante para el metabolismo vegetal. Sin embargo, gran parte de este se encuentra presente en el suelo en formas insolubles no disponibles para las plantas. Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF) representan una alternativa sostenible a los fertilizantes químicos al transformar el fósforo insoluble en formas asimilables. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de *Sinorhizobium meliloti* sobre la germinación y crecimiento de alfalfa (*Medicago sativa* L. variedad Atlixco) con diferentes fuentes de fósforo. Fue utilizado un inoculante con una concentración de 1.0 x 10^7 UFC/ mL de la bacteria. La germinación se evaluó en 800 semillas distribuidas en dos tratamientos, semillas inoculadas y no inoculadas. Posteriormente, fueron establecido cinco tratamientos con distintas combinaciones de inoculación y suministro de fósforo insoluble o soluble. A los 14, 28 y 42 días después de la siembra fueron evaluados el crecimiento, biomasa, concentración de fosfato en tejidos y el pH del sustrato. La inoculación incremento significativamente la germinación de 87.5 a 91.5% (Tukey, $p \leq 0.05$). El control sin inoculación ni fósforo añadido no sobrevivió al establecimiento. A los 14 días, el tratamiento T4 presentó la mayor biomasa aérea (0.0289 g), aunque estas diferencias no persistieron a lo largo del tiempo. El fósforo soluble produjo la mayor longitud aérea final (9.97cm). Bajo las condiciones evaluadas, no fue observada la formación de nódulos en los tratamientos inoculados con la bacteria, por lo que son requeridos estudios para validar el bioinoculante.
Palabras clave. crecimiento vegetal; inoculación bacteriana; biofertilizantes; ensayo en planta.

Abstract. Phosphorus is the second most important macronutrient for plant metabolism; however, a large portion of it is present in the soil in insoluble forms that are not available to plants. Phosphorus-solubilizing microorganisms (PSM) represent a sustainable alternative to chemical fertilizers by transforming insoluble phosphorus into assimilable forms. The aim of this study was to evaluate the effect of *Sinorhizobium meliloti* on the germination and growth of alfalfa (*Medicago sativa* L. Atlixco variety) under different phosphorus sources. An inoculant with a bacterial concentration of 1.0 x 10^7 CFU / mL was used. Germination was evaluated in 800 seeds distributed into two treatments: inoculated and non- inoculated seeds. Subsequently, five treatments were established with different combinations of

inoculation and supply of insoluble or soluble phosphorus. Growth, biomass, tissue phosphate concentration and substrate pH were evaluated at 14, 28 and 42 days after sowing. Inoculation significantly increased germination from 87.5% to 91.5% (Tukey, $p \leq 0.05$). The control without inoculation or added phosphorus did not survive establishment. At 14 days, treatment T4 presented the highest aerial biomass (0.0289g), although these differences did not persist over time. Soluble phosphorus produced the greatest final shoot length (9.97cm). Under the evaluated conditions, no nodule formation was observed in the treatments inoculated with bacteria, thus further studies are required to validate the bioinoculant.
Keywords: plant growth; bacterial inoculation; biofertilizers; plant assay.

Introducción

Las proyecciones demográficas estiman que la población mundial alcanzará los 9 mil millones de habitantes para el año 2050, lo que incrementará la demanda de alimentos y la necesidad de optimizar la productividad de los cultivos para garantizar la seguridad alimentaria (Bindraban *et al*., 2020). El uso excesivo de estos insumos ha generado preocupación por sus efectos negativos en los ecosistemas al disminuir la fertilidad del suelo, causar la contaminación de cuerpos de agua y aumentar la huella de carbono (Kumar *et al*., 2014).

En este contexto, el fósforo (P) adquiere importancia ya que es el segundo macronutriente más importante para el metabolismo y productividad en plantas (Elhaissoufi *et al*.,2022). Este elemento está asociado directamente en funciones esenciales como división celular, transferencia de energía, la síntesis de ácidos nucleícos, formación de fosfoplidos en la membrana y fotosíntesis, además de jugar un papel importante en la formación de nódulos, fijación de nitrógeno y la obtención de nutrientes del suelo (Awasthi *et al*., 2011). A pesar de su presencia en diversos tipos de suelo, una gran cantidad de fósforo no está disponible para las plantas ya que este suele unirse a partículas como cationes de calcio en suelos alcalinos, o hierro y aluminio en suelos ácidos, formando complejos insolubles (Collavino *et al*., 2010), lo que limita significativamente su disponibilidad. Esta limitación, ha conducido al uso intensivo de fertilizantes fosfatados en la agricultura actual, sin embargo, gran cantidad del fósforo aplicado se inmoviliza rápidamente (Vance *et al*., 2003)

En este sentido, los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF) que incluyen bacterias y hongos representan una alternativa sostenible para mejorar la nutrición de fósforo en los cultivos. Estos microorganismos tienen la capacidad de transformar el P insoluble en ortofosfatos solubles, lo que permite que la planta los pueda asimilar (Alzate Zuluaga *et al.,* 2021). Es reportado que la inoculación de MSF en cultivos como trigo y leguminosas ha promovido su crecimiento ya que influyen en la morfología de la raíz, aumentando su tamaño lo que permite captar más nutrientes y fomentar su desarrollo (Mengesha y Legesse, 2024). Los MSF actúan a través de diferentes mecanismos como lo son la secreción de ácidos orgánicos como ácido cítrico, oxálico y succínico, así como la producción de

enzimas como fosfatasas y fitasas. Adicionalmente ha sido reportado la producción de sideróforos, los cuales actúan como quelatos, haciendo así que el fósforo este rápidamente disponible para las plantas (Tomer *et al*., 2016).

Dentro de estos microorganismos, las bacterias del género *Sinorhizobium*, especialmente *Sinorhizobium meliloti*, han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para establecer simbiosis con plantas leguminosas del género *Medicago.* En esta interacción se conoce que la bacteria induce la formación de nódulos radiculares para que ocurra la fijación de nitrógeno atmosférico, contribuyendo así a la fertilidad del suelo y crecimiento vegetal (Gage, 2004).

Adicional a la fijación de nitrógeno, se ha identificado que *S.meliloti* puede influir en la nutrición mineral de las plantas mediante otros mecanismos como lo es la solubilización de fósforo, catalogándola como una rizobacteria promotora del crecimiento vegetal. Diversas cepas de esta especie son capaces de sintetizar ácidos orgánicos como el ácido glucónico y ácido 2-cetoglucónico, facilitando la solubilización de fosfatos minerales mediante la acidificación del ambiente en la rizosfera (Richardson *et al*., 2009), así como de secretar enzimas fosfatasas que mineralizan las fracciones orgánicas de fósforo.

Asi mismo, *S. meliloti* posee una notable plasticidad metabólica que le permite adaptarse a condiciones de limitación nutrimental. Ante una baja disponibilidad de fósforo esta bacteria puede activar el regulón Pho, un sistema de regulación que controla la captación, transporte y movilización de fósforo, así como la expresión de enzimas implicadas en su liberación (Santos- Beneit, 2015). Esta característica adaptativa favorece su sobrevivencia en la rizosfera, además de potenciar su función como rizobacteria promotora de crecimiento.

La interacción entre la solubilización de fósforo y la simbiosis en leguminosas es un aspecto clave para la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas agrícolas. Dado que el fósforo es esencial para la formación y funcionamiento de los nódulos, ya que participa en la producción de ATP necesario para la fijación biológica de nitrógeno. En este sentido, la capacidad de *S. meliloti* de solubilizar el fósforo puede generar un efecto sinérgico en el crecimiento vegetal, mejorando la nutrición de las plantas (Van *et al*., 2003).

Cobra relevancia en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.), considerada la principal leguminosa forrajera a nivel global por su elevado valor nutricional, rendimiento de biomasa y su capacidad de adaptación a diversas condiciones climáticas (Rojas *et al*., 2021). En regiones áridas y semiáridas este cultivo constituye la principal fuente de alimentación en la industria pecuaria, particularmente en los sistemas de producción lechera por su elevado contenido de proteína cruda y palatabilidad (SIAP,2023). No obstante, la sostenibilidad de los sistemas de producción de este cultivo enfrenta retos importantes, tales como la degradación de suelos, salinidad, escasez de agua y una dependencia de fertilizantes y agroquímicos, los cuales

incrementan los costos de producción y generan impactos ambientales adversos a largo plazo (Vance *et al*., 2018)

Con base a lo revisado en literatura, el uso de *S. meliloti* como bioinoculante puede contribuir a la reducción del uso de fertilizantes químicos y promover sistemas agrícolas más sostenibles. Sin embargo, aún existe falta de información de su eficiencia de solubilización en diferentes tipos de suelo, así como su interacción con otro tipo de plantas lo que permite seguir investigando el potencial de esta bacteria.

Materiales y Métodos

2.1 Crecimiento de *Sinorhizobium meliloti* y preparación de inoculante

El crecimiento de la bacteria *S. meliloti* fue llevado a cabo en matraces Erlenmeyer de 125 mL con 20 mL de medio de cultivo YCa (10 mL $CaCl_2$ 0.94 M y 8 g extracto de levadura por litro pH 6.8). Los matraces fueron incubados con agitación a 29°C, 190 rpm durante 48 h. Al término del crecimiento, fueron determinadas UFC/mL para conocer la concentración final del cultivo y poder preparar el inoculante.

Para el inoculante, fue preparada una suspensión con la siguiente composición: 0.85% NaCl y 10% de *S.meliloti* a una concentración de 1.0 x 10^9 UFC/mL. La suspensión es agitada vigorosamente con ayuda de un vortex y se almacena en frascos a temperatura ambiente.

2.2 Prueba de germinación semillas de alfalfa

Para el experimento fueron utilizadas semillas de alfalfa (*Medicago sativa*) variedad Atlixco. La prueba de germinación fue realizada siguiendo la metodología de la International Seed Testing Association (ISTA). En total, 800 semillas fueron evaluadas y divididas en dos tratamientos: 400 semillas sin tratar (control) y 400 semillas inoculadas. Para la inoculación, se siguió la metodología propuesta por Buntić *et al*. (2019), en la cual 0.20 g de semilla (equivalente a 100 semillas aproximadamente) se trataron con 500 uL del inoculante. Las semillas fueron mantenidas en contacto directo con el inóculo durante 1 hora previo al proceso de germinación.

Cada tratamiento contó con 8 repeticiones de 50 semillas, las cuales fueron colocadas sobre papel filtro en cajas Petri de vidrio, humedecidas con agua estéril y fueron mantenidas en oscuridad a 25 °C durante 60 horas.

Transcurrido el tiempo, el porcentaje de germinación fue calculado tomando en cuenta la cantidad de plántulas normales:

$$\textbf{\% Germinación} = \left(\frac{\text{Número total de plántulas normales}}{\text{Número total de semillas sembradas}}\right) \text{x } 100$$

2.3 Bioensayos con plántulas de alfalfa (*Medicago sativa*)

Para la evaluación *in vivo* de la capacidad de solubilización de fósforo de *S.meliloti* fueron desinfectadas y preparadas charolas de crecimiento de 21 cavidades, colocando 3 semillas por cada cavidad y cada charola será tomada como una unidad experimental. Para el sustrato fue utilizado sustrato parental obtenido de Marín Nuevo León, el cual presenta una textura franca arcilla limosa con un pH de 7.98.

En la tabla 1 se describen los tratamientos evaluados.

Tabla 1. Tratamientos por evaluar

Tratamiento	Descripción
T1	Sustrato + semilla sin inocular
T2	Sustrato + semilla inoculada
T3	Sustrato + P insoluble + semilla sin inocular
T4	Sustrato + P insoluble + semilla inoculada
T5	Sustrato + P soluble + semilla sin inocular

S. meliloti fue cultivado y formulado según lo descrito previamente (Sección 2.2), obteniendo un inoculante con una concentración de 1.0 x 10^{7} UFC/mL. La aplicación se realizó mediante tratamiento a la semilla; para esto, fueron inoculados 0.2 g de semilla de alfalfa con 500 uL del inoculante. Esto fue realizado basándose en la según la metodología descrita por Buntić *et al*. (2019), manteniendo las semillas en contacto con el inóculo durante 1 hora antes de su siembra.

Para la siembra, un orificio de alrededor de 3 cm de profundidad fue creado en el centro de cada cavidad utilizando una espátula, depositando 3 semillas por pocillo. Las plantas estuvieron en condiciones controladas con un fotoperiodo de 16 h luz / 8 h oscuridad, a una temperatura de 28 ± 2 °C y una humedad relativa del 60 - 70 %. El riego fue realizado cada 3 días para mantener la humedad constante del sustrato.

A los 14, 28 y 42 días después de la siembra, fueron tomadas por triplicado plántulas de cada tratamiento para medir los siguientes parámetros de crecimiento: altura total de la planta, altura parte aérea, longitud de la raíz, biomasa, contenido de fósforo y valor de pH del sustrato.

2.4 Medición de longitud parte aérea y radicular.

La longitud de la parte aérea fue tomada desde la base del tallo hasta el ápice y la longitud de la raíz desde la base del tallo hasta la punta de la raíz principal. Todas las mediciones fueron realizadas con ayuda de un Vernier.

2.5 Determinación de biomasa

Para la determinación de biomasa, cada plántula se seccionó en dos secciones: parte aérea y parte radicular. Inmediatamente después de la separación fue registrado el peso fresco (PF) de cada fracción en una balanza analítica. Posteriormente, el tejido vegetal se deshidrató en un horno de secado a 70 °C hasta alcanzar peso constante, determinando el peso seco (PS).

2.6 Cuantificación de fosfato parte aérea y raíz.

Con el tejido vegetal previamente secado, este fue macerado con agua bidestilada estéril con ayuda de un mortero y posteriormente centrifugado a 4,000 rpm 15 minutos para hacer la cuantificación de fósforo presente en el sobrenadante mediante una reacción colorimétrica según lo descrito por (Senthilkumar *et al*., 2020). Para esto, 1 mL de sobrenadante fue colocado en un tubo de ensayo junto con 2 mL de Solución A (3.12 g $(NH_4)_2MoO_4$ en 37.5 mL de H2SO4 10 N) y 1 mL de Solución B (0.25 g ANSA en 25 mL de NA_2SO_3 20%) dejando incubar a

temperatura ambiente durante 20 minutos. Terminado el tiempo, la concentración de fósforo fue cuantificada en un espectrofotómetro a 640 nm. Para la determinación, una curva estándar con KH2PO4 fue realizada.

Resultados y discusión

En la etapa anterior, la cepa B9 fue identificada mediante secuenciación del gen 16s como *S.meliloti.* En base a esto, fueron analizadas diferentes condiciones y medios de cultivo que permitieron generar un inoculante para evaluar la capacidad de esta cepa como promotora de crecimiento en alfalfa a través de la solubilización de fósforo.

3.1 Prueba de germinación de semillas

La inoculación con *S. meliloti* incrementó significativamente el porcentaje de germinación de las semillas de alfalfa ($p \leq 0.05$). Las semillas inoculadas alcanzaron un 91.5% de germinación, mientras que las no inoculadas un 87.6% (Figura 1) Este resultado coincide con lo reportado por Asenov *et al.* (2023), quienes observaron un incremento similar en el porcentaje de germinación en semillas de alfalfa tratadas con un inoculante de la misma especie. Dicha respuesta podría estar relacionada con la producción de metabolitos que intervienen en los procesos fisiológicos de la germinación, Fiodor *et al*. (2023) señalan que las bacterias promotoras del crecimiento mejoran este parámetro mediante la síntesis de auxinas.

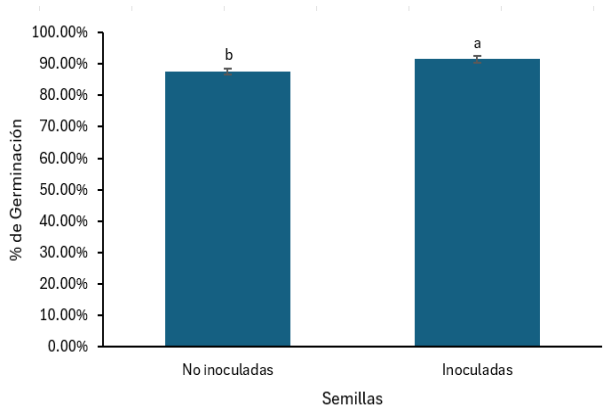


Figura 1. Porcentaje de germinación de semillas de alfalfa.
Letras diferentes indican que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa (Tukey $p < 0.05$.)

3.2 Bioensayos con plántulas de alfalfa (*Medicago sativa*)

El seguimiento de las plántulas de alfalfa a los 14, 28 y 42 días **(**Figura 2) fue llevado a cabo únicamente en los tratamientos viables, ya que el tratamiento T1 no sobrevivió a la fase inicial del ensayo, por lo que fue omitido en los análisis subsecuentes.

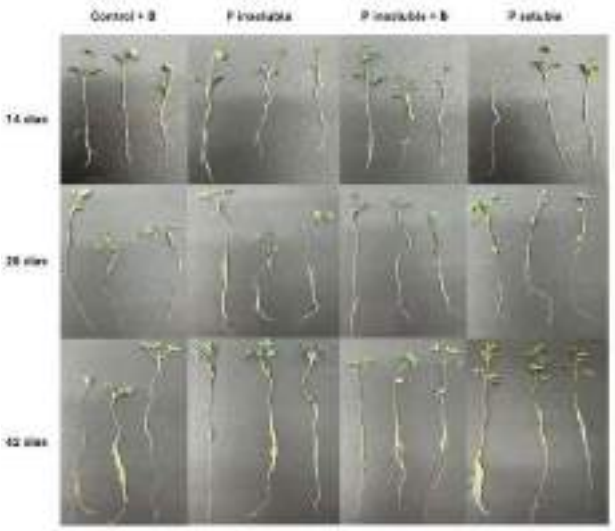


Figura 2. Crecimiento plántulas de alfalfa bajo diferentes tratamientos a lo largo del tiempo.

La diferencia observada en la supervivencia entre los tratamientos T1 y T3 podría atribuirse a la disponibilidad de una pequeña fracción del $Ca_3(PO_4)_2$ añadido al sustrato y los mecanismos de movilización mediados por las raíces. En este sentido, Du *et al.* (2024) observaron una liberación de carboxilatos en alfalfa, bajo condiciones de baja disponibilidad de fósforo, lo que podría haber favorecido al tratamiento con una fuente fosfatada frente al control.

A los 14 días, las plantas presentan una raíz principal visible, pocas ramificaciones y una parte aérea pequeña, observándose variación entre plantas de un mismo tratamiento. Dentro de los 28 días, las plántulas presentan mayor desarrollo en tallo y hojas respecto a lo observado anteriormente y se distinguen algunas raíces laterales más desarrolladas. Mientras que, a los 42 días la ramificación de las raíces y el desarrollo aéreo son más evidentes en algunos tratamientos. A los 42 días, el tratamiento T5 presentó un mayor número de hojas 10 ± 1.25 y fueron observadas ramificaciones en la raíz, lo cual pudiera relacionarse con una mayor disponibilidad de P según lo reportado por Schulze & Drevon, 2005.

Cabe mencionar que para ninguno de los tratamientos donde se inoculó la bacteria se observó la formación de nódulos como lo reportado por Gallegos - Morales *et al. (*2024). La ausencia de esta nodulación podría explicarse por un establecimiento insuficiente de la bacteria en la raíz debido a la compactación del sustrato sobre el desarrollo radical de alfalfa (Yan *et al*., 2024**)**

3.3 Medición longitud parte aérea y radicular

A los 42 días de evaluación (Figura 3.) fueron observadas diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos evaluados en la longitud de la parte aérea. El tratamiento T5 presentó el mayor promedio con 9.97 cm, seguido de T4 con 5.78 cm.

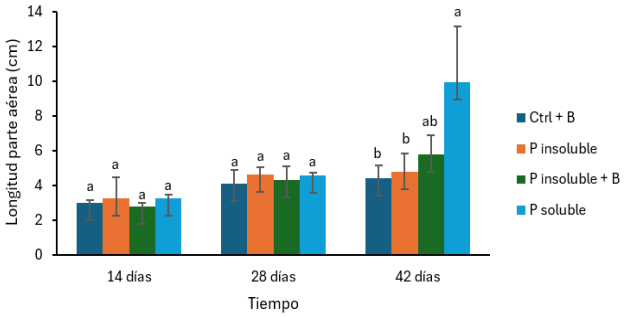


Figura 3. Crecimiento de la parte aérea en plántulas de alfalfa.
Letras diferentes indican que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa (Tukey $p < 0.05$.)

Este resultado sugiere que la respuesta del crecimiento aéreo de la planta fue en una etapa más avanzada del desarrollo ya que a los 14 y 28 días de evaluación no se encontraron diferencias significativas. Que la mayor longitud observada sea en el tratamiento T5 podría estar relacionada con la disponibilidad del fósforo para las plantas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Tian *et al*. 2025, quienes reportan que la fertilización fosfatada favoreció la altura de *Medicago sativa*.

Para el caso de la longitud de la raíz principal (Figura 4), los valores obtenidos dentro de los tratamientos rondan de 8.85 a 14.05 cm, sin embargo, no fueron encontradas diferencias significativas bajo las condiciones evaluadas. Aunque se observa variación en las raíces, se deben

considerar características adicionales a la longitud de la raíz principal como el grosor y exudados ya que, según lo reportado por Fan *et al*., 2025, las diferencias en la eficiencia de utilización de fósforo están estrechamente relacionadas con estas características.

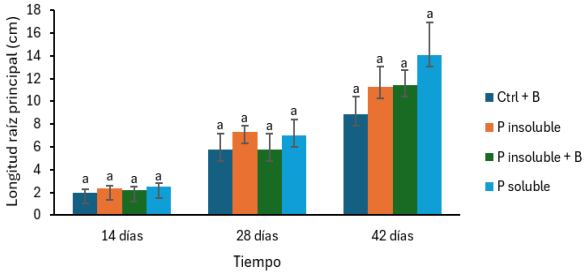


Figura 4. Crecimiento de raíz principal en plántulas de alfalfa.
Letras iguales indican que la diferencia entre las medias no es estadísticamente significativa.

3.4 Determinación de biomasa aérea y raíz

A los 14 días de evaluación (Figura 5), la medición de biomasa aérea presenta diferencias significativas entre los tratamientos.

El tratamiento T4 registro el valor más alto con 0.0289 g. Por su parte, los tratamientos T3 y T5 no presentan diferencias entre sí, pero superaron al tratamiento T2. En los días siguientes de evaluación (28 y 42 días) no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

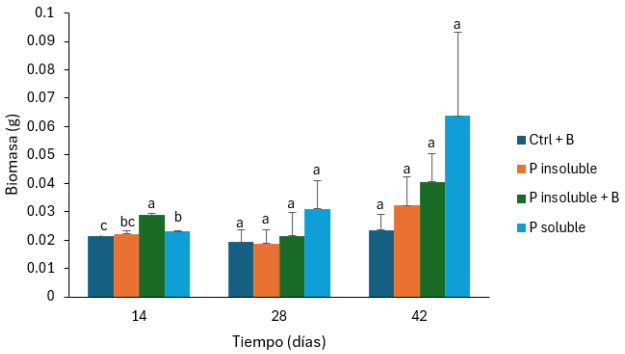


Figura 5. Biomasa parte aérea en plántulas de alfalfa.
Letras diferentes indican que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa (Tukey p < 0.05.)

Respecto a la biomasa de la raíz a los 14 días (Figura 6) el tratamiento T2 presenta valores significativamente inferiores en comparación con los tratamientos con adición de fósforo, sugiriendo una relación positiva de este nutriente en el crecimiento de alfalfa (He *et al*.,2020). Sin embargo, en las mediciones subsecuentes, no se encontraron diferencias significativas en la medición de este parámetro.

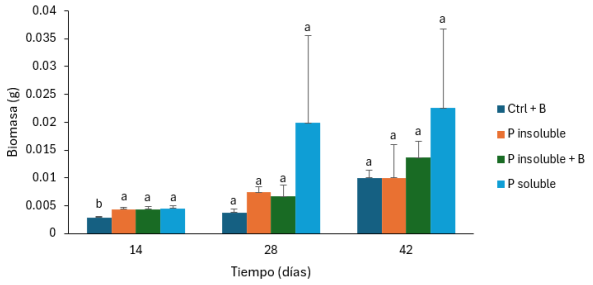


Figura 6. Biomasa de la raíz en plántulas de alfalfa.
Letras diferentes indican que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa (Tukey p < 0.05.)

3.5 Cuantificación de fosfato parte aérea y raíz

La evaluación conjunta de la concentración de fosfato en parte aérea y raíces mostró respuestas distintas entre cada órgano (Figura 7). A los 14 días, el tratamiento T4 presentó una mayor concentración de

fosfato en raíces que el tratamiento T2 Y T3, sin embargo, registro la menor concentración en la parte aérea.

Este contraste puede sugerir que la concentración en cada tejido resulta del balance entre como la planta adquiere, transporta y utiliza el nutriente, dependiendo de los procesos en el desarrollo vegetal (Shen *et al*., 2011)

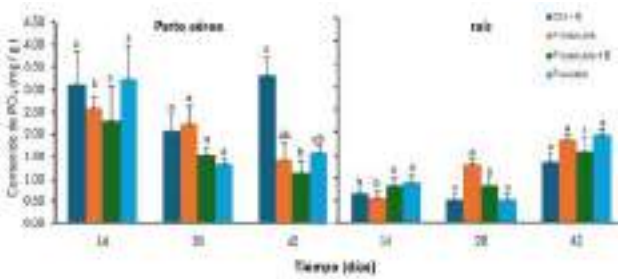


Figura 7. Concentración de fosfato en parte aérea y raíz.
Letras diferentes indican que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa (Tukey p < 0.05.)

3.6 pH del suelo

Respecto a las mediciones de pH del suelo, a los 14 días no hubo diferencias significativas (Figura 8). Sin embargo, a los 28 y 42 días del experimento el tratamiento T2 presentó un valor de pH significativamente (p≤0.05) menor al de los otros tratamientos lo que podría relacionarse con una actividad conjunta de raíces y microorganismos bajo una ausencia de una fuente de P externa (Hinsinger *et al*., 2003)

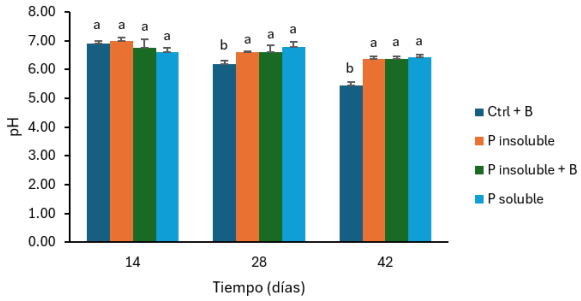


Figura 8. Valores de pH del suelo de plántulas de alfalfa.
Letras diferentes indican que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa (Tukey p < 0.05.)

Conclusiones

La inoculación de *Sinorhizobium meliloti* incrementó significativamente la germinación de alfalfa del 87.6% al 91.5%. No obstante, bajo las condiciones y tratamientos evaluados, las respuestas de crecimiento no se mantuvieron de forma sostenible a lo largo del tiempo, ya que no se observaron diferencias significativas en las evaluaciones posteriores. Además, no se registró la formación de nódulos en los tratamientos con semilla inoculada. Por lo anterior, serán realizados ensayos adicionales bajo otras condiciones para confirmar el aporte de esta bacteria en la movilización de fósforo y consolidar su potencial como bioinoculante.

Agradecimientos

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada.

Referencias Bibliográficas

Alzate Zuluaga, M. Y., Martinez de Oliveira, A. L., Valentinuzzi, F., Tiziani, R., Pii, Y., Mimmo, T., & Cesco, S.

(2021). Can inoculation with the bacterial biostimulant Enterobacter sp. strain 15S be an approach for the smarter P fertilization of maize and cucumber plants?. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 719873.

Asenov, A., Sadykova, D., Kunakbayev, A., Iliyaskyzy, M., & Rizbekova, A. (2023). Enhancing alfalfa productivity with tuber: Associated and cellulolytic bacteria in the Aral Sea region. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 18*(4), 885–892. https://doi.org/10.18280/ijdne.180415

Ateş, Ö. (2023). Phosphate solubilizing bacteria isolation medium: rock phosphate or tricalcium phosphate?. *Geomicrobiology Journal*, *40*(8-10), 751-755.

Awasthi, R., Tewari, R., & Nayyar, H. (2011). Synergy between plants and P-solubilizing microbes in soils: effects on growth and physiology of crops. *International Research Journal of Microbiology*, *2*(12), 484-503.

Bashan, Y., Kamnev, A. A., & de-Bashan, L. E. (2013). Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth: a proposal for an alternative procedure. *Biology and fertility of soils*, *49*(4), 465-479.

Buntić, A. V., Stajković-Srbinović, O., Knežević, M. M., Kuzmanović, Đ., Rasulić, N., & Delić, D. (2019). Development of liquid rhizobial inoculants and pre-inoculation of alfalfa seeds. *Archives of Biological Sciences*, *71*(2), 379–387. https://doi.org/10.2298/ABS181008062B

Cao, Y., Miller, S. S., Dornbusch, M. R., Castle, S. S., Lenz, P., Ferguson, J., ... & Samac, D. A. (2018). Widespread occurrence of Sinorhizobium meliloti strains with a type IV secretion system. Symbiosis, 75(2), 81-91.

Collavino, M. M., Sansberro, P. A., Mroginski, L. A., & Aguilar, O. M. (2010). Comparison of in vitro solubilization activity of diverse phosphate-solubilizing bacteria native to acid soil and their ability to promote Phaseolus vulgaris growth. *Biology and fertility of soils*, *46*(7), 727-738.

del Rosario Rodicio, M., & del Carmen Mendoza, M. (2004). Identificación bacteriana mediante secuenciación del ARNr 16S: fundamento, metodología y aplicaciones en microbiología clínica. *Enfermedades infecciosas y microbiología clínica*, *22*(4), 238-245.

Du, T., Zhao, S., Zheng, X., Ding, X., He, H., Xie, G., Zhu, J., Kou, Y., & Shen, W. (2024). External phosphorus enhances the efficient acquisition of phosphorus by alfalfa (*Medicago sativa* L.) through its interaction with root morphological traits and rhizosphere carboxylates. *Rhizosphere, 29*, 100861. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100861

Elhaissoufi, W., Ghoulam, C., Barakat, A., Zeroual, Y., & Bargaz, A. (2022).

Phosphate bacterial solubilization: A key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. *Journal of Advanced Research*, *38*,13.

Gage, D. J. (2004). Infection and invasion of roots by symbiotic, nitrogen-fixing rhizobia during nodulation of temperate legumes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews, 68*(2), 280–300. https://doi.org/10.1128/MMBR.68.2.280-300.2004

Galleguillos, C., Aguirre, C., Barea, J. M., & Azcón, R. (2000). Growth promoting effect of two Sinorhizobium meliloti strains (a wild type and its genetically modified derivative) on a non-legume plant species in specific interaction with two arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Science*, *159*(1), 57-63.

He, H., Wu, M., Guo, L., Fan, C., Zhang, Z., Su, R., Peng, Q., Pang, J., & Lambers, H. (2020). Release of tartrate as a major carboxylate by alfalfa (*Medicago sativa* L.) under phosphorus deficiency and the effect of soil nitrogen supply. Plant and Soil, 449, 169–178. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04481-9

Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., & Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. Plant and Soil, 248, 43–59. https://doi.org/10.1023/A:1022371130939

Ibarra-Galeana, J.A., Castro-Martínez, C., Fierro-Coronado, R.A. *et al.* (2017) Characterization of phosphate-solubilizing bacteria exhibiting the potential for growth promotion and phosphorus nutrition improvement in maize (*Zea mays* L.) in calcareous soils of Sinaloa, Mexico. *Ann Microbiol* 67, 801–811 . https://doi.org/10.1007/s13213-017-1308-9

Iyer, B., & Rajkumar, S. (2019). Succinate irrepressible periplasmic glucose dehydrogenase of Rhizobium sp. Td3 and SN1 contributes to its phosphate solubilization ability. *Archives of microbiology*, *201*(5), 649-659.

Manzano-Gómez, L. A., Rincón-Rosales, R., Flores-Felix, J. D., Gen-Jimenez, A., Ruíz-Valdiviezo, V. M., Ventura-Canseco, L. M. C., Rincón-Molina, F. A., Villalobos-Maldonado, J. J., & Rincón-Molina, C. I. (2023). Cost-Effective Cultivation of Native PGPB Sinorhizobium Strains in a Homemade Bioreactor for Enhanced Plant Growth. Bioengineering, 10(8), 960. https://doi.org/10.3390/bioengineering10080960

Mao, C., Evans, C., Jensen, R. V., & Sobral, B. W. (2008). Identification of new genes in Sinorhizobium meliloti using the Genome Sequencer FLX system. BMC microbiology, 8(1), 72.

Mengesha, A. S., & Legesse, N. H. (2024). Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of lentil (Lens culinaris M.) collected from Hagere Mariam district, Central

Ethiopia. *Plos one*, *19*(11), e0308915.

Mengoni, A., Bazzicalupo, M., Giuntini, E., Pini, F., & Biondi, E. G. (2013). Genomic and functional diversity of the Sinorhizobial model group. In Symbiotic Endophytes (pp. 69-85). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil, 321*, 305–339. https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2

Rojas, M., Sánchez, E., & Morales, J**.** (2021). Importancia económica y alimentaria de *Medicago sativa* en los sistemas ganaderos contemporáneos. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(4), 1012-1030.

Sánchez-Contreras, M., Lloret, J., Martín, M., Villacieros, M., Bonilla, I., & Rivilla, R. (2000). PCR use of highly conserved DNA regions for identification of Sinorhizobium meliloti. Applied and environmental microbiology, 66(8), 3621-3623.

Santos-Beneit, F. (2015). The Pho regulon: A huge regulatory network in bacteria. *Frontiers in Microbiology, 6*, 402. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00402

Santos-Beneit, F. (2015). The Pho regulon: A huge regulatory network in bacteria. *Frontiers in Microbiology, 6*, 402. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00402

Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., ... & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant physiology*, *156*(3), 997-1005.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), México.

Soliman, E. R., Ali, A. M., & Hamada, M. A. (2025). Characterization of Phosphate-Solubilizing Pseudomonas lurida OR400772, and Potential Application in Tricalcium Phosphate Contaminated Soil to Alter Vicia faba Growth, and Gene Expression Patterns. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *25*(3), 7890-7908.

Tian, J., Wan, W., Liu, Q., Zhao, B., & Li, H. (2025). Response of alfalfa growth and rhizosphere properties to soil phosphorus supply and mowing in a salt-affected soil. *Frontiers in Plant Science, 16*, 1565162. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565162

Tomer S, Suyal DC, Goel R (2016) Biofertilizers: a timely approach for sustainable agriculture. In: Choudhary D, Varma A, Tuteja N. Plant-microbe interaction: an approach to sustainable agriculture. Springer, Singapore, pp 375–395. https://doi.org/10.1007/978-98110-2854-0_17

Vance, C. P., Graham, P. H., & Allan, D. L**.** (2018). Biological nitrogen fixation: Phosphorus a critical limiting factor. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1289.

Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist, 157*(3), 423–447. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x

Yan, M., Yang, D., He, Y., Ma, Y., Zhang, X., Wang, Q., & Gao, J. (2024). Alfalfa responses to intensive soil compaction: Effects on plant and root growth, phytohormones and internal gene expression. *Plants, 13*(7), 953. https://doi.org/10.3390/plants13070953

Producción de ficocianobilina de *Synechocystis sp.* en sistemas recombinantes: Expresión en el sistema eucariota *Nicotiana benthamiana*

Luis Ángel García-Palomino[1*]; Sugey R. Sinagawa-García[1]; Celestino García-Gómez[1]; Shimizu Keiich[2]; Edward A. Espinoza-Sánchez[3].
[1]Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2]園芸生産学研究室(Laboratorio de Ciencias de la Producción Hortícola) Campus Korimoto de la Universidad de Kagoshima, Edificio A de la Facultad de Agricultura. 1 Chome-21-24 Korimoto, Kagoshima, 890-0065, Japón.
[3]Laboratorio de Biotecnología I, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Circuito 1, Nuevo Campus Universitario, Chihuahua, Chih. C.P. 31125, México.
*Email: luis.garciapa@uanl.edu.mx

Resumen. La ficocianobilina (PCB) es un cromóforo tetrapirrólico con aplicaciones potenciales en los campos biotecnológico y biomédico. Su biosíntesis comprende dos etapas enzimáticas principales. El objetivo de este trabajo fue diseñar y evaluar preliminarmente construcciones genéticas para la expresión transitoria de los genes *ho1* y *pcyA* de *Synechocystis* sp. en el sistema vegetal *Nicotiana benthamiana*. Para ello, se diseñaron los vectores pKAN43Ag8-ho1 y pKAN43Ag8-pcyA utilizando como base el vector pKAN43Ag8-GFP. Las construcciones se introdujeron en *Agrobacterium tumefaciens* para su propagación y posterior evaluación. La caracterización mediante PCR de colonia presentó señales intensas que confirmo la identidad de los productos amplificados. Asimismo, se realizaron ensayos de agroinfiltración en hojas de *N. benthamiana* y se analizaron extractos foliares obtenidos con metanol al 80 %. Las muestras presentaron fluorescencia rosa-rojiza bajo luz ultravioleta, aunque esta señal también se observó en los controles y su intensidad varió con la concentración del amortiguador Tris. En conjunto, los resultados representan avances en el diseño experimental y en la evaluación del sistema vegetal; sin embargo, se requieren análisis moleculares y químicos adicionales para determinar si existe producción de PCB recombinante.
Palabras clave: ficocianobilina, *Nicotiana benthamiana*, agroinfiltración, expresión recombinante.

Abstract. Phycocyanobiline (PCB) is a tetrapyrrolic chromophore with potential applications in the biotechnological and biomedical fields. Its biosynthesis comprises two main enzymatic steps. The objective of this work was to design and preliminarily evaluate genetic constructs for the transient expression of the *ho1* and *pcyA genes* of *Synechocystis* sp. in the plant system *Nicotiana benthamiana*. To this end, the vectors pKAN43Ag8-ho1 and pKAN43Ag8-pcyA were designed using the pKAN43Ag8-GFP vector as a base. The constructs were introduced into *Agrobacterium tumefaciens* for propagation and subsequent evaluation. Colony PCR characterization showed strong signals that confirmed the identity of the amplified products. Likewise, agroinfiltration assays were performed on N*. benthamiana* leaves and leaf extracts obtained with 80% methanol were analyzed. The samples showed reddish-pink fluorescence under ultraviolet light, although this signal was also observed in the controls and its intensity varied with the concentration of the Tris buffer. Overall, the results represent advances in the experimental design and in the evaluation of the plant

system; however, additional molecular and chemical analyses are required to determine if there is recombinant PCB production.
Keywords: phycocyanobilin, *Nicotiana benthamiana*, agroinfiltration, recombinant expression.

Introducción

Las ficobiliproteínas (PBP) como la ficocianina y la aloficocianina presentes en cianobacterias y algas verde-azuladas tienen propiedades fluorescentes y funcionales que las hacen muy atractivas para la industria biomédica y de alimentos. La biosíntesis de PBP y otras ficobilinas se derivan de una vía alternativa de degradación del grupo hemo, catalizada por las enzimas hemo oxigenasa 1 (Ho1) y ficocianobilina oxidorreductasa (PcyA) (Esclapez *et al*., 2024). La ficocianina está compuesta por subunidades α y β, con cromóforos unidos que le confieren su color azul y capacidad de absorción de luz. La preservación de su estructura, especialmente la subunidad α, es crucial para mantener sus propiedades biológicas (Choi and Lee 2018), como sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y hepatoprotectoras (Grover *et al*., 2021).

La ficocianina tiene un amplio espectro de uso, en la industria alimentaria, se utiliza como colorante natural y suplemento dietético. En la industria farmacéutica, se investiga su potencial en el tratamiento de enfermedades como el cáncer, la diabetes y enfermedades neurodegenerativas, gracias a sus efectos antiinflamatorios, antineoplásicos y neuroprotectores. En la industria cosmética, se emplea en productos para el cuidado de la piel por sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas, (Fernandes *et al*., 2023).

En este sentido, la creciente demanda de compuestos naturales y la necesidad de reemplazar los compuestos sintéticos han impulsado la optimización de los métodos de producción, extracción y purificación, asegurando la estabilidad y eficacia en diversas aplicaciones (Correa *et al*., 2021). Se ha reportado varios métodos de extracción de la ficocianina, incluyendo, ciclos de congelación/descongelación, la homogeneización, extracción con ultrasonido y campos eléctricos (Jaeschke *et al*., 2021). Cada método tiene sus ventajas y limitaciones en términos de eficiencia, costo, tiempo y pureza del producto final.

Además, la estructura de la ficocianina es sensible a cambios en la luz, temperatura, pH y solventes de extracción/purificación, lo que puede afectar su estabilidad y rendimiento. La exposición a la luz puede degradar la ficocianina, también tiene una estabilidad de hasta 45°C (Wu *et al*., 2016), en cuanto al pH es más estable en un rango de pH entre 5.5 y 7.0 (Vali *et al*., 2015), la elección del solvente afecta su solubilidad y estabilidad. La relación biomasa/solvente, una mayor proporción de biomasa/solvente puede aumentar el rendimiento de extracción, pero puede reducir la pureza de la ficocianina (Tavanandi *et al*., 2020). La adición de preservativos como azucares, ácido cítrico y polímeros naturales puede aumentar su estabilidad (Jaeschke *et al*., 2021). Todos estos factores deben ser cuidadosamente

controlados para maximizar su estabilidad y la funcionalidad en diversas aplicaciones. Por lo que la extracción tradicional de ficocianina nativa enfrenta desafíos en términos de rendimiento y pureza, lo que podría justificar la exploración de métodos alternativos como la producción en sistemas recombinantes.

En las cianobacterias o en las rodofitas en general la biosíntesis de ficocianobilinas (PCB) o de cualquier otra ficobilina (PBs) derivan de una ruta alterna de degradación del anillo heme la cual consiste en 2 pasos enzimáticos catalizadas por los genes Ho1 y posteriormente por pcyA (Ma, C. *et al*. 2020). El primer paso es la reducción de los grupos hemo a bilivedrin IXa por la presencia de oxígeno diatómico por la Ho1. Este primer paso es el común en todas las vías derivadas de la escisión del anillo hemo, liberando moléculas de monóxido de carbono y Fe^{+2} en el proceso (Figura 1a), abarcando tanto los relacionados con la formación de todos los PB como la vía puramente degradativa que procede (PcyA), la cual reduce el BV a PCB, pasando por el 181,182-dihidrobiliverdina (DHBV) como compuesto intermediario (Figura 1b). Tanto *Ho1* como *pcyA* son enzimas dependientes de ferredoxina, y los electrones necesarios en cada paso son suministrados por una ferredoxina-NADP+ reductasa (FNR), por lo que la biosíntesis depende en gran medida de la disponibilidad de energía reductora (NADPH) en la célula (Esclapez, J, *et al*. 2024).

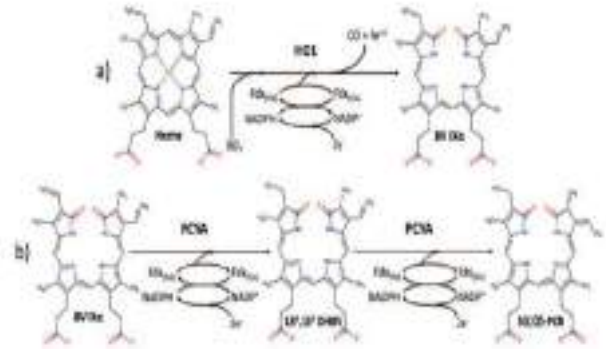


Figura 1. Esquema de los dos pasos enzimáticos y las enzimas relacionadas involucradas en la biosíntesis de PCB (ficocianobilina) a partir del hemo. a) Producción de BV IXα (biliverdina) en el primer remojo enzimático por la hemo oxigenasa (Ho1). (b) Producción de PCB en el segundo remojo enzimático por ficoianobilina: ferredoxina oxidorreductasa (PcyA). Sacado de Esclapez, J, *et al*. (2024).

La expresión simultanea de los genes *ho1* y *pcyA* de *Synechocystis sp. PCC 6803* se intenta para reconstituir esta vía en un sistema heterólogo eucariota. Como modelo se seleccionó a *Nicotiana benthamiana*, una planta ampliamente utilizada para la expresión transitoria de proteínas y la reconstrucción de rutas metabólicas heterólogas. La agroinfiltración consiste en introducir una suspensión de *Agrobacterium tumefaciens* portadora de un vector binario en los espacios intercelulares de las hojas. La bacteria transfiere el plásmido T-DNA que contiene el cassette de expresión a las células vegetales, donde se expresan temporalmente de los genes de interés, sin la necesidad de generar previamente líneas transgénicas estables (Reed y Osbourn, 2018; Norkunas *et al*., 2018).

Este sistema resulta útil porque permite evaluar construcciones génicas en pocos días y facilita la expresión de varios genes, ya sea mediante la coinfiltración de cepas que porten construcciones distintas o

mediante vectores multigénicos. Además, el tejido vegetal ofrece compartimentos celulares y redes metabólicas que pueden aprovecharse para dirigir enzimas a regiones específicas (Reed y Osbourn, 2018).

Para favorecer la localización subcelular de las enzimas, los vectores pKAN43Ag8-*ho1* y pKAN43Ag8-*pcyA* se diseñaron a partir del esqueleto pKAN43Ag8-GFP. Los cassettes incluyen el promotor constitutivo 4×CaMV35S y una secuencia de tránsito cloroplástico (AtrbcTP+23), propuesta para dirigir Ho1 y PcyA hacia el estroma de los cloroplastos (Norkunas *et al*., 2018).

Esta estrategia busca acercar las enzimas al metabolismo plastidial de los tetrapirroles y facilitar su acceso al sustrato; no obstante, la localización y la actividad funcional deben verificarse empiricamente.

Los objetivos de esta etapa fueron diseñar y generar los vectores de expresión para *ho1* y *pcyA* y evaluar la funcionalidad en los extractos foliares obtenidos después de su agroinfiltración en N. benthamiana. Esto último representa mi trabajo durante la estancia en la universidad de Kagoshima.

La hipótesis que se planteo fue que la expresión transitoria de ambos genes permitiría reconstituir la ruta biosintética hacia PCB en las hojas de *N. benthamiana*.

Materiales y Métodos

Material biológico

Para el mantenimiento y la propagación de los plásmidos pKAN43Ag8_Ho1 y pKAN43Ag8_PcyA se utilizó la cepa de *E. coli* DH5α, mientras que para la expresión se uso *Agrobacterium tumefaciens* para expresar los genes *Ho1* y *pcyA* de *Synechocystis sp.* en plantas de *Nicotiana Benthamiana*.

Selección del vector y genes de interés

El vector de expresión binario pKAN43Ag8-GFP (#178182) fue seleccionado debido a que es ampliamente utilizado en la biotecnología vegetal para la transformación mediada por *Agrobacterium tumefaciens*. Este constructo molecular está diseñado para una expresión constitutiva fuerte gracias a la inclusión de un promotor 35S mejorado del virus del mosaico de la coliflor (CaMV), el cual conduce la transcripción del gen reportero de la proteína verde fluorescente mejorada (EGFP). Asimismo, el casete de expresión integra un gen de resistencia a la kanamicina como marcador de selección en plantas, facilitando la identificación de líneas celulares exitosamente transformadas en medios selectivos. Debido a su versatilidad como esqueleto de clonación, pKAN43Ag8-GFP ha sido empleado con éxito en la modificación genética y el análisis funcional de rasgos fenotípicos (como la coloración floral o la biosíntesis de compuestos) en sistemas modelo que incluyen a *Ipomoea nil* (gloria de la mañana) y cultivares de tomate 'Micro-Tom' (Shimizu, 2021).

Para la síntesis de ficocianobilina, solo dos genes de la ruta biosintética fueron selecconados: ho1 y pcya como suficientes. El gene ho1 codifica para la hemo oxigenasa 1 (Ho1) mientras que el gen pcya codifica para la ficocianobilina:ferredoxina oxidoreductasa (PCYA). Las secuencias de

ambos genes fueron obtenidas de *Synechocystis sp*. PCC 6714. Las secuencias génicas para Ho1 y pcyA se obtuvieron de la base de datos NCBI GenBank (accesiones CP007542.1 y CP007543.1). *(NCBI, 2025)*. Las secuencias nativas fueron optimizadas utilizando la herramienta GenSmartTM de SnapGene® (versión 1.1.3) [Software]. snapgene.com

Diseño *in silico* de los vectores para *Nicotiana Benthamiana y preparación del cultivo*

Para el diseño del vector pKAN43Ag8_Ho1 de *N. benthamianai*. se obtuvo el gen *ho1* a partir del plasmido pUC57-Ho1 digerido con la enzima Xhol y el fragmento producido se clono en los sitios Ascl/Nsil del vector base pKAN43Ag8-GFP previamente digerido. El vector resultante estará bajo el control de promotor transcripcional del virus del mosaico 4xCaMV35S para lograr una expresión génica alta, el péptido de Tránsito de Direccionamiento Cloroplástico (AtrbcTP+23), que es crucial dado que la biosíntesis de hemo (sustrato de Ho1) ocurre en los plastidios de la planta, este péptido redirige las proteínas recombinantes Ho1 y PcyA hacia el estroma del cloroplasto justo después de ser traducidas en el citoplasma.

Para formar el vector pKAN43Ag8_PcyA se siguió el mismo procedimiento.

Para los cultivos de *N. benthamiana* se preparó una bandeja de cultivo con ocho cavidades. Se añadió sustrato previamente humedecido a cada cavidad y se colocaron las semillas con la yema de los dedos. Se reviso el cultivo semanalmente y se trasplantaron las plántulas a recipientes mayores cuando alcanzaran aproximadamente cuatro semanas de crecimiento.

Ensamblado de NEBuilder y clonación en *E. coli (DH5a)*

Para el ensamblado NEBuilder se utilizó el vector base pKAN43Ag8-GFP ya digerido con las enzimas Ascl y Nsil y los insertos ho1 o pcyA obtenidos de los vectores comerciales pUC57. Se tomo la proporción vector:inserto de 1:3 y se prepararon tubos con 1 µL de vector y 3 µL de uno de los insertos. A cada reacción se añadieron 2 µL de buffer NEBuilder y 2 µL de la mezcla de ADN; el ensamblaje se incubó a 50 °C durante una hora y luego a 4 °C durante 10 minutos en un termociclador.

Para la transformación de E. coli se mezclaron 20 µL de células competentes con 1 µL de producto de ensamblaje. Se aplicó un choque térmico a 42 °C durante 45 segundos, seguido de enfriamiento inmediato en hielo. Después se añadieron 180 µL de medio SOC y las células se recuperaron durante una hora a 37 °C y 235 rpm. Finalmente, se sembró el cultivo en placas LB con el antibiótico Carbenicilina (CB) y se incubó a 37 °C durante la noche.

PCR de colonia y Caracterización por Electroforesis

Para el PCR de colonia se preparó una mezcla maestra con agua extra purificada, Emerald Amp y los primers mini35SFver2 y HSPTR seq R. Se distribuyeron 10 µL de mezcla en ocho tubos de PCR. En condiciones de trabajo estériles se seleccionaron cuatro colonias de la placa de ho1 y cuatro de la placa de pcyA, procurando que estuvieran separadas; se

tocó cada colonia con una punta y se transfirió una pequeña cantidad al tubo correspondiente.

La PCR se llevó a cabo en un termociclador durante 30 ciclos con las siguientes temperaturas y tiempos: 98 °C por 10 segundos, 60 °C por 30 segundos y 72 °C por un minuto. Para visualizar los productos se preparó un gel de agarosa al 2 % en 100 mL, se vertió dentro de la cámara y se esperó a que solidificara, en el gel se cargaron 5 µL de ladder y de cada muestra y se corrió en TAE al 1 % durante 25 minutos a 100 W. Después se tiñó el gel con Red Dye durante 10 minutos y se observó en un transiluminador UV.

Extracción de adn con kit miniprep Y Secuenciación de los ADN extraídos de la PCR de colonia.

La extracción de ADN plasmídico se realizó utilizando el kit Monarch® Spin Plasmid Miniprep Kit (New England Biolabs, Ipswich, MA, USA), siguiendo las instrucciones del fabricante. La concentración y pureza del ADN obtenido se determinaron mediante espectrofotometría en un equipo NanoDrop™ 2000 (Thermo Fisher Scientific, Wilmington, DE, USA), considerando como criterio de pureza una relación de absorbancia Abs 260/Abs 280 entre 1.8 y 2.0.

Después de recuperar las colonias que mostraron bandas compatibles con la presencia del plásmido, se inocularon ocho tubos con 6 mL de LB y 10 µL del antibiótico CB. Los cultivos se incubaron aproximadamente por 16 horas a 37 °C y 230 rpm. Para la extracción, se tomó una alícuota de 2 mL de cada cultivo, se centrifugó para recuperar el pellet y se aplicaron sucesivamente los buffers de resuspensión (A1), lisis (A2) y neutralización (A3). Tras centrifugar, el sobrenadante se cargó en columnas, se lavó con buffer AQ y el ADN se eluyó con 50 µL de buffer AE precalentado a 70 °C. Las muestras se midieron en NanoDrop y se conservaron en frío para secuenciación.

Los plásmidos se secuenciaron mediante la técnica de Sanger mediante tubos de PCR con una mezcla de 6.4 µL de primer y 3.6 µL de agua extra purificada (EPW), para un volumen final de 10 µL y una concentración pretendida de 10 pmol/µL. Para cada muestra se prepararon tubos separados con mezclas del plásmido y el primer forward o el primer reverse.

Transformación de *Agrobacterium*

Se usó el método de electroporación para transformar a las células de *Agrobacterium* con los vectores de ADN correspondientes a ho1 o pcyA. Para esto se transfirieron 20 µL de células a tubos nuevos y se añadió 1 µL de ADN a cada reacción. Las mezclas se pasaron a cubetas de electroporación y se aplicó un pulso de 1600 W por 1 segundo.

Después del pulso, las células se recuperaron, de la cubeta de electroporación, con 180 µL de LB con los antibióticos gentamicin (100 mg/L) y carbenicillin (100 mg/L) y se transfirieron a tubos nuevos donde se incubaron por una hora a 28 °C con agitación. Se sembraron 200 µL en placas LB con los antibióticos y se incubaron a 28 °C durante tres días.

Cuando el cultivo creció lo suficiente se Re suspende la *Agrobacterium* añadiendo 1 mL de buffer de infiltración (10 mM MES y 10 mM MgCl, esterilizada y ajustada a pH 5.6) con acetosiringona (100 mM), en dilución 1 a 1000, a las placas. Para revisar la

concentración se preparó una dilución con 4 µL de suspensión concentrada y 16 µL de buffer en tubos estériles y se hizo una lectura en NanoDrop. Se seleccionaron seis plantas del invernadero.

Las suspensiones con Ho1 y pcyA se combinaron en una placa y la del control se mantuvo aislada en otra y se inyectaron las hojas usando una jeringa sin la aguja por el envés. Al presionar suavemente la jeringa contra la superficie foliar, el líquido se introdujo en los espacios intercelulares del tejido y se dejan las plantas a temperatura ambiente y luz por 7 días.

Extracción de compuestos solubles del tejido foliar de *N. Benthamiana*

Después de 7 días de infiltración se recolectó tejido de *N. benthamiana* y se maceraron en frio 15 mg de hoja en un mortero de porcelana a -4°C con 1 mL de metanol al 80%. El extracto se transfirió a tubos de 1.5 mL y se centrifugó durante tres minutos a 18,000 g. Los tubos se protegieron con papel aluminio. Se prepararon 3 tubos de eppendorf a 3 diferentes concentraciones de Tris de 100, 50 y 10 (mM) para las muestras y el control positivo pKAN43Ag8-GFP.

Resultado y discusión

***Diseño in silico* de las secuencias y mutaciones silenciosas**

Las secuencias de los genes *ho1 (*723 pb) y *pcya* (747 pb), fueron analizadas mediante SnapGene® (versión 1.1.3) [Software]. snapgene.com. y sometidas a eliminación de sitios de restricción no deseados (Figura 2 y 3) que fueron identificados usando el software bioinformático Stothard P (2000). Este tipo de optimización es congruente con las estrategias reportadas en Khlebodarova *et al*., (2024) para sistemas de expresión recombinante, donde el ajuste de codones, el diseño del cassette de expresión y la selección del hospedero son determinantes para aumentar la eficiencia de producción de proteínas heterólogas.

Para la secuencia Ho1 en los extremos start y end se añadieron enzimas específicas que permiten cortar el fragmento e insertarlo limpiamente en el vector de destino.

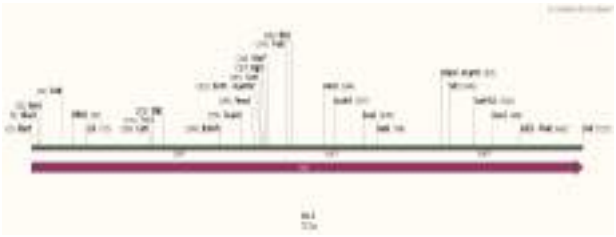


Figura 2. Esquema del gen Ho1 en el constructo

Para la secuencia pcyA se realizó la optimización de la misma forma.

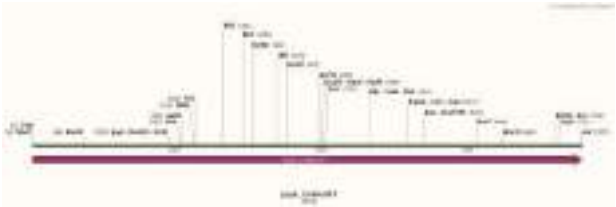


Figura 3. Esquema del gen pcyA en el constructo

Diseño *in silico* de los vectores de expresión en *Nicotiana benthamiana*

Para la reconstitución heteróloga de la vía biosintética de la ficocianobilina (PCB) en sistemas vegetales, se utilizaron los vectores de expresión transitoria pKAN43Ag8-Ho1 (11,246 pb) y pKAN43Ag8-PcyA (11,270 pb). Ambos plásmidos fueron diseñados empleando como esqueleto (backbone) el vector pKAN43Ag8-GFP, el cual incorpora un casete de replicación dual compuesto por el origen ori para el mantenimiento en *Escherichia coli* y el sistema de amplio

rango de huéspedes pVS1 (oriV, RepA y staA) para garantizar un óptimo número de copias y estabilidad segregacional en *Agrobacterium tumefaciens*. La selección bacteriana de las construcciones se llevó a cabo mediante el marcador de resistencia a la ampicilina (AmpR) bajo el control de su promotor homólogo. Para la delimitación del fragmento de transferencia al genoma vegetal, el vector posee las secuencias repetidas de los bordes izquierdo (LB T-DNA repeat) y derecho (RB T-DNA repeat), flanqueando un casete de selección para la planta que codifica la resistencia a kanamicina/neomicina (NeoR/KanR) conducido por el promotor de la nopalina sintasa (NOS promoter) y la región no traducida AtAGP21 5'UTR. (Figura 4 y 5).

La expresión transcripcional de los genes quiméricos ho1 (hemo oxigenasa 1) y pcyA (filocianobilina:ferredoxina oxidorreducción) de Synechocystis sp. PCC 6714 fue dirigida de forma constitutiva por el promotor fuerte 4xCaMV35S, el cual contiene cuatro copias del potenciador transcripcional del virus del mosaico de la coliflor acopladas a un promotor mínimo. Con el propósito de canalizar el flujo metabólico de manera eficiente, ambos genes se fusionaron en su extremo 5' a la secuencia del péptido de tránsito cloroplástico AtrbcTP+23 (derivado de la subunidad pequeña de la RuBisCO de Arabidopsis thaliana), la cual precede a una secuencia de corte específica predicha por BSA (BSA predicted cleavage Seq). Esta modificación estratégica asegura que las enzimas recombinantes Ho1 y PcyA sean redirigidas post-traduccionalmente desde el citoplasma hacia el estroma del cloroplasto, optimizando el acceso al pool endógeno de hemo libre de la planta. Las construcciones finales, flanqueadas por los sitios de restricción AscI y reguladas en su extremo 3' por el terminador robusto HSPT878, se introdujeron en células competentes de Agrobacterium tumefaciens para proceder con la agroinfiltración por jeringa en hojas de *Nicotiana benthamiana*.



Figura 4. Vector de expresión pKAN43Ag8_Ho1, con su Promotor 4×CaMV35S, que contiene el gen Ho1 clonado en los sitos de restricción NsiI/AscI.



Figura 5. Vector de expresión pKAN43Ag8_pcyA, con su Promotor 4×CaMV35S, que contiene el gen pcyA clonado en los sitos de restricción NsiI/AscI.

Las secuencias y vectores para *E. coli* diseñados fueron sintetizados por la empresa GenScript (Piscataway,New Jersey, USA).

***Electroforesis en* gel de agarosa de la amplificación de los vectores pKAN43Ag8_ho1 *y* pKAN43Ag8_pcyA por PCR de colonia.**

Se realizó un análisis de restricción de ambos vectores para caracterizar a los vectores en gel de agarosa al 2%.

Los carriles 2–5 (Figura 6) corresponden a las muestras asociadas al constructo pKAN43Ag8-ho1. En ellos se observaron señales intensas que confirman el amplicón esperado de la PCR.

El análisis de la secuencia plasmídica indica que, utilizando el cebador reverso diseñado, se espera un producto de aproximadamente 1,228 pb. Este fragmento abarca una región del cassette de expresión que incluye parte del elemento promotor, regiones situadas aguas arriba del gen, la secuencia codificante de Ho1 y una porción de la región terminadora HSPT.

Por tanto, una banda definida de aproximadamente 1.2 kb sería compatible con la amplificación de esa región del constructo. Aunque se ve una señal clara en la región esperada para la mayor parte de las muestras. Sigue siendo notorio que hay irregularidades entre los carriles que podrían relacionarse con variaciones en la cantidad de material de partida, en la eficiencia de la amplificación o en la composición de los productos generados. También podrían reflejar limitaciones técnicas relacionadas con la carga de las muestras o la separación electroforética.

Los carriles 6–9 del gel (Figura 6) corresponden a las muestras asociadas al constructo pKAN43Ag8-pcya. Al igual que en el grupo anterior, las señales predominantes presentan una intensidad elevada, pero carecen de una delimitación que permita identificar de manera inequívoca un único amplicón. La predicción realizada a partir del archivo de SnapGene indica que el producto esperado tiene una longitud de aproximadamente 1,252 pb.

Al comparar ambos constructos, la longitud teórica del amplicón de pcya es solamente 24 pb mayor que la del amplicón de ho1. Esta diferencia representa aproximadamente el 2 % del tamaño total de los productos y no sería suficiente para distinguir ambos constructos de manera fiable.

La morfología observada en el gel puede estar relacionada con diferentes factores experimentales.

En primer lugar, una cantidad excesiva de material bacteriano puede introducir componentes celulares que interfieran con la PCR. Los protocolos de PCR de colonia advierten que una cantidad elevada de células puede comprometer la reacción, por lo que es importante estandarizar el material de partida (Lowe-Power, 2021).

En segundo lugar, las condiciones de amplificación pueden favorecer productos inespecíficos. La temperatura de alineamiento, la concentración de magnesio, las características de los cebadores y las condiciones de extensión influyen en la especificidad de la reacción (Dieffenbach *et al*., 1993).

En tercer lugar, una carga excesiva de producto o material de partida puede comprometer la definición de las bandas. Finalmente, las señales de menor

intensidad observadas en la región inferior del gel podrían representar fragmentos pequeños de RNA que está presente en las células.

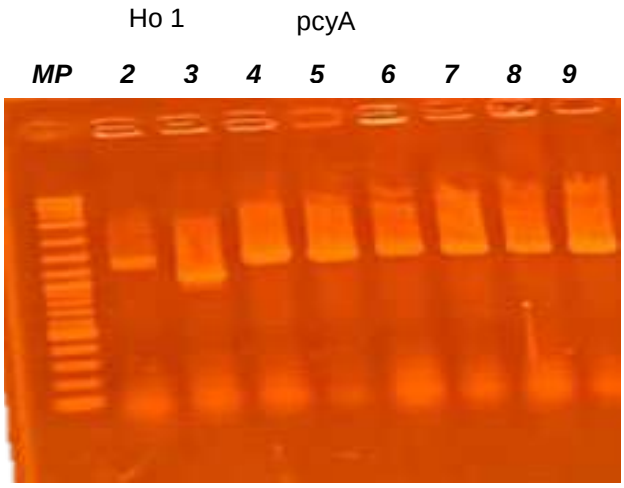


Figura 6. Análisis electroforético de productos de PCR de colonia de *Agrobacterium* asociados a los constructos pKAN43Ag8-ho1 y pKAN43Ag8-pcya. El carril 1 contiene el marcador de peso molecular Quick-Load Purple 1 kb Plus DNA Ladder. Los carriles 2–5 corresponden a muestras asociadas a pKAN43Ag8-ho1 y los carriles 6–9 a muestras asociadas a pKAN43Ag8-pcya. Se observan señales fluorescentes intensas en los carriles experimentales.

Evaluación de los extractos foliares de *N. benthamiana*

Tras la inducción de la expresión recombinante en *N. benthamiana* el análisis de pellet por UV (Figura 7) reveló que la coexpresión heteróloga transitoria de los genes en *Nicotiana benthamiana* representa una estrategia ampliamente validada para la producción en planta de ficocianobilina (PCB), un precursor esencial en sistemas optogenéticos y sondas fluorescentes (Gangemi & Janovjak, 2026; Zhou *et al*., 2024). En este experimento, la extracción con metanol al 80% reveló una intensa fluorescencia rosa-roja bajo luz UV en todas las muestras. Sin embargo, la detección de una señal idéntica en los controles positivos superiores revela que la metodología de extracción orgánica empleada arrastra una alta concentración de pigmentos fotosintéticos endógenos, principalmente clorofila a y sus derivados tetrapirrólicos hidrofóbicos, que enmascaran la fluorescencia del compuesto diana (Bischoff *et al*., 2000). La fluorescencia rosa-roja intensa bajo luz UV en los extractos metanólicos solubles es característica de las bilinas libres (como la ficocianobilina o la biliverdina) disueltas en solventes orgánicos y estabilizadas por el pH/amortiguador, o bien de la clorofila nativa residual y sus productos de degradación que emiten fuertemente en la región roja del espectro. Dado que los tubos de la parte superior de la Figura 7 corresponden al control (infiltradas con pKAN43Ag8-GFP), la presencia de fluorescencia rosa fuerte en ellos sugiere de manera contundente la co-extracción de pigmentos autofluorescentes endógenos de la planta (principalmente clorofila cloroplástica residual o sus catabolitos como las filobilinas). El metanol al 80% es un solvente orgánico altamente eficiente para extraer clorofilas.

Un hallazgo crítico reside en el comportamiento diferencial frente a las concentraciones del amortiguador Tris. En la fila control, la fluorescencia es insensible a la molaridad del Tris (100 a 10 mM), confirmando la estabilidad de los compuestos endógenos en este rango. Por el contrario, en la fila inferior (agroinfiltrada), se observa un gradiente decreciente de fluorescencia conforme disminuye la concentración de Tris. Las bases Tris actúan regulando el pH y proporcionando la fuerza iónica necesaria para la solvatación de moléculas polares. Dado que la PCB

libre posee grupos carboxílicos laterales, su solubilidad y rendimiento cuántico de fluorescencia dependen estrictamente de su estado de protonación y de las interacciones con el microentorno del solvente (Muthusamy *et al*., 2020). La drástica reducción de la señal a 10 mM de Tris en las muestras agroinfiltradas sugiere que la PCB recombinante sintetizada requiere una alta capacidad amortiguadora para mantenerse estable y evitar procesos de auto-extinción (quenching) o agregación molecular en la matriz hidroalcohólica.

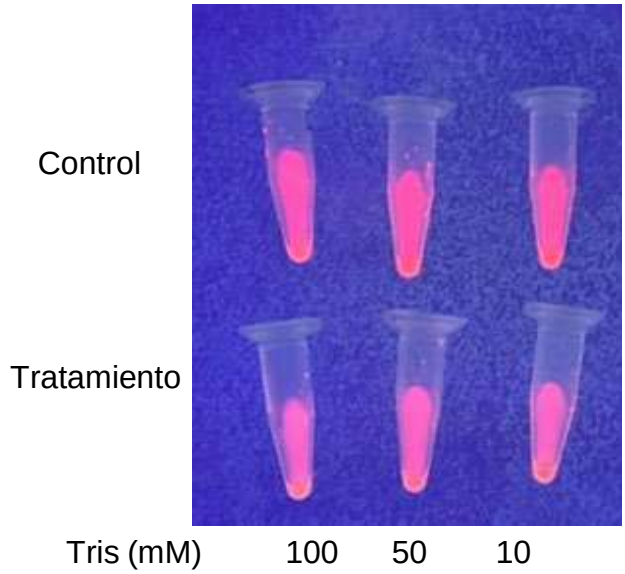


Figura 7. Extracción de proteínas de tejido foliar de *N. benthamiana*.
Comparación visual de los pellets celulares de *la maceración de hojas de N. benthamiana* tras 7 dias después de la infiltracion. Se muestran dos filas de tres tubos Eppendorf expuestos a luz ultravioleta (UV). En ambas filas, de izquierda a derecha, las concentraciones del amortiguador de base Tris disminuyen (100 mM, 50 mM y 10 mM). **Fila Superior (Control):** Muestra una fluorescencia rosa-roja brillante y homogénea en los tres tubos, independientemente de la concentración de Tris.**Fila Inferior (Tratamiento):** Presenta una fluorescencia de color rosa idéntica en tonalidad, pero la intensidad disminuye marcadamente de izquierda a derecha.

Conclusiones

En esta etapa del proyecto se diseñaron los vectores pKAN43Ag8-*ho1* y pKAN43Ag8-*pcyA* a partir del vector pKAN43Ag8-GFP. El diseño *in silico* incluyó mutaciones silenciosas para eliminar sitios de restricción no deseados y elementos destinados a favorecer la expresión constitutiva y el direccionamiento cloroplástico de las enzimas.

Las PCR de colonia de Agrobacterium generaron señales amplias en las muestras asociadas con ambos constructos, con bandas definidas en la posición esperada. Por tanto, los geles obtenidos permiten confirmar de manera concluyente la identidad de los amplicones pero no distinguir de forma fiable entre los dos constructos debido a que la diferencia de longitud entre los productos es pequeña y no permite distinguir entre ambos de manera fiable.

Se demostró la viabilidad de recuperar extractos fluorescentes a partir de tejido foliar de *Nicotiana benthamiana*. No obstante, la fuerte fluorescencia basal en los grupos control evidencia que el uso de metanol al 80% carece de la especificidad necesaria para discriminar la ficocianobilina de las clorofilas nativas. Asimismo, se sugiere que la estabilidad o el rendimiento óptico de la fracción agroinfiltrada está directamente ligada a la fuerza iónica del amortiguador Tris con el que se recupera, siendo la concentración de 100 mM la que ofrece el mejor perfil de visualización.

Agradecimientos

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por la beca otorgada y por el apoyo complementario a la beca por la movilidad en el extranjero que me brindo durante mi estancia en Japón.

Al Dr. Shimizu y a su equipo de investigación en la Universidad de Kagoshima por haberme aceptado para hacer una estancia de investigación en su laboratorio, por su invaluable conocimiento brindado y constante supervisión en esta fase de mi investigación con el sistema recombinante de *N. benthamiana.*

A mis padres por su constante apoyo emocional y económico durante mis 3 meses de estancia en Japón.

Referencias Bibliográficas

Choi, W. Y., & Lee, H. Y. (2018). Effect of ultrasonic extraction on production and structural changes of C-phycocyanin from marine Spirulina maxima. International Journal of Molecular Sciences, 19(1), 220. https://doi.org/10.3390/ijms19010220

Correa, P. S., Morais Júnior, W. G., Martins, A. A., Caetano, N. S., & Mata, T. M. (2021). Microalgae Biomolecules: Extraction, Separation and Purification Methods. In Q. Xu & Z. Bao (Eds.), Extraction and Purification of Bioactive Compounds (pp. 3-46). Processes. https://doi.org/10.3390/pr9010010

Dotmatics. (2025). SnapGene® (versión 1.1.3) [Software]. snapgene.com.

Dieffenbach, C. W., Lowe, T. M. J., & Dveksler, G. S. (1993). General concepts for PCR primer design. PCR Methods and Applications, 3(3), S30–S37. https://doi.org/10.1101/gr.3.3.s30

Esclapez, J., Matarredona, L., Zafrilla, G., Camacho, M., Bonete, M.-J., & Zafrilla, B. (2024). Optimization of Phycocyanobilin Synthesis in E. coli BL21: Biotechnological Insights and Challenges for Scalable Production. Genes, 15(1058). https://doi.org/10.3390/genes15081058

Fernandes, R., Campos, J., Serra, M., Fidalgo, J., Almeida, H., Casas, A., Toubarro, D., & Barros, A. I. R. N. A. (2023). Exploring the Benefits of Phycocyanin: From Spirulina Cultivation to Its Widespread Applications. Pharmaceuticals, 16(4), 592. https://doi.org/10.3390/ph16040592

Grover, P., Bhatnagar, A., Kumari, N., Bhatt, A. N., Nishad, D. K., & Purkayastha, J. (2021). C-Phycocyanin—a novel protein from Spirulina platensis—In vivo toxicity, antioxidant and immunomodulatory studies. Saudi Journal of Biological Sciences. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X20307014

Gangemi, C. G., & Janovjak, H. (2026). Optogenetics in Pancreatic Islets: Actuators and Effects [Optogenética en islotes pancreáticos: Actuadores y

efectos]. Diabetes, 73(10), 1566–1574. doi.org

Jaeschke, D. P., Teixeira, I. R., Marczak, L. D. F., & Mercali, G. D. (2021). Phycocyanin from Spirulina: A review of extraction methods and stability. Food Research International, 110314. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110314

Khlebodarova, T. M., Bogacheva, N. V., Zadorozhny, A. V., Bryanskaya, A. V., Vasilieva, A. R., Chesnokov, D. O., Pavlova, E. I., & Peltek, S. E. (2024). Komagataella phaffii as a Platform for Heterologous Expression of Enzymes Used for Industry. Microorganisms, 12(2), 346. https://doi.org/10.3390/microorganisms12020346

Ma, C., Li, W., Ge, B., *et al*. (2020). Biosynthesis of phycocyanobilin in recombinant Escherichia coli. Journal of Oceanology and Limnology, 38, 529–538. https://doi.org/10.1007/s00343-019-9060-6

Muthusamy, S., Vetukuri, R. R., & Linnaeus University. (2020). Transient expression and purification of β-caryophyllene synthase in Nicotiana benthamiana to produce β-caryophyllene in vitro [Expresión transitoria y purificación de β-cariofileno sintasa en Nicotiana benthamiana]. PeerJ, 8, Article e8904. doi.org

National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2025). Synechocystis sp. PCC 6803, complete genome [GenBank: CP007542, CP007543]. NCBI GenBank. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/CP007542

Norkunas, K., Harding, R., Dale, J., & Dugdale, B. (2018). Improving agroinfiltration-based transient gene expression in Nicotiana benthamiana. Plant Methods, 14, 71. https://doi.org/10.1186/s13007-018-0343-2

Lowe-Power, T. (2021). Colony PCR. University of California, Davis. https://lowepowerlab.ucdavis.edu/protocols/colony_pcr.html

Reed, J., & Osbourn, A. (2018). Engineering terpenoid production through transient expression in Nicotiana benthamiana. Plant Cell Reports, 37, 1431–1441. https://doi.org/10.1007/s00299-018-2296-3

ResearchGate. (2023). Fluorescence decay of phycocyanobilin dissolved in methanol. Recuperado el 23 de octubre de 2026, de https://www.researchgate.net/figure/Fluorescence-decay-of-phycocyanobilin-dissolved-in-methanol-as-measured-by-the_fig7_231665532

Stothard P (2000) The Sequence Manipulation Suite: JavaScript programs for analyzing and formatting protein and DNA sequences. Biotechniques 28:1102-1104.

Shimizu, K. (2021). *pKAN43Ag8-GFP* (Addgene Plasmid #178182). Addgene. addgene.org

Tavanandi, H. A., & Raghavarao, K. S. M. S. (2020). Ultrasound-assisted

enzymatic extraction of natural food colorant C-Phycocyanin from dry biomass of Arthrospira platensis. LWT, 118, 108802.

Vali Aftari, R., Rezaei, K., Mortazavi, A., & Bandani, A. R. (2015). The optimized concentration and purity of Spirulina platensis C-phycocyanin: A comparative study on microwave-assisted and ultrasound-assisted extraction methods. Journal of Food Processing and Preservation. https://doi.org/10.1111/jfpp.12573

Wu, H.-L., Wang, G.-H., Xiang, W.-Z., Li, T., & He, H. (2016). Stability and antioxidant activity of food-grade phycocyanin isolated from Spirulina platensis. International Journal of Food Properties, 19(10), 2349-2362. https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1038564

Zhou, Y., etc. (2024). A red light-sensitive approach based on deconstructed phytochrome A (REDMAP) for transcriptional regulation [Un enfoque sensible a la luz roja basado en el fitocromo A deconstruido para la regulación transcripcional]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(14), e2300770120

UANL

FA

LXV

CICLO DE SEMINARIOS DE POSGRADO - OTOÑO - 2026



MEMORIAS

Maestría en Ciencias con Orientación en: Ingeniería en Industrias Alimentarias

VISIÓN UANL 2040

30 de noviembre y 01 de diciembre de 2026 / 8:30 horas
Biblioteca de Ciencias Agropecuarias y Biológicas
Aula Usos Múltiples, Facultad de Agronomía
Campus de Ciencias Agropecuarias UANL

La excelencia por principio la educación como instrumento

PROGRAMA EDUCATIVO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

PRIMER SEMESTRE

Desarrollo y caracterización de un producto de panificación con un oleogel bioactivo y *Prosopis spp.*
José Roberto Gutiérrez-López; Cecilia Castro-López; Romeo Rojas-Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila **.....89**

Determinación del potencial tecno-funcional de una pasta fermentada elaborada a base en *Hermetia illucens*
María Fernanda Romero-Avilés; Cecilia Castro-López; Julia Mariana Márquez-Reyes; Romeo Rojas-Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila**..... 98**

Valorización de productos hortofrutícolas no comercializables mediante fermentación con *Lactiplantibacillus plantarum* para la obtención de un ingrediente alimentario con potencial bioactivo
Myriam Guadalupe Cortes-Montelongo; Pablo Alan Rodríguez-Salinas; Gerardo Méndez-Zamora; Cynthia Alvarez-Torres; Sugey Ramona Sinagawa-García**..... 106**

SEGUNDO SEMESTRE

Extracción secuencial y caracterización de fitoquímicos de xoconostle *(Opuntia joconostle)*
Lizde Azarel-Guzman-Guzman; Julia Mariana Márquez Reyes; Nancy del Pilar Medina Herrera; Romeo Rojas Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez Ávila**..... 115**

TERCER SEMESTRE

Efecto de tratamientos emergentes en la conservación y propiedades nutracéuticas de una bebida funcional a base de semillas de *Cannabis sativa* L. (hemp)
Juan Diego Romo-Longoria; Pablo Alan Rodríguez-Salinas; Lidia Rosaura Salas-Cruz; Vania Urías-Orona; Guillermo Niño-Medina**..... 124**

CUARTO SEMESTRE

Elaboración y caracterización de oleogeles adicionados con aceites esenciales y su empleo en el desarrollo de alimentos con potencial funcional
Dalia Leticia Muñoz-Carlos; Nancy del Pilar Medina-Herrera; Romeo Rojas-Molina; Beatriz Adriana Rodríguez-Romero; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila**..... 136**

Desarrollo y caracterización de un producto de panificación con un oleogel bioactivo y *Prosopis spp.*

José Roberto Gutiérrez-López*; Cecilia Castro-López; Romeo Rojas-Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399. *Email: jose.gutierrezlo@uanl.edu.mx

Resumen. El presente trabajo tiene como objetivo formular, desarrollar y caracterizar un producto innovador de panadería elaborado con harina y goma de mezquite (*Prosopis spp.*), en combinación con un oleogel funcional estructurado eficientemente con cera de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) y aceite esencial de anís (*Pimpinella anisum*), con la finalidad de utilizarlo como una alternativa altamente saludable y tecnológica para la sustitución de las grasas saturadas convencionales aplicadas en la industria alimentaria. La metodología experimental contempla, en primer lugar, la formulación y caracterización fisicoquímica y estructural de los oleogeles obtenidos, evaluando parámetros tales como el color, el índice de acidez, el punto de fusión, la dureza, el grado de peróxidos y perfil de grupos funcionales mediante espectroscopía FTIR. Posteriormente, se procederá al desarrollo del producto de panificación incorporando gradualmente distintas concentraciones de oleogeles y harina de mezquite, evaluando su perfil químico-tecnológico, las propiedades de textura, el color, la migración de grasa, la retención de humedad y la aceptabilidad sensorial mediante paneles cualitativos. Finalmente, se evaluarán las propiedades funcionales del producto desarrollado mediante un análisis químico-proximal, la reología de la masa, el análisis microbiológico y la aplicación de un protocolo estandarizado de digestión gastrointestinal *in vitro* para determinar la bioaccesibilidad de sus nutrientes.
Palabras clave: oleogel bioactivo, *Prosopis spp.,* aceite esencial, panificación, digestibilidad.

Abstract. The present work aims to formulate, develop and characterize an innovative bakery product made with mesquite flour and gum (*Prosopis spp.*), in combination on a functional oleogel efficiently structured with candelilla wax (*Euphorbia antisyphilitica*) and anise essential oil (*Pimpinella anisum*), with the purpose of using it as a highly healthy and technological alternative for the replacement of conventional saturated fats used in the food industry. The experiment methodology contemplates, firstly, the formulation and the physicochemical and structural characterization of the obtained oleogels, evaluating parameters such as color, acid value, melting point, hardness, peroxide value, and functional group profile by means of FTIR spectroscopy. Subsequently, the development of the bakery product will be carried out by gradually incorporating different concentrations of oleogels and mesquite flour, evaluating its chemical-technological profile, texture properties, color, fat migration, moisture retention, and sensory acceptability through qualitative panels. Finally, the functional properties of the developed product will be evaluated though a proximate chemical analysis, dough rheology, microbiological analysis, and the application of a standardized *in vitro* gastrointestinal digestion protocol to determine the bioaccessibility of its nutrients.
Keywords: bioactive oloegel, *Prosopis spp.,* essential oil, baking, digestibility.

Introducción

En la actualidad, los consumidores no solo muestran una preferencia por alimentos que no solo destaquen por sus cualidades organolépticas, sino que también aporten un elevado valor nutricional, estén libres de aditivos sintéticos y contribuyan al bienestar integral y a la salud (Alemán-Huerta *et al*., 2023). No obstante, a pesar de que los productos de panadería representan alguno de los alimentos de mayor consumo a nivel global, suelen ser percibidos negativamente debido a su alto contenido calórico, reducida capacidad de saciedad, azúcares y grasas saturadas, que al consumirse en exceso aumentan las probabilidades de desarrollar diabetes, enfermedades cardiovasculares y obesidad (Korus *et al*., 2022).

Para enfrentar esta problemática, diversas leguminosas como el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), las habas (*Vicia faba L.*), el garbanzo (*Cicer arietinum L.*) y el chícharo o arveja (*Pisum sativum L.*) han sido estudiadas para evaluar su viabilidad en panadería, aunque no han sido aprovechadas completamente (González-Montemayor *et al*., 2019; Korus *et al*., 2022). Al respecto, la harina de mezquite (*Prosopis spp.*) aporta proteínas, fibra, ácido oleico, linoleico, tocoferoles, derivados glucosídicos de apigenina y minerales, mientas que su goma puede utilizarse como hidrocoloide en concentraciones bajas (0.8 a 1.2%) para inducir cambios estructurales y mejorar la calidad del pan, su vida útil y mejorar las características sensoriales (Korus *et al*., 2022; Mudgil & Barak., 2020). Por otro lado, la creciente regulación contra las grasas *trans* y la búsqueda de opciones más saludables impulsadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) al limitar las grasas totales al 30%, las saturadas al 10% y las *trans* al 1% han propiciado el uso de la oleogelación. Los oleogeles transforman aceites líquidos en semisólidos mediante estructurantes sin alterar la textura ni la consistencia esperada por los consumidores (Abe *et al*., 2025).

Como soluciones propuestas en este trabajo, se plantea desarrollar un producto de panificación mediante la sustitución parcial de: 1) grasas convencionales por un oleogel con aceite esencial de anís (*Pimpinella anisum*) y 2) harina refinada por harina de mezquite y goma de mezquite. Esta propuesta aprovecha los recursos regionales subutilizados e integra por primera vez el aceite esencial de anís en matrices de oleogeles bioactivos y panadería, aportando estabilidad, compuestos bioactivos y propiedades antioxidantes y antimicrobianas significativas. Asimismo, esta solución, no solo reduce el uso de grasa saturadas y elimina las grasas *trans*, sino que también realiza una caracterización integral que incluye la evaluación del perfil químico-tecnológico y el análisis de las propiedades funcionales donde destacan el análisis microbiológico y la simulación del comportamiento gastrointestinal *in vitro* para evaluar la bioaccesibilidad de los nutrientes y la respuesta glucémica esperada (Dumitrescu *et al*., 2023; Zhou *et al*., 2023)

Materiales y métodos

1.1 Obtención y extracción del aceite esencial de anís. Las semillas de anís común (*Pimpinella anisum*) provendrán del Mercado de Abastos Estrella (San Nicolás de los Garza, N.L., México) y la cera de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) del ejido Lucio Blanco (Cuatrocienegas, Coahuila, México). Con base en la metodología de Padilla-Garza *et al*. (2026), el aceite esencial de las semillas de *P. anisum* se extraerá mediante destilación por arrastre de vapor empleando un equipo Clevenger a escala piloto.

1.1.2 Formulación de oleogeles. Se formularán modificando el método de Borjas-Celaya *et al*., (2026). Se evaluarán tres concentraciones de cera de candelilla (3, 6 y 9% p/p) combinadas con aceite de ajo, pepita de calabaza y ajonjolí tostado. El aceite vegetal se calentará a 80 °C en baño María, adicionando la cera y el aceite esencial de anís (0.5% v/v) bajo agitación constante por 15 min hasta dilución constante. La mezcla se enfriará a temperatura ambiente y se refrigerará a 4°C durante 24 h antes de su caracterización.

1.2 Caracterización del oleogel. Todas las determinaciones analíticas se realizarán por triplicado tanto para las formulaciones del oleogel como para los controles comerciales (manteca vegetal, manteca de puerco y mantequilla) obtenidos comercialmente.

1.2.1 Determinación de propiedades fisicoquímicas. Siguiendo la metodología descrita por Flores- García et. al (2023), se evaluarán:

1.2.1.1 Color. Mediante un colorímetro Konica Minolta (CR-410), midiendo tres puntos en muestras de 10 cm de grosor para obtener los parámetros de la escala CIE *L*, a** y *b**.

1.2.1.2 Índice de acidez. Determinado por la norma NMX-F-101-1987, disolviendo 5 g de muestra en 37.5 mL de etanol al 95% (v/v) a baño María y titulando con KOH 0.1 N (fenolftaleína al 1% p/v como indicador).

1.2.1.3 Punto de fusión. La muestra se fundirá en una caja Petri y se introducirá en un tubo capilar (aprox. 1 cm) que se dejará reposar a temperatura ambiente durante 24 h antes de la medición.

1.2.1.4 Dureza. Mediante prueba de penetración/punción a 25 ± 2°C con analizador de textura TA.XT Plus (sonda de 5 mm, penetración de 10 mm a 1.0 m/s), registrando la fuerza máxima obtenida.

1.2.1.5 Grado de peróxidos. Se aplicará la metodología del fabricante (Hanna Instruments) midiendo las lecturas directamente en un fotómetro específico para este análisis.

1.2.2 Análisis de grupos funcionales por FTIR. Las modificaciones estructurales de los oleogeles y materias primas puras se caracterizarán con un espectrómetro FTIR acoplado a un accesorio ATR de cristal de seleniuro de zinc (Agilent Carry 630 ZnSe). Los barridos se efectuarán de 650 a 4000 cm^{-1} (resolución de 2 cm^{-1}, 32 escaneos), procesando espectros mediante el software OriginPro según Aranda-Ledesma *et al*., (2024).

1.3 Obtención y preparación de la materia prima para el producto de panificación. Harina de trigo, azúcar refinada, huevo y margarina, así como la harina y goma de mezquite se obtendrán comercialmente.

1.4 Preparación del producto de panificación. Los bizcochos se elaborarán según la metodología de Heetesonne *et al*, (2024), modificada. La fórmula base incluye harina de trigo (300 g), azúcar (300 g), huevo (300 g), margarina (300 g), pirofosfato de sodio (3.43 g) y bicarbonato de sodio (2.57 g). En las variantes experimentales la harina de trigo se sustituirá por harina de mezquite (25, 50, 75 y 100% p/p) y la margarina por oleogel (30, 50, 70 y 100% p/p), añadiendo 1.2% p/p de goma de mezquite. Para el procedimiento, se batirá la margarina con el azúcar (3 min) y se integrarán las harinas alternando con huevo (3.5 min), finalizando con un batido extra de 30 s. La masa se dividirá en porciones de 250 g en moldes de aluminio, se horneará a 175°C durante 35 min en horno de convección, se enfriará por 1.5 h, se empaquetará en bolsas de plástico y se evaluará a las 24 horas.

1.5 Propiedades fisicoquímicas del producto de panificación

1.5.1 Peso antes y después del horneado. Siguiendo la metodología de Ahmadinia *et al*., (2023). Las muestras se pesarán antes y después de la cocción, así la merma del peso se calculará a partir de la diferencia observada entre ambas mediciones mediante la siguiente ecuación:

$$PP\ (\%) \quad = \frac{PM - PBH}{PM}\ x\ 100$$

Abreviaturas:
PP: Pérdida de peso
PM: Peso de la masa
PBH: Peso del bizcocho horneado

1.5.2 Densidad de la masa. Se determinará por cuadriplicado a temperatura ambiente, dividiendo la masa contenida en un recipiente cilíndrico entre su volumen conocido (kg/m^3) como lo describe Heetesonne *et al*., (2024).

1.5.3 Volumen. Se medirá por cuadriplicado a temperatura ambiente mediante un escáner láser (paso de 5 mm y velocidad de rotación de 1.5 rps). El volumen específico (cm^3/g) se calculará dividiendo el volumen entre la masa del bizcocho, de acuerdo con Heetesonne *et al.*, (2024).

1.5.4 Textura. Se realizará según Kim *et al*., (2024) en rebanadas de pan de 18 mm, utilizando un analizador CTX onda cilíndrica de 50 mm, velocidad de 60 mm/min y 50% de deformación. Las mediciones se realizarán en los días 1, 2 y 4, evaluando la dureza (N), la elasticidad (mm), la cohesividad y la masticabilidad (J).

1.5.5 Color. El color superficial se evaluará con un colorímetro Konica Minolta (CR-410), midiendo tres puntos distintos por muestra de aproximadamente 10 cm de grosor, registrando los parámetros *L*, a** y *b** como lo indica Flores-García *et al*., (2023).

1.5.6 Migración de grasa. Se determinará midiendo el aceite absorbido por un papel previamente pesado, tras colocar la muestra sobre este durante 24 h a 28 ± 1°C.

La cantidad de grasa retenida se calculará por la diferencia entre la masa inicial y final del papel. La prueba se realizará por triplicado de acuerdo con Meirama-Ross *et al*., (2026) con ligeras modificaciones.

1.5.7 Humedad. Esta se medirá mediante secado en estufa a 105 ± 2 °C. Para hacer la medición se utilizará aprox. 3 g de miga y la pérdida de humedad se calculará durante el horneado se estimará por diferencia de acuerdo con Salazar *et al*., (2021).

1.5.8 Índice de peróxidos. Se aplicará la metodología del fabricante (Hanna Instruments) midiendo las lecturas directamente en un fotómetro específico para este análisis.

1.6 Evaluación sensorial. Se evaluará la aceptabilidad sensorial (color, olor, sabor, textura y apariencia general) mediante una escala hedónica de 5 puntos (1: disgusta mucho, 5: gusta mucho), aplicando la metodología modificada de Alemán-Huerta *et al*., (2023). La prueba se realizará por 30 jueces no entrenado (18 – 77 años) en cubículos individuales, usando muestras codificadas al azar y enjuague con agua purificada entre degustaciones.

1.7 Análisis químico-proximal. El control y la formulación con mejor calidad fisicoquímica y organoléptica se someterá a análisis bromatológico: humedad (estufa a 105°C), cenizas (calcinación a 550 °C por 12 h), proteína bruta (método de Kjeldahl, factor *N* x 6.25), lípidos (extracción con éter) y fibra bruta. Los carbohidratos totales se calcularán por diferencia al 100% de acuerdo con Alemán-Huerta *et al*., (2023).

1.8 Análisis reológico. Se evaluarán por triplicado a 25 °C siguiendo la metodología de Salazar *et al*., (2021), utilizando un reómetro (Anton Paar MCR102) equipado con placas paralelas (40 mm de diámetro, separación de 1 mm). Se aplicará un barrido de frecuencia de 0.1 a 10 Hz a una tensión constante de 3.3 Pa para registrar el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'').

1.9 Análisis microbiológico. Se homogeneizarán 10 g de pan con 90 mL de agua peptonada al 0.1% (p/v) en un Stomacher durante 1 minuto. Se cuantificarán aerobios mesófilos en placas de Agar para Recuento en Placa (PCA) (30 °C, 72 h), mohos y levaduras en placas de Agar Papa Dextrosa (PDA) (25 °C, 48 h), *Enterobacteriaceae* en placas de Agar Bilis y Rojo Violeta con Glucosa (VRBG) y *Sataphylococcus aureus* en placas de Agar Baird-Parker (30 °C, 48 h). Los análisis se realizarán por triplicado en los días 1, 3 y 5 de almacenamiento siguiendo la metodología propuesta por Salazar *et al*., (2021).

1.10 Digestión gastrointestinal simulada *in vitro.* El ensayo se estructurará conforme a Julián-Flores *et al*., (2025) simulando control de pH, temperatura a 37 °C, agitación y adición secuencia de enzimas.

1.10.1 Digestión oral simulada. Se ajustará el pH entre 5.6 y 6.9, añadiendo 0.3 mL de solución de α-amilasa (100 U/mL) e incubando a 200 rpm durante 2 min.

1.10.2 Digestión gástrica simulada. Se acidificará el sistema a pH 2.0 con HCl 1M y se incorporará pepsina (25 mg/mL) en

relación 0.05 mL/mL de muestra, incubando a 130 rpm durante 1 h.

1.10.3 Digestión intestinal simulada. Se ajustará el pH a 6.0 con $NaHCO_3$ 1M y se añadirá el complejo enzimático simulado en proporción de 0.25 mL/mL de muestra, incubando a 45 rpm durante 2 h.

1.10.4 Absorción-diálisis en el intestino delgado. El digerido intestinal se transferirá a una membrana de diálisis de acetato de celulosa (corte de peso molecular 3 kDa) inmersa en agua destilada a temperatura ambiente durante 24 h (1000 rpm) para separar la fracción absorbible de la no absorbible de acuerdo con Gómez-García *et al*., (2023).

1.11 Diseño experimental. El estudio comprenderá dos fases experimentales independientes bajo un diseño factorial completo. En la primera fase (oleogeles), se empleará un diseño factorial de 3 x 3 para evaluar tres niveles de cera de candelilla (3, 6 y 9% p/p) y tres aceites vegetales (ajo, pepita de calabaza y ajonjolí tostado), manteniendo constante el aceite esencial de anís al 0.5%. Estos tratamientos se compararán ante tres controles comerciales (manteca vegetal, manteca de cerdo y mantequilla). En la segunda fase (panificación), se aplicará un diseño factorial de 4 x 4 para evaluar la sustitución de harina de trigo por harina de mezquite (25, 50, 75 y 100% p/p), adicionando goma de mezquite al 1.2%. Asimismo, se empleará un control que no contendrá ninguna sustitución.

1.12 Análisis estadístico de datos. Las determinaciones se realizarán por triplicado o cuadriplicado y se expresarán como media ± desviación estándar ($\bar{x} \pm SD$). Para la inferencia estadística, se empleará un ANOVA de una vía para comparar los oleogeles con los controles comerciales y un ANOVA bifactorial para evaluar los efectos e interacciones de las sustituciones en el producto horneado. Las diferencias significativas ($p \leq 0.05$) se analizarán mediante la prueba Tukey.

Plan de trabajo y calendarización

En el siguiente cuadro se muestra la propuesta del plan de trabajo para el periodo de dos años de investigación.

Cuadro 1. Cronograma de actividades

ACTIVIDAD / AÑO	2026	2027		2028
	Ago Dic	Ene Jun	Ago Dic	Ene Jun
Definición del tema del proyecto	x			
Redacción del anteproyecto	x			
1er Seminario	x			
Recolección de materia prima	x			
Extracción de aceite esencial de anís		x		
Formulación y elaboración de oleogeles		x		
Caracterización de oleogeles		x		
2do Seminario		x		

Elaboración de bizcochos con harina y goma de mezquite y oleogeles			x	
Evaluación fisicoquímica			x	
Análisis reológico			x	
Análisis microbiológico			x	
Evaluación sensorial			x	
3er Seminario			x	
Análisis químico-proximal				x
Ensayo de digestibilidad *in vitro*				x
4to Seminario				x
Análisis de datos		x	x	x
Redacción de tesis				x
Titulación				x

Desglose financiero

Este proyecto será financiado por el Programa de Apoyo a la Investigación y Divulgación Científica y Humanística de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL – 156-BYQ-2026).

Agradecimientos

Agradecemos al proyecto UANL – 156-BYQ-2026 por el financiamiento y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada.

Referencias bibliográficas

Abe, A. A., Aiello, I., Oliviero Rossi, C., & Caputo, P. (2025). Oleogels: Uses, Applications, and Potential in the Food Industry. Gels, 11(7), 563.

Ahmadinia, F., Mohtarami, F., Esmaiili, M. *et al*. Investigation of physicochemical and sensory characteristics of low calorie sponge cake made from flaxseed mucilage and flaxseed flour. Sci Rep 13, 20949 (2023).

Alemán-Huerta, M. E., Castillo-Cázares, B. A., Márquez-Reyes, J. M., Báez-González, J. G., Quintero-Zapata, I., Gandarilla-Pacheco, F. L., de Luna-Santillana, E. d. J., & Treviño-Garza, M. Z. (2023). Muffin-Type Bakery Product Based on Mexican Mesquite (Prosopis spp.) Flour: Texture Profile, Acceptability, and Physicochemical Properties. Foods, 12(19), 3587.

Aranda-Ledesma, N. E., Aguilar-Quintero, I., Robledo-Jiménez, C. L., Aguilar-Zárate, P., Rojas, R., & Martínez-Ávila, G. C. G. (2024). Optimizing the Extraction Process of Bioactive Compounds for Sustainable Utilization of Vitis vinifera and Citrus sinensis Byproducts. Biomass, 4(3), 826-842.

Borjas-Celaya, A., Martínez-Ávila, G., Rodríguez-Romero, B., Rojas-Molina, R., & Aranda-Ledesma, N. (2026). Evaluation of vegetable oils in the formulation of oleogels based on organic candelilla wax and their

application in the development of wheat flour tortillas. RIIIT Revista Internacional de Investigación E Innovación Tecnológica, 14(82), 112-125.

Dumitrescu, E., Muselin, F., Tîrziu, E., Folescu, M., Dumitrescu, C. S., Orboi, D. M., & Cristina, R. T. (2023). Pimpinella anisum L. Essential Oil a Valuable Antibacterial and Antifungal Alternative. Plants, 12(13), 2428.

Flores-García, C. L., Medina-Herrera, N., Rodríguez-Romero, B. A., Martínez-Ávila, G. C. G., Rojas, R., & Meza-Carranco, Z. (2023). Impact of Fat Replacement by Using Organic-Candelilla-Wax-Based Oleogels on the Physicochemical and Sensorial Properties of a Model Cookie. Gels, 9(8), 636.

Gómez-García, R., Sánchez-Gutiérrez, M., Freitas-Costa, C., Vilas Boas, A., Campos, D., Aguilar, C., Madureira, A., & Pintado, M. (2022). Prebiotic effect, bioactive compounds and antioxidant capacity of melon peel (Cucumis melo L. inodorus) flour subjected to in vitro gastrointestinal digestion and human faecal fermentation. Food Research International, 154, Article 111045.

Gonzalez, A., Flores-Gallegos, A. C., Contreras-Esquivel, J., Solanilla Duque, J. F., & Rodriguez, R. (2019). Prosopis spp. functional activities and its applications in bakery products. Trends in Food Science & Technology, 94, 65–74.

Heetesonne, I., Claus, E., De Leyn, I., Dewettinck, K., Camerlinck, M., Schouteten, J. J., & Van Bockstaele, F. (2024). Characterization of Pulse-Containing Cakes Using Sensory Evaluation and Instrumental Analysis. Foods, 13(22), 3575.

Julián-Flores, A., Michel, M. R., Aguilar, C. N., da Silva, T. G., Torres-León, C., Ascacio-Valdés, J. A., Sepúlveda, L., Aguilar-Zárate, P., & Chávez-González, M. L. (2025). Encapsulation and Digestive Evaluation of Infusion Extracts from Semi-Desert Mexican Plants: Phytochemical Profiling and Bioactivities. Plants, 14(22), 3448.

Kim, S.-H., Jo, Y.-J., Lee, S. H., & Park, S.-H. (2024). Development of Oleogel-Based Fat Replacer and Its Application in Pan Bread Making. Foods, 13(11), 1678.

Korus, J., Witczak, M., Korus, A., & Juszczak, L. (2022). Mesquite (Prosopis L.) as a functional ingredient in gluten-free dough and bread. LWT, 168, Article 113957.

Meirama-Ross, K., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., Morales-Contreras, B. E., González-Herrera, S. M., Pensáben-Esquivel, M., Carmona-García, R., Sayago-Ayerdi, S. G., & Cardenas-Castro, A. P. (2026). Physicochemical, Textural, and Sensory Properties of Cookies Formulated with Canola Oil-Based Oleogels and Mesquite Flour. Foods, 15(12), 2077.

Mudgil, D., & Barak, S. (2020). Mesquite gum (Prosopis gum): Structure, properties & applications - A review. International journal of biological macromolecules, 159, 1094–1102.

Padilla-Garza, J. M., Rojas, A., Gutierrez Díez, A., Márquez Reyes, J. M., Rodríguez Guerra, R., & Martínez Ávila, G. C. (2026). Control de fitopatógenos del pimiento (Capsicum annuum L) mediante emulsiones de aceites esenciales [Manuscrito no publicado]. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Salazar, D., Arancibia, M., Silva, D. R., López-Caballero, M. E., & Montero, M. P. (2021). Exploring the Potential of Andean Crops for the Production of Gluten-Free Muffins. Agronomy, 11(8), 1642.

Zhou, H., Tan, Y., & McClements, D. J. (2023). Applications of the INFOGEST In Vitro Digestion Model to Foods: A Review. Annual review of food science and technology, 14, 135–156

Determinación del potencial tecno-funcional de una pasta fermentada elaborada a base en *Hermetia illucens*

María Fernanda Romero-Avilés*; Cecilia Castro-López; Julia Mariana Márquez-Reyes; Romeo Rojas-Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. CP. 66050. Tel. (22) 8114 5265. *Email: maria.romerovl@uanl.edu.mx

Resumen. El objetivo de esta investigación es determinar el potencial tecnológico y funcional de una pasta fermentada elaborada con harina de mosca soldado negra (MSN, *Hermetia illucens)*, mediante la evaluación de las propiedades de la masa y del producto final. La metodología se desarrollará en tres etapas experimentales. En la primera etapa, se formularán doce masas con sustituciones de harina de trigo integral por harina de MSN de 0, 5, 10 y 15% (p/p), distribuidas en tres tratamientos de fermentación láctica: T1 (sin inoculación bacteriana), T2 (*Bifidobacterium animalis* subsp*. lactis* BLC1) y T3 *(Lactiplantibacillus plantarum* BG112). En la segunda etapa, las masas fermentadas se someterán a una caracterización químico-proximal y funcional, que incluirá: determinación de fenoles y flavonoides totales, actividad antioxidante mediante ensayos $ABTS^{\cdot+}$, FRAP y Actividad captadora de radicales hidroxilo ($OH^{\bullet}$), la inhibición de las enzimas α-amilasa y α-glucosidasa, y el análisis del perfil de grupos funcionales mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). En la tercera etapa, se seleccionarán las formulaciones de interés para elaborar una pasta tipo *fettuccine*, en la cual se evaluarán las propiedades tecno-funcionales. Los resultados permitirán comparar las formulaciones y caracterizar sus propiedades nutricionales, funcionales y tecnológicas, con el propósito de determinar su potencial como alternativa alimentaria de valor agregado y posible aplicación industrial.
Palabras clave: Actividad antioxidante, alimentos funcionales, entomofagia, fermentación, cultivos probióticos.

Abstract. The objective of this research is to determine the functional potential of fermented pasta made with (black soldier fly (BSF, *Hermetia illucens)* flour by evaluating the properties of the dough and the final product. The methodology will be carried out in three experimental stages. In the first stage, twelve doughs formulations will be prepared using 0, 5, 10, and 15% (w/w) substitution of whole weat flour with BSF flourdistributed among three lactic fermentation treatments: T1 (without bacterial inoculation), T2 (*Bifidobacterium animalis* subsp*. lactis* BLC1) y T3 *(Lactiplantibacillus plantarum* BG112. In the second stage, the fermented doughs will undergo proximate chemical and functional characterization, including the determination of total phenolic and flavonoid contents, antioxidant activity using $ABTS^{\cdot+}$, FRAP, and hydroxyl radical ($OH^{\bullet}$) scavenging assays; inhibition of α-amylase and α-glucosidase enzymes; and analysis of the functional group profile by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). In the Third stage, selected formulations will be used to produce *fettuccine*-type pasta, whose techno-functional properties will be evaluated. The results will allow the formulations to be compared and their nutritional, functional and technological properties to be characterized, with the aim of determining their potential as a value-added food alternative with posible industrial applications.
Key words: Antioxidant activity, functional foods, entomophagy, fermentation, probiotic bacteria.

Introducción

La búsqueda de ingredientes alternativos para el desarrollo de alimentos con valor nutricional y propiedades funcionales ha impulsado el estudio de los insectos comestibles. Entre ellos, *Hermetia illucens*, conocida como mosca soldado negra (MSN), destacada por su potencial como fuente de nutrientes y como materia prima para obtener ingredientes destinados a la formulación de alimentos. Sin embargo, su incorporación a productos convencionales requiere evaluar no solo su composición, sino también los cambios que puede ocasionar en las propiedades fisicoquímicas, tecnológicas y bioactivas del producto final (Wang & Shelomi, 2017; Lu *et al.,* 2022).

Diversos estudios han explotado la incorporación de insectos y sus derivados en matrices alimentarias. Hidalgo *et al. (*2023) elaboraron pastas enriquecidas mediante la sustitución parcial de sémola de trigo por extractos protéicos de *H. illucens* y *Bombyx mori,* y observaron modificaciones en el color, la fracturabilidad y la absorción de agua, mientras que la firmeza y la adhesividad se mantuvieron similares a las de la pasta control. Por su parte, Draszanowska *et al.* (2025) estudiaron la adición de harina de *H. illucens* en pan integral y reportaron mejoras en algunos parámetros nutricionales, así como cambios en el contenido de compuestos fenólicos y en la actividad antioxidante. Estos antecedentes sugieren que la incorporación de ingredientes derivados de insectos es una alternativa viable para desarrollar alimentos, aunque sus efectos dependen de la especie, la proporción incorporada y el procesamiento empleado.

Además de su aporte nutricional, los insectos comestibles han despertado interés por la presencia de compuestos que podrían contribuir a distintas actividades biológicas. Navarro del Hierro *et al*. (2021). Demostraron que los extractos de *H. illucens* presentan actividad antioxidante y capacidad inhibitoria frente a la lipasa pancreática, y señalaron que el desgrasado y el solvente de extracción pueden modificar la respuesta obtenida. Asimismo, Torres-Castillo y Olazarán-Santibañez (2023) describieron el potencial de los insectos como fuentes de compuestos fenólicos y otras sustancias de interés para el desarrollo de alimentos con propiedades bioactivas. No obstante, la actividad observada en extractos o materias primas no necesariamente se conserva de la misma manera después de incorporarlas y procesarlas en un alimento.

En este contexto, la fermentación constituye una estrategia de procesamiento que puede modificar las características de una matriz alimentaria y favorecer cambios en sus componentes. Por ello, resulta pertinente estudiar conjuntamente la incorporación de harina de *H. illucens* y el uso de cultivos de bacterias ácido-lácticas (BAL): *Lactobacillus brevis, Lactobacilus sanfranciscensis, Lactobacillus fermentum, Lactobacillus curvatus, entre otros. (*Arora, *et al.* 2021), sin asumir de antemano que estos tratamientos producirán un efecto funcional favorable. Aunque existen investigaciones sobre pastas enriquecidas con proteínas de insectos y sobre la actividad bioactiva de extractos de *H.*

illucens, es necesario ampliar la evidencia sobre el comportamiento de formulaciones de la pasta que integren harina de este insecto y fermentación, considerando tanto sus propiedades bioactivas como sus características tecnológicas.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo general determinar el potencial tecno-funcional de una pasta fermentada elaborada a base en *Hermetia illucens* y de este se desprenden los siguientes objetivos específicos: Formular y fermentar masas para pasta, caracterizar funcionalmente las masas fermentadas obtenidas y caracterizar tecno-funcionalmente las pastas formuladas. mediante la sustitución parcial de harina de trigo por harina de MSN, considerando diferentes niveles de sustitución y tratamientos de fermentación con *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112. Para ello, se evaluará la composición químico-proximal, el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, la actividad antioxidante mediante los ensayos $ABTS^{\cdot+}$, FRAP, y Actividad captadora de radicales hidroxilo ($OH^{\bullet}$), la inhibición de α-amilasa y α-glucosidasa, así como determinados parámetros de calidad física de la pasta y sus grupos funcionales por FTIR. La integración de estos análisis permitirá establecer si las formulaciones presentan características de interés y aportar evidencia para valorar el uso de *H. illucens* como ingrediente en el desarrollo de pastas alimentarias.

Materiales y métodos

Etapa 1: Formulación y fermentación de la masa para pasta

1.1. Obtención de las cepas bacterianas y harina de insecto. Se utilizarán las cepas *Bifidobacterium animalis subsp. lactis* BLC1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112 adquiridas de Sacco System s.r.l., (Cadorago, Italia). La larva de mosca soldado negra (MSN, *Hermetia illucens*) se obtendrá de MERCHTON S.A. de C.V. (San Pedro Tlaquepaque, Jalisco, México).

1.2. Elaboración de la harina de insecto. Las larvas de MSN se triturarán con ayuda de una licuadora y posteriormente se tamizará la harina con una malla de 40.

1.3. Diseño experimental. Se empleará un diseño experimental factorial completo de 4 × 3, con dos factores experimentales: el porcentaje de sustitución de harina de trigo por harina de MSN, con cuatro niveles (0, 5, 10, 15 % p/p), y el tratamiento de fermentación, con tres niveles: control sin inoculación bacteriana adicional, *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1 y *Lactiplantibacillus plantarum* BG112. El diseño comprenderá 12 combinaciones experimentales, cada una evaluada por triplicado mediante elaboraciones independientes, para un total de 36 unidades experimentales.

1.4. Activación de las cepas. Los cultivos liofilizados se reactivarán en caldo de Man, Rogosa y Sharpe (MRS; BD Difco®) suplementado con L-cisteína (0.05% p/v), según corresponda, e incubarán a (37°C, 24h) las cepas se subcultivarán en caldo

MRS utilizando un inóculo estándar del 1% (v/v) e incubarán a (37°, 18 h). Las células bacterianas se recuperarán por centrifugación (4500 rpm, 10 min, 4°C), se lavarán con una solución amortiguadora de fosfatos estéril (20 Mm, pH 7.2) y suspenderán a una concentración celular de 1×10^9 UFC/mL (inóculo estándar).

1.5 Análisis químico-proximal de las harinas. Se llevará a cabo mediantemétodos oficiales de la (*AOAC INTERNATIONAL). Latimer (2023).*

1.6. Fermentación de las formulaciones experimentales. Se prepararán doce formulaciones de masa, evaluando cuatro niveles de sustitución de *H. illucens*: 0%, 5%, 10% y 15% (p/p). Posteriormente se añadirá un inóculo estándar de *B. animalis subsp. lactis* BLC1 o *L. plantarum* BG112 A una proporción de inóculo de 15% (v/p) y fermentarán (37°C, 24 h).

2. Etapa 2: Caracterización de las masas fermentadas.

2.1. Preparación de los extractos. De acuerdo con Navarro del Hierro *et al.* (2021). Las muestras se liofilizarán y triturarán hasta obtener un polvo homogéneo. Se pesará 1 g de muestra y se añadirá etanol al 50% (v/v), en una relación muestra:solvente de 1:10 (p/v). La mezcla se dispersará durante 30 s y se someterá a una extracción asistida por ultrasonido (40 kHz, 20 min, 25 °C). Posteriormente se centrifugará (5,000 × g, 10 min, 4°C) y recuperará el sobrenadante. El solvente será eliminado mediante evaporación. El extracto se conservará a -20°C hasta su análisis.

2.2. Análisis químico-proximal de las masas. Las muestras de masa fermentada se analizarán con el mismo procedimiento que en el apartado 1.5. La caracterización de las bioactividades se realizará tomando como base las metodologías de Fois *et al.* (2019) y Aranda-Ledesma *et al.* (2022, 2024). A continuación se describen de forma resumida los procedimientos aplicables.

2.3. Determinación de Fenoles totales. Se mezclarán 0.25 µmL de extracto con 25 µL de reactivo Folin-Ciocalteu y 25 µL de carbonato de sodio al (75 g/L). La mezcla se incubará (40°C, 30 min). Posteriormente se añadirán 200 µL de agua destilada y medirá la absorbancia a 750 nm mediante un espectofotómetro UV-Vis. Finalmente el contenido fenólico se calculará mediante una curva de acumulación elaborada con ácido gálico y los resultados se representarán en (mg EAG/g).

2.4. Determinación de Flavonoides totales. Se mezclarán 31 µL de cada extracto con 9.3 µL de nitrito de sodio al 5% y 9.3 µL de agua destilada. Tras incubar (3 min, 40 °C), se añadirán 9.3 µL $AlCl_3$ al 10%, e incubarán (3 min, 40 °C). Por último se añadirán 125 µL de NaOH (0.5 $mol\cdot L^{-1}$), esta se mantendrá en la oscuridad 30 minutos. en un lector de microplazas y se estimará mediante una curva de quercentina.

2.5. Actividad captadora del radical $ABTS^{\cdot+}$*.* El radical se genera mezclando soluciones acuosas ABTS (7 $mmol \cdot L^{-1}$) con persulfato de potasio (2.45 $mmol \cdot L^{-1}$) en una proporción 2:1. Posteriormente se mezclarán 5 µL de solución de $ABTS^{\cdot+}$ y, se

medirá absorbancia de 734 nm tras 1 min de reacción. Los resultados se expresarán como equivalentes de Trolox.

2.6. Poder reductor férrico (FRAP). Se mezclarán 5 µL de extracto con 12 µL de tampón fosfato (1 mol · L^{-1}, pH 7) y 22 µL de ferricianuro de potasio al 1%. La mezcla se homogenizará e incubará (50 °C, 20 min).

2.7. Actividad captadora de radicales hidroxilo ($OH^{\bullet}$). Consiste en mezclar 200 µL de $FeSO_4$ (6 mmol · L^{-1}) y 200 µL de H_2O_2 (24 mmol · L^{-1}) y 400 µL de cada extracto. El volumen se completará a 2.5 mL con ácido salicílico (8 mmol · L^{-1}). Finalmente la mezcla se incubará (30 min, 37 °C) y se medirá la absorbancia a 510 nm. La actividad se expresará como porcentajede inhibición respecto a sus controles.

2.8. Inhibición de la α-amilasa. Se mezclarán 50 µL de cada extracto con 50 µL de la enzima pancreática porcina (1 mg · mL^{-1}), la cual deberá estar disuelta en tampón fosfato salino (pH 6.9). Tras incubar (37 °C durante, 10 min). Se añadirán 50 µL de una solución de almidón al 1% y se incubará durante 10 minutos más. La reacción se detendrá con reactivo DNS; la mezcla se calentará (100°C, 5 min) y se dejará enfriar. Después se añadirán 1.5 mL de agua y se medirá la absorvancia a 540 nm. La inhibición se calculará con respecto al contol.

2.9. Inhibición de la α-glucosidasa. Se combinará 100 µL de *α-glucosidasa* de *Saccharomyces cerevisiae* (1.0 U·ml^{-1}), 50 µL de *p*-nitrofenil glucopiranósido (*p* NPG) 3 mmol·L^{-1} disuelto en tampón fosfato (20 mmol·L^{-1}, pH 6.9). la mezcla se incubará (37°C, 20 min) y se detendrá con 500 µL de carbonato de sodio (1 mol·L^{-1}). La absorbancia se medirá a 405 nm y la inhibición se expresará como porcentaje respecto al control.

2.10. Análisis de grupos funcionales mediante FTIR. Las muestras se analizarán con un espectrómetro Agilent Cary 630 en un intervalo de 4000 a 650 cm^{-1} con 32 barridos y resolución de 2 cm^{-1}. Los espectros se procesarán con MicroLab PC v5.7 y se graficarán en OriginPro 8.

2.11. Grado de hidrólisis mediante OPA y contenido protéico. El grado de hidrólisis se estimará mediante cuantificación de grupos amino libres con el método OPA. Se mezclarán 500 µL de ácido tricloroacético al 24% (v/v) y dejar a reposo 10 min. Después pasará a centrifugación a (3 600 × g, 40 min) y el sobrenadante se utilizará para el análisis; mezclando 20 µL de extracto con 200 µL de reactivo OPA e incubar por 2 min en la oscuridad; la fluorescencia se medirá a 340 nm de excitación y 436 nm de emisión.

3. Etapa 3: Caracterización tecnofuncional de las pastas formuladas

3.1. Elaboración de la pasta. Se seleccionarán las masas fermentadas con mejores resultados en la caracterización químico-funcional. Las masas se moldearán en forma de *fetuccini*, con una cortadora de dimensiones (20.4 cm × 14.5 cm y se secarán (40°C, 24 h). Se realizarán los análisis descritos en la Etapa 2 para caracterizar el producto final.

3.2. Color. Según la metodología de Hidalgo, *et al.* (2023) se analizará según el sistema CIELAB registrando los parámetros L* (luminosidad), a*(verde-rojo) y b* (azul-amarillo) en tres puntos diferentes.

3.3. Resistencia a la rotura de la pasta seca. Se utilizará un analizador de textura EZ-LX (Shimadzu, Kyoto, Japón), controlado mediante el software TrapeziumX v. 1.5.2. Se colocará una pieza de pasta seca de 100 mm de longitud sobre apoyos separados de 16 mm y se aplicará fuerza mediante una cuchilla de aluminio de 80 mm de ancho y 2.5 mm de espesor, a 0.5 $mm \cdot s^{-1}$, hasta provocar su fractura, registrando la fuerza máxima en newtons (N). de acuerdo a Galkowska, *et al.* (2022).

3.4 Firmeza de la pasta cocida mediante cizallamiento. Se medirá mediante un analizador de textura Stable Micro Systems TA.XTplus equipado con una cuchilla apropiada para productos tipo pasta. Se evaluarán cinco piezas de pasta cocida, colocadas individualmente bajo la cuchilla se registrará la fuerza máxima necesaria para cortar la muestra, siguiendo a Duda *et al.* (2019).

4*. Análisis de datos*. Se utilizará un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores para evaluar los efectos del porcentaje de sustitución, el tratamiento de fermentación y su interacción. Cuando corresponda y se cumplan los supuestos estadísticos, se aplicará la prueba de comparación múltiplde de Turkey. Con base a los resultados, se seleccionarán la formulación control y la formulación inoculada con la bacteria con mejor desempeño para elaborar la pasta *fetuccini*. Las propiedades tecnofuncionales se evaluarán por triplicado mediante elaboraciones independientes. Los resultados se analizarán estadísticamente para comparar las propiedades de la pasta elaborada con la formulación fermentada seleccionada.

Plan de trabajo y calendarización

Tabla 1. Cronograma de actividades

ACTIVIDAD / AÑO	2026		2027	
	Ago Dic	Ener Jun	Ago Dic	Ene Jun
Definición del tema del proyecto	x			
Redacción del anteproyecto	x			
1er Seminario	x			
Caracterización fisicoquímica		x		
Fermentación		x	x	
Análisis de resultados		x	x	x
2do Seminario		x		
3er Seminario			x	
4to Seminario				x
Redacción de tesis	x	x	x	x
Titulación				x

Fechas consideradas para realizar cada etapa del proyecto.

Desglose financiero

Este proyecto será financiado por el Programa de Apoyo a la Investigación y Divulgación Científica y Humanística de la

Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL – 156 – BYQ-2026).

Agradecimientos

Agradecemos al proyecto UANL – 156-BYQ-2026 por el financiemiento y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada.

Referencias bibliográficas

Álvarez, J., Fernández-Real, J. M., Guarner, F., Gueimonde, M., Rodríguez, J. M., Saenz de Pipaon, M., & Sanz, Y. (2021). Microbiota intestinal y salud. *Gastroenterología y Hepatología, 44*(7), 519–535.

Aranda-Ledesma, N. E., González-Hernández, M. D., Rojas, R., Paz-González, A. D., Rivera, G., Luna-Sosa, B., & Martínez-Ávila, G. C. G. (2022). Essential oil and polyphenolic compounds of *Flourensia cernua* leaves: Chemical profiling and functional properties. *Agronomy, 12*(10), Article 2274.

Arora, K., Ameur, H., Polo, A., Di Cagno, R., Rizzello, C. G., & Gobbetti, M. (2021). Thirty years of knowledge on sourdough fermentation: A systematic review. Trends in Food Science & Technology, 108, 71–83. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.008

Ballesteros, M. D., & González, E. (2020). Role of prebiotics and probiotics in the functionality of the microbiota in patients receiving enteral nutrition. *Nutrición Hospitalaria, 35*(Spe. 2).

Bottacini, F., Dal Bello, F., Turroni, F., Milani, C., Duranti, S., Foroni, E., Viappiani, A., Strati, F., Mora, D., van Sinderen, D., & Ventura, M. (2011). Complete genome sequence of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BLC1. *Journal of Bacteriology, 193*(22), 6387–6388.

Brai, A., Pasqualini, C., Poggialini, F., Vagaggini, C., & Dreassi, E. (2025). Insects as a source of nutraceuticals with antioxidant, antihypertensive, and antidiabetic properties: Focus on species approved in Europe up to 2024. *Foods, 14*(8), Article 1383.

Campo-Moreno, R. del, Alarcón-Cavero, T., D'Auria, G., Delgado-Palacio, S., & Ferrer-Martínez, M. (2018). Microbiota en la salud humana: Técnicas de caracterización y transferencia. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica, 36*(4), 241–245.

Combalia, A., Morgado-Carrasco, D., Fustà-Novell, X., & Mascaró-Galy, J. M. (2018). Abdominal violaceous skin lesions of a 47-year-old woman following a geometric pattern. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica, 36*(9), 598–599.

Corzo, N., Alonso, J. L., Azpiroz, F., Calvo, M. A., Cirici, M., Leis, R., Lombó, F., Mateos-Aparicio, I., Plou, F. J., Ruas-Madiedo, P., Rúperez, P., Redondo-Cuenca, A., Sanz, M. L., & Clemente, A. (2015). Prebióticos: Concepto, propiedades y efectos beneficiosos. *Nutrición Hospitalaria, 31*(Suppl. 1), 99–118.

Draszanowska, A., Czarnowska-Kujawska, M., Paszczyk, B., Starowicz, M., &

Olszewska, M. A. (2025). The potential of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae in whole wheat bread production: Effects on physicochemical, antioxidant, and sensory properties. *Foods, 14*(21), Article 3686.

Duda, A., Adamczak, J., Chełmińska, P., Juszkiewicz, J., & Kowalczewski, P. (2019). Quality and nutritional/textural properties of durum wheat pasta enriched with cricket powder. *Foods, 8*(2), Article 46.

Fan, Y., & Pedersen, O. (2021). Gut microbiota in human metabolic health and disease. *Nature Reviews Microbiology, 19*(1), 55–71.

Fois, S., Campus, M., Piu, P. P., Siliani, S., Sanna, M., Roggio, T., & Catzeddu, P. (2019). Fresh pasta manufactured with fermented whole wheat semolina: Physicochemical, sensorial, and nutritional properties. *Foods, 8*(9), Article 422.

Gałkowska, D., Witczak, T., & Pycia, K. (2022). Quality characteristics of novel pasta enriched with non-extruded and extruded blackcurrant pomace. *Molecules, 27*(23), Article 8616.

Latimer, G. W., Jr. (Ed.). (2023). Official methods of analysis of AOAC INTERNATIONAL (22nd ed.). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001

Valorización de productos hortofrutícolas no comercializables mediante fermentación con *Lactiplantibacillus plantarum* para la obtención de un ingrediente alimentario con potencial bioactivo

Myriam Guadalupe Cortes-Montelongo*; Pablo Alan Rodríguez-Salinas; Gerardo Méndez-Zamora; Cynthia Alvarez-Torres; Sugey Ramona Sinagawa-García.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399
*Email: myriam.cortesm@uanl.edu.mx

Resumen. El aprovechamiento de frutas y hortalizas no comercializables, es decir, fuera de especificación comercial representa una alternativa para reducir las pérdidas de alimentos y valorizar materias primas con potencial nutricional y funcional. En este contexto, la fermentación láctica constituye alternativas de procesamiento que pueden modificar las propiedades fisicoquímicas y el contenido de compuestos bioactivos de matrices hortofrutícolas. El objetivo de esta investigación es valorizar una matriz mixta elaborada de tomate, fresa, pimiento morrón rojo, frambuesa y manzana roja (tonalidades rojas) no comercializables mediante fermentación con *Lactiplantibacillus plantarum*, evaluando los cambios en sus propiedades fisicoquímicas, el contenido de compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante, para obtener un ingrediente alimentario con potencial bioactivo. Para ello, se preparará una matriz homogénea y se realizará su caracterización inicial mediante parámetros fisicoquímicos (pH, sólidos solubles totales, acidez titulable), evaluación nutraceutica (compuestos fenólicos totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante mediante DPPH, ABTS y FRAP) y caracterización de compuestos por HPLC. Posteriormente, se realizará la fermentación láctica con *Lactiplantibacillus plantarum*, monitoreando cambios fisicoquímicos y viabilidad de bacterias ácido-lácticas. Finalmente, el material fermentado se liofilizará y se evaluarán sus características físicas y nutracéuticas.
Palabras clave: frutas y hortalizas fuera de especificación comercial, fermentación láctica, *Lactiplantibacillus plantarum*, liofilización, compuestos bioactivos.

Abstract. The utilization of non-marketable fruits and vegetables, that is, those that do not meet commercial specifications, represents an alternative for reducing food losses and adding value to raw materials with nutritional and functional potential. In this context, lactic fermentation constitutes a processing alternative that can modify the physicochemical properties and bioactive compound content of fruit and vegetable matrices. The objective of this research is to valorize a mixed matrix prepared from non-marketable red-colored fruits and vegetables, namely tomato, strawberry, red bell pepper, raspberry, and red apple, through fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum*, evaluating changes in its physicochemical properties, bioactive compound content, and antioxidant capacity to obtain a food ingredient with bioactive potential. To this end, a homogeneous matrix will be prepared and initially characterized using physicochemical parameters (pH, total soluble solids, and titratable acidity) and nutraceutical indicators (total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant capacity measured using DPPH, ABTS, and FRAP assays) and characterization of compounds by HPLC. Subsequently, lactic fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* will be carried out, monitoring physicochemical changes and

lactic acid bacteria viability. Finally, the fermented material will be freeze-dried, and its physical and nutraceutical characteristics will be evaluated.
Keywords: Fruits and vegetables outside commercial specifications, Lactic acid fermentation, *Lactiplantibacillus plantarum*, Freeze-drying, Bioactive compounds.

Introducción

El crecimiento de la población mundial y la creciente demanda de alimentos han intensificado los retos asociados con las pérdidas y el desperdicio de alimentos a lo largo de la cadena de suministro agroalimentaria. Dentro de este contexto, las frutas y hortalizas representan uno de los grupos de alimentos particularmente susceptibles a pérdidas debido a su alta tasa de deterioro y a los cambios de calidad que experimentan durante las etapas de producción, distribución y comercialización. Se estima que aproximadamente el 14 % de los alimentos producidos a nivel mundial se pierde entre la etapa posterior a la cosecha y la venta minorista, lo que representa no solo pérdidas económicas para el sector agroalimentario, sino también un uso ineficiente de los recursos empleados para su producción y potenciales impactos ambientales asociados con su disposición (Zhu *et al*., 2023).

Los productos hortofrutícolas fuera de especificación comercial son aquellos que no cumplen con determinados criterios de calidad establecidos para su comercialización, como el tamaño, la forma, la coloración o la presencia de imperfecciones superficiales. Estas características pueden limitar su aceptación en los mercados, aunque no necesariamente impliquen una pérdida proporcional de su valor nutricional. La valorización de estos materiales constituye una alternativa para aprovecharlos mediante su transformación en productos de valor agregado, favoreciendo un uso más eficiente de las materias primas y contribuyendo a los principios de la economía circular (Râpă *et al*., 2024). Asimismo, pueden conservar compuestos de interés nutricional y funcional, como fibra dietética, compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides y otros metabolitos secundarios, lo que representa una oportunidad para su aprovechamiento (Domínguez *et al*., 2026).

Estudios previos realizados por Yang *et al*. (2018) estudiaron una bebida a base de manzana, pera y zanahoria fermentada con dos cepas de *Lactiplantibacillus plantarum*. Durante el proceso observaron una disminución del pH de 6.75 a 3.56, así como un incremento temporal en el contenido de fenoles y flavonoides totales y en la capacidad antioxidante. Los fenoles totales alcanzaron su valor máximo al octavo día de fermentación, con 121 mg/L, frente a 96.8 mg/L en la bebida sin fermentar; de manera similar, la actividad antioxidante determinada mediante DPPH llegó a un máximo de 58.7 % en ese mismo periodo. Estos resultados evidencian que la fermentación de matrices mixtas de frutas y hortalizas con *L. plantarum* puede modificar sus propiedades fisicoquímicas y bioactivas, aunque la magnitud y dirección de los cambios dependen del tiempo de fermentación y de las características de la matriz.

Por otra parte, Bas-Bellver *et al*. (2023) estudiaron el efecto de la fermentación con *Lactiplantibacillus plantarum* sobre las propiedades antioxidantes y el comportamiento de secado de tallos de brócoli destinados a la obtención de ingredientes en polvo. Después de 24 horas de fermentación, observaron un incremento significativo en el contenido de flavonoides totales y en la capacidad antioxidante determinada mediante los métodos DPPH y ABTS, mientras que el contenido total de fenoles no presentó cambios significativos. Asimismo, el pretratamiento fermentativo redujo el tiempo necesario para el secado con aire caliente. Aunque los resultados dependieron de las condiciones de procesamiento, este estudio demuestra que la fermentación puede modificar las propiedades antioxidantes de una matriz vegetal e influir en su transformación en un ingrediente en polvo.

En una investigación más específica, Tuerhong *et al*. (2024) evaluaron 13 cepas de *Lactiplantibacillus plantarum* como cultivos iniciadores para la fermentación de zumo de tomate. Después de 22 horas de fermentación, observaron modificaciones en el pH y el contenido de sólidos solubles, así como diferencias entre las cepas en la actividad de la enzima superóxido dismutasa (SOD) y en la capacidad antioxidante determinada mediante ABTS. Estos hallazgos evidencian que la fermentación de tomate con *L. plantarum* puede modificar sus propiedades fisicoquímicas y antioxidantes, y que la respuesta depende de la cepa utilizada.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar los cambios en las propiedades fisicoquímicas, el contenido de compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante de una matriz mixta de frutas y hortalizas de tonalidades rojas que no cumplen con las especificaciones comerciales de apariencia, pero que son aptas para su procesamiento. La matriz estará integrada por tomate (*Solanum lycopersicum*), fresa (*Fragaria* × *ananassa*), pimiento rojo (*Capsicum annuum*), frambuesa (*Rubus idaeus*) y manzana roja (*Malus domestica*), y será sometida a fermentación láctica con *Lactiplantibacillus plantarum*. Posteriormente, se recuperará la fracción sólida para su liofilización y transformación en un ingrediente alimentario en polvo. La caracterización del material comprenderá la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas y nutricionales, la determinación del contenido de compuestos fenólicos y flavonoides totales, la evaluación de la capacidad antioxidante mediante ensayos in vitro y la caracterización mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

Objetivo General:

Evaluar el efecto de la fermentación láctica con *Lactiplantibacillus plantarum* sobre las propiedades fisicoquímicas y nutracéuticas de una matriz mixta de frutas y hortalizas de tonalidades rojas fuera de especificación comercial, para obtener un ingrediente alimentario en polvo con potencial bioactivo mediante liofilización.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas (pH, sólidos solubles totales y acidez titulable) y el

contenido de compuestos nutracéuticos (fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante mediante DPPH, ABTS y FRAP) de la matriz hortofrutícola mixta antes de la fermentación.

- Estandarizar el proceso de fermentación láctica de la matriz mixta con *Lactiplantibacillus plantarum* mediante el seguimiento de diferentes tiempos de fermentación, monitoreando la evolución del pH, la acidez titulable y la viabilidad de las bacterias ácido-lácticas.
- Determinar la evolución de la calidad nutracéutica de la matriz durante la fermentación mediante la cuantificación de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante por los métodos DPPH, ABTS y FRAP, con el propósito de establecer el tiempo óptimo del proceso.
- Caracterizar el ingrediente alimentario en polvo obtenido mediante liofilización, considerando sus propiedades fisicoquímicas, el contenido de compuestos bioactivos y su perfil de compuestos de interés mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

Materiales y métodos

La presente investigación se desarrollará en tres etapas experimentales, orientadas a evaluar los cambios en las propiedades fisicoquímicas y nutracéuticas de una matriz mixta elaborada con frutas y hortalizas de color rojo fuera de especificación comercial, sometida a fermentación láctica con *Lactiplantibacillus plantarum* y posterior liofilización.

Etapa I. Selección, acondicionamiento y caracterización inicial de la matriz mixta

1.1 Obtención de las materias primas. Se utilizarán tomate (*Solanum lycopersicum*), fresa (*Fragaria* × *ananassa*), pimiento morrón rojo (*Capsicum annuum*), frambuesa (*Rubus idaeus*) y manzana roja (*Malus domestica*), adquiridos en el Mercado de Abastos de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Se seleccionarán ejemplares con características estéticas fuera de las especificaciones comerciales, pero aptos para su procesamiento.

1.2 Selección y acondicionamiento de las materias primas. Las materias primas se inspeccionarán visualmente y se excluirán aquellas con signos de descomposición, deterioro avanzado o contaminación visible. Posteriormente, se transportarán al laboratorio bajo refrigeración, se lavarán con agua potable y se desinfectarán con una solución de hipoclorito de sodio de uso alimentario. Las condiciones de desinfección se establecerán conforme a las indicaciones del fabricante y al procedimiento del laboratorio, tomando como referencia la FDA (1998).

1.3 Preparación y homogeneización de la matriz mixta. Las materias primas se cortarán y procesarán conjuntamente mediante homogeneización mecánica hasta obtener una mezcla uniforme. Las proporciones de los cinco ingredientes se definirán durante la formulación

experimental y se mantendrán constantes entre las unidades experimentales. La preparación se fundamentará en estudios previos sobre fermentación de matrices mixtas de frutas y hortalizas (Kim *et al*., 2019; Yang *et al*., 2018).

1.4 Caracterización inicial de la matriz mixta. Antes de la fermentación, se determinarán el pH mediante método potenciométrico, los sólidos solubles totales por refractometría, tomando como referencia la norma ISO 2173:2003, y la acidez titulable mediante titulación con NaOH 0.1 M hasta pH 8.1, con base en AOAC Official Method 942.15.

Para la evaluación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, se prepararán extractos a partir de 0.5 g de muestra y 10 mL de metanol acuoso al 80 %. La mezcla se homogeneizará durante 2 min y se centrifugará a 3500 rpm durante 10 min; el sobrenadante se utilizará para los análisis (Benavides Martín, 2019).

Los polifenoles totales se determinarán mediante el método de Folin-Ciocalteu, con lectura espectrofotométrica a 765 nm, y los flavonoides totales mediante el método colorimétrico con cloruro de aluminio, con lectura a 440 nm (Benavides Martín, 2019; Feng *et al*., 2020; Jiang *et al*., 2022). La capacidad antioxidante se evaluará mediante los ensayos DPPH, ABTS y FRAP, siguiendo las metodologías de Yang *et al*. (2018), Re *et al*. (1999) y Benzie y Strain (1996), respectivamente.

Etapa II. Fermentación láctica de la matriz mixta

2.1 Preparación del inoculo bacteriano. Se utilizará una cepa de *Lactiplantibacillus plantarum* proporcionada por el laboratorio, cuya activación se realizará en caldo MRS (de Man, Rogosa y Sharpe). Como referencia inicial, se considerarán las condiciones descritas por Yang *et al*. (2018): 35 °C, 100 rpm y 12 h. Antes de la inoculación, se determinará la concentración de células viables del cultivo.

2.2 Inoculación y fermentación de la matriz mixta. La matriz homogeneizada se distribuirá en matraces Erlenmeyer y se inoculará con el cultivo bacteriano previamente preparado. La fermentación se realizará bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo. Se considerarán inicialmente 37 °C y 24 h, con base en Rizzi *et al*. (2024).

2.3 Seguimiento de la fermentación. Durante el proceso fermentativo se monitorearán el pH, la acidez titulable y la viabilidad de las bacterias ácido-lácticas. El pH se determinará por método potenciométrico y la acidez titulable mediante titulación con NaOH estandarizado. La viabilidad bacteriana se evaluará mediante diluciones seriadas y recuento en placa utilizando agar MRS; los resultados se expresarán como log UFC/mL, tomando como referencia Rizzi *et al*. (2024).

2.4 Evaluación de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante. Al finalizar la fermentación, se determinarán los polifenoles totales, los flavonoides totales y la capacidad antioxidante mediante los ensayos DPPH, ABTS y FRAP, utilizando los procedimientos

establecidos para la caracterización inicial. Los resultados se compararán con los de la matriz inicial y con los de una matriz sin inocular mantenida bajo condiciones equivalentes de tiempo y temperatura.

Etapa III. Liofilización y caracterización del producto obtenido

3.1 Separación y recuperación del residuo sólido. Al concluir la fermentación, se separarán las fracciones líquida y sólida mediante un procedimiento de separación sólido-líquido que se definirá de acuerdo con las características de la matriz y las indicaciones de la directora del proyecto. La fracción sólida recuperada se reservará para su acondicionamiento y liofilización.

3.2 Congelación y liofilización del residuo sólido. La fracción sólida se acondicionará, congelará y someterá a liofilización. Como referencia inicial, se considerará el procedimiento descrito por Bas-Bellver *et al*. (2023) para materiales vegetales fermentados, que incluye congelación a −40 °C durante 24 h y liofilización bajo condiciones controladas de temperatura y presión. Los parámetros definitivos se ajustarán al equipo disponible y a las características de la muestra.

3.3 Molienda y almacenamiento del polvo liofilizado. El material liofilizado se triturará hasta obtener un polvo homogéneo y, si es necesario, se tamizará para uniformar el tamaño de partícula. Posteriormente, se almacenará en recipientes herméticos, protegidos de la luz y la humedad, hasta su caracterización, tomando como referencia Bas-Bellver *et al*. (2023).

3.4 Determinación del rendimiento de la obtención del polvo. Se propone registrar la masa del residuo sólido antes de la liofilización y la masa del polvo recuperado después del proceso, con la finalidad de estimar el rendimiento de obtención del producto deshidratado. Esta determinación quedará sujeta a la aprobación de la directora del proyecto.

El rendimiento se calculará mediante la siguiente expresión:

$$Rendimiento\ (\%)\ \frac{m\ polvo\ recuperado}{m\ residuo\ humedo\ inicial}\ x100$$

Abreviaturas:

$m_{polvo\ recuperado}$: masa final del polvo liofilizado (g).

$m_{residuo\ humedo\ inicial}$: masa del residuo solido antes de la liofilización (g).

3.5 Caracterización fisicoquímica del polvo liofilizado. Se determinará el contenido de humedad mediante un método gravimétrico y, si se dispone del equipo, la actividad de agua. Asimismo, se evaluarán el pH y la acidez titulable en una suspensión del polvo en agua destilada, mediante procedimientos adaptados a matrices vegetales.

3.6 Determinación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante del polvo. El polvo liofilizado se analizará para determinar el contenido de polifenoles totales y flavonoides totales, así como su capacidad antioxidante mediante el ensayo DPPH. Asimismo, se realizará la caracterización de compuestos de interés mediante cromatografía líquida de alta

resolución (HPLC), de acuerdo con los métodos analíticos y el equipamiento disponibles. La determinación de vitamina C y β-caroteno se considerará en función de la viabilidad analítica.

Plan de trabajo y calendarización

En el siguiente cuadro se muestra la propuesta del plan de trabajo para el periodo de dos años de investigación.

Cuadro 1. Cronograma de actividades

ACTIVIDAD / AÑO	2026		2027		2028	
	Ago	Dic	Ene	Jun	Ago	Dic	Ene	Jun
Definición del tema del proyecto	x							
Redacción del anteproyecto	x							
1er Seminario	x							
Recolección de materia prima	x							
Caracterización inicial de la matriz			x					
Fermentación láctica y seguimiento			x		x			
2do seminario			x					
Separación y recuperación del residuo sólido					x			
Liofilización y molienda					x			
Caracterización del polvo y compuestos bioactivos					x			
3er seminario					x			
Análisis estadístico							x	
Redacción de tesis							x	
4to Seminario							x	
Titulación							x	

Desglose financiero

El desarrollo del proyecto requerirá recursos económicos destinados a la adquisición de materias primas (tomate, fresa, pimiento morrón rojo, frambuesa y manzana roja), reactivos químicos para la caracterización fisicoquímica y nutracéutica, materiales microbiológicos para el cultivo de *Lactiplantibacillus plantarum*, así como consumibles de laboratorio.

Asimismo, se considerarán los recursos necesarios para el procesamiento de las muestras, incluyendo la separación de fracciones, congelación, liofilización y molienda, además de los materiales y reactivos requeridos para los análisis espectrofotométricos y cromatográficos (HPLC).

Se contempla el uso de la infraestructura y los equipos disponibles en los laboratorios de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Los costos específicos dependerán de la disponibilidad de insumos y de los servicios analíticos requeridos durante el desarrollo experimental.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado mediante la beca de posgrado para la realización de los estudios de maestría

Referencias bibliográficas

Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2023). Impact of fermentation pretreatment on drying behaviour and antioxidant attributes of broccoli waste powdered ingredients. Foods, 12(19), Article 3526. https://doi.org/10.3390/foods12193526

Benavides Martín, M. A. (2019). Aplicación de la fermentación láctica como estrategia de transformación y valoración de matrices vegetales [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-330134

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. Analytical Biochemistry, 239(1), 70–76. https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292

Domínguez, I., Astudillo-Pascual, M., Tudor, R., del Río, J. L., Ortiz-Somovilla, V., & Cantos-Villar, E. (2026). From waste to nutrition: Valorization strategies for surplus and ugly produce within the Food Use and Waste Hierarchy. Frontiers in Nutrition, 13, 1868657. https://doi.org/10.3389/fnut.2026.1868657

Feng, Y., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2020). LC-ESI-QTOF/MS characterization of bioactive compounds from black spices and their potential antioxidant activities. Journal of Food Science and Technology, 57(12), 4671–4687. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04504-4

International Organization for Standardization. (2003). Fruit and vegetable products—Determination of soluble solids—Refractometric method (ISO Standard No. 2173:2003). https://www.iso.org/standard/35851.htm

Jiang, Y., Subbiah, V., Wu, H., Bk, A., Sharifi-Rad, J., & Suleria, H. A. R. (2022). Phenolic profiling of berries waste and determination of their antioxidant potential. Journal of Food Quality, 2022, Article 5605739. https://doi.org/10.1155/2022/5605739

Kim, J., Choi, K.-B., Park, J. H., & Kim, K. H. (2019). Metabolite profile changes and increased antioxidative and antiinflammatory activities of mixed vegetables after fermentation by Lactobacillus plantarum. PLOS ONE, 14(5), e0217180. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217180

Râpă, M., Darie-Niță, R. N., & Coman, G. (2024). Valorization of fruit and vegetable waste into sustainable

and value-added materials. Waste, 2(3), 258–278. https://doi.org/10.3390/waste2030015

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, 26(9–10), 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3

Rizzi, F., Juan, B., Espadaler-Mazo, J., Capellas, M., & Huedo, P. (2024). Lactiplantibacillus plantarum KABP051: Stability in fruit juices and production of bioactive compounds during their fermentation. Foods, 13(23), Article 3851. https://doi.org/10.3390/foods13233851

Tuerhong, N., Wang, L., Cui, J., Shataer, D., Yan, H., Dong, X., Gao, Z., Zhang, M., Qin, Y., & Lu, J. (2024). Targeted screening of Lactiplantibacillus plantarum strains isolated from tomatoes and its application in tomato fermented juice. Foods, 13(22), Article 3569. https://doi.org/10.3390/foods13223569

U.S. Food and Drug Administration. (1998, October). Guidance for industry: Guide to minimize microbial food safety hazards for fresh fruits and vegetables. https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/guidance-industry-guide-minimize-microbial-food-safety-hazards-fresh-fruits-and-vegetables

Yang, X., Zhou, J., Fan, L., Qin, Z., Chen, Q., & Zhao, L. (2018). Antioxidant properties of a vegetable–fruit beverage fermented with two Lactobacillus plantarum strains. Food Science and Biotechnology, 27(6), 1719–1726. https://doi.org/10.1007/s10068-018-0411-4

Zhu, Y., Luan, Y., Zhao, Y., Liu, J., Duan, Z., & Ruan, R. (2023). Current technologies and uses for fruit and vegetable wastes in a sustainable system: A review. Foods, 12(10), Article 1949. https://doi.org/10.3390/foods12101949

Extracción secuencial y caracterización de fitoquímicos de xoconostle *(Opuntia joconostle)*

Lizde Azarel-Guzman-Guzman[1*]; Julia Mariana Márquez Reyes; Nancy del Pilar Medina Herrera; Romeo Rojas Molina; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez Ávila.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399. *Email: lizde.guzmang@uanl.edu.mx

Resumen. El xoconostle *(Opuntia joconostle)* es una fuente potencial de compuestos fitoquímicos con diversas aplicaciones en la industrialimentaria. El objetivo de esta etapa fue obtener extractos crudos, realizar una purificación y extraer fracciones enriquecidas en compuestos polifenólicos a partir de la pulpa y la cáscara del xoconostle, para evaluar su actividad antioxidante y capacidad reductora. El material fue recolectado en Tasquillo Hidalgo, se separó en pulpa y cáscara, se secó, molió y tamizó. Las muestras fueron sometidas a doble extracción con etanol al 50% para obtener extracto crudo, posteriormente se purificaron usando una columna con amberlita y para obtener polifenoles purificados. Se evaluó la actividad antioxidante frente los radicales $ABTS^{\bullet+}$ y la capacidad reductora mediante la técnica de Folin-Ciocateu. La pulpa presentó un rendimiento de extracto crudo de 2.22 ± 0.61 g y la cáscara de 2.01 ± 0.61 g. La recuperación de compuestos purificados fue de 61.200 ± 15.44 mg para pulpa y 87.375 ± 15.62 mg para cáscara. Los polifenoles de la cáscara tuvieron una mayor actividad antioxidante, a una concentración de 1000 ppm (128.345 ± 11.06 TEµ.mL^{-1}) y la capacidad reductora fue de 224.803 ± 50.7 equivalente en µL GAE.mL^{-1}. Los resultados muestran diferencias entre las fracciones de pulpa y cáscara, pero ambas respaldan que la especie es fuente potencial de compuestos bioactivos.
Palabras clave: Xoconostle, fitoquímicos, actividad antioxidante, capacidad reductora

Abstract. Xoconostle *(Opuntia joconostle)* is a potential source of phytochemical compounds with diverse applications in the food industry. The objective of this stage was to obtain crude extracts, perform purification, and isolate fractions enriched in polyphenolic compounds from the pulp and peel of the xoconostle, to evaluate their antioxidant activity and reducing capacity. The material was collected in Tasquillo, Hidalgo; it was separated into pulp and peel, then dried, ground, and sieved. The samples underwent a double extraction process using 50% ethanol to obtain crude extracts, which were subsequently purified using an Amberlite column to isolate polyphenols. Antioxidant activity was evaluated against ABTS•+ radicals, and reduced capacity was assessed using the Folin-Ciocalteu technique. The crude extract yield was 2.22 ± 0.61 g for the pulp and 2.01 ± 0.61 g for the peel. The recovery of purified compounds was 61.200 ± 15.44 mg for the pulp and 87.375 ± 15.62 mg for the peel. Polyphenols from the peel exhibited higher antioxidant activity at a concentration of 1000 ppm (128.345 ± 11.06 TEµ.mL^{-1}), with a reducing capacity of 224.803 ± 50.7 µL GAE mL^{-1} equivalent. The results indicate differences between the pulp and peel fractions; however, both confirm that this species is a potential source of bioactive compounds.
Keywords: Xoconostle, phytochemicals, antioxidant activity, reducing capacity

Introducción

La especie de xoconostle de nombre científico *Opuntia joconostle* pertenece a la familia cactaceae, la cual comprende un grupo diverso de especies que se desarrollan principalmente en regiones áridas y semiáridas de México (SEMARNAT 2017). El xoconostle destaca por su sabor ácido, este fruto está conformado por pericarpio, mesocarpio y endocarpio (Alaiz *et al*. 2025). A diferencia de otras tunas, el xoconostle presenta características particulares de composición y aprovechamiento alimentario, por lo que representa un recurso vegetal de interés para el estudio de sus propiedades nutricionales y fitoquímicas (Osorio *et al*. 2011). Desde el punto de vista nutricional, el xoconostle constituye una fuente de componentes como carbohidratos, fibra dietética, ácidos orgánicos, vitaminas y proteínas. Arias *et al. (*2020) también reportaron contenidos de fibra dietética total de 30.8 ± 0.7, al igual que identificaron cantidades importantes de compuestos fenólicos totales, con una concentración de 1580.3 ± 33.1 mg equivalente de ácido gálico (GAE)/100 g de materia seca. Estos resultados destacan el potencial del xoconostle como fuente de componentes nutricionales y compuestos bioactivos que pueden ser aprovechados por la sociedad mediante los alimentos. Alaiz *et al.* (2025) estudiaron la composición química de la cáscara y la pulpa de este fruto, y reportaron que la pulpa presentó un contenido proteico de hasta 11.91% en la pulpa, mientras que entre los aminoácidos predominantes se identificaron; ácido aspártico, ácido glutámico y alanina. Por otro lado, Osorio *et al*. (2011) estudiaron la distribución de compuestos fenólicos y pigmentos en las diferentes partes del fruto, e identificaron siete compuestos fenólicos, entre ellos destacan los ácidos protocatecuico, 4-hidroxibenzoico, cafeico, vanílico y siríngico, así como rutina y quercetina. Asimismo, observaron diferencias en el contenido de fenoles y flavonoides totales entre las fracciones, encontrando las concentraciones más elevadas en el pericarpio. Estos hallazgos demuestran que la distribución de fitoquímicos no es homogénea en el fruto y resaltan la importancia de considerar cada una de su estructura durante su caracterización. La actividad antioxidante constituye otro aspecto importante en la caracterización de los compuestos bioactivos. Esta propiedad se relaciona con la capacidad de determinados compuestos para neutralizar especies reactivas mediante diferentes mecanismos de transferencia de electrones o átomos de hidrógeno. Los principales metabolitos secundarios que dan pie a la actividad antioxidante son los compuestos fenólicos y las betalainas, debido a sus características estructurales, Osorio *et al*. (2011) reportaron que los extractos metabólicos y las fracciones parcialmente purificadas de *Opuntia joconostle* presentaron este tipo de actividad, particularmente las muestras que pertenecen al pericarpio del fruto. De acuerdo con Castro *et al*. (2025) las especies de *Opuntia* presentan una elevada actividad antioxidante, evaluada mediante los ensayos de captación de radicales $DPPH^{\bullet}$ y $ABTS^{\bullet+}$, esto podría ser la base para una revalorización de este tipo de especies.

En este contexto, la investigación se desarrolla bajo un enfoque de

aprovechamiento integral de xoconostle, mediante la obtención, caracterización y evaluación de compuestos bioactivos como ingredientes funcionales.

Objetivo General:

Implementar un proceso que permita recuperar metabolitos del xoconostle (*Opuntia joconostle*) para su aplicación como ingredientes funcionales y en el desarrollo en alimentos con potencial funcional.

Es por eso, en esta etapa de la investigación se centró en la extracción de y purificación de algunos compuestos bioactivos, para evaluar su actividad antioxidante y capacidad reductora.

Materiales y Métodos

Materiales

Material vegetal: Se recolectaron frutos de *Opuntia joconostle* a principios de su madurez, en el mes de julio, de poblaciones silvestres a 1716 metros sobre el nivel del mar, en Tasquillo (Hidalgo, México) (20°32′15″N 99°22′10″O), se encuentra en la región geográfica del Valle del Mezquital. Los frutos se cortaron a lazar de los cladodios, evitando perjudicar el pedúnculo, las espinas fueron retiradas y posteriormente se guardaron en hieleras con bolsas de gel congelado para conservar una temperatura adecuada (25°C), para después ser trasladados.

Los xoconostles se lavaron, se separó la pulpa de la cáscara. La pulpa se trituró manualmente y se secó a 60 °C en una estufa de convección por 22 horas, se hizo una doble trituración, primero en licuadora convencional, después en un molino, el material resultante se tamizó utilizando una malla de tamaño 30. La cáscara se secó a la misma temperatura por un periodo de 20 horas, se molió en licuadora convencional, por último, se pasó por un tamiz con una malla de tamaño 30.

Extracción de muestra cruda

De acuerdo con la metodología de Castro *et al.* (2026) con pequeñas modificaciones, se puso en agitación 5 gr de muestra seca en 50 ml de etanol al 50% a 25°C por 1 hora. Posteriormente se realizó una extracción al vació, utilizando un matraz Kitasato y un embudo Büchner usando papel filtro Whatman #41. El material vegetal sobrante de la muestra se volvió a poner en agitación a las mismas condiciones, y se realizó una segunda extracción al vacío. La extracción 1 y 2 se homogenizaron y se colocaron en cajas Petri, se dejaron secar por 24 horas a 50 °C en una estufa de convección, el producto se pesó y guardo en microtubos Eppendorf de 2ml de color ámbar hasta su uso.

Purificación de polifenoles

El método se realizó de acuerdo con lo reportado por Aranda *et al*. (2024). Se resuspendió 1 gr del extracto crudo obtenido en 100 ml de agua destilada con ayuda de un baño sonicador por 10 minutos. Para purificación se utilizó una columna con resina Amberlitae XAD-16 como fase estacionaria y etanol como fase móvil. Se cargaron 100 ml del extracto acuoso a la columna de Amberlitae y se

utilizó agua destilada como solvente de lavado para eliminar las sustancias no deseadas. Después, se agregó etanol para eluir los compuestos polifénolicos purificados. El etanol se evaporó a 50°C durante 24 h, obteniéndose los compuestos polifenólicos en forma de polvo fino, estos se almacenaron en microtubos Eppendorf de 2ml de color ámbar hasta su uso. Esto se realizó para la muestra de pulpa y cáscara.

Actividad antioxidante

Inhibición de los radicales ABTS$^{\bullet+}$

El método se realizó de acuerdo con lo reportado por Aranda *et al*. (2024). Se generó el radical ABTS$^{\bullet+}$ mezclando una solución acuosa de ABTS (7mmol·L^{-1}) con persulfato de potasio (2.45 mmol·L^{-1}) en una porción 2:1, la mezcla se mantuvo en oscuridad a temperatura ambiente por 12 h antes de su uso. La absorbancia de la solución de ABTS$^{\bullet+}$ se ajustó con etanol a 0.700±0.002 a 734 nm. Se mezclaron 5 µL de muestra con 95 µL de la solución de ABTS$^{\bullet+,}$ dejándolo reaccionar por 1 min se midió la absorbancia a 734 nm, se utilizó un lector de microplacas. Los resultados se expresaron como equivalentes de Trolox (TEµ·mL^{-1}) mediante una curva del mismo estándar.

Capacidad reductora (Folin-Ciocalteu)

Se utilizó el reactivo Folin-Ciocalteu para determinar la capacidad reductora siguiendo la metodología propuesta por Georgé *et al* (2005) con ligeras modificaciones. A 25 µL de muestra diluida, se le añadieron 25 µL de reactivo Folin-Ciocalteu y 25 µL de carbonato de sodio (75 g/L^{-1}), se homogenizó y se incubó a 40 °C durante 3º minutos. Posteriormente se agregaron 200 µL de agua destilada y se midió la absorbancia a 750 nm. Finalmente, los resultados se expresaron como equivalentes de ácido gálico (µL GAE·mL^{-1}) mediante una curva del mismo estándar.

Resultados y Discusión

Características físicas

De un lote de 198 tunas (*Opuntia joconostle*), se tomaron 10 piezas representativas para obtener la información de sus características físicas.

Tabla 1. Características físicas de *Opuntia joconostle*

Peso (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)
84.10 ± 18.57	5.28± 0.70	6.61 ± 0.75

Nota: Los resultados representan la media ± DE de cuatro determinaciones

De acuerdo con lo investigado por Gutiérrez *et al.* (2018) éstas son características físicas importantes que presentan las plantas de esta especie que albergan en el estado de Hidalgo.

Análisis proximales

De acuerdo con las técnicas del AOAC se hicieron los análisis correspondientes a la muestra de cáscara, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 2. Porcentaje encontrado de los principales compuestos químicos y nutricionales en la cáscara de la especie *Opuntia Joconostle*

Parámetro	(%)
MS105°C	90.37 ± 0.07
Humedad	9.62 ± 0.07
Proteína	1.95 ± 0.25
Fibra Cruda	34.07 ± 5.84
ELN	54.35 ± 5.58

Nota: MS105°C es materia seca determinada a 105°C, ELN es extracto libre de nitrógeno. Los resultados representan la media ± DE de cuatro determinaciones

Los resultados fueron comparados con los de Gutiérrez *et al.* (2018) donde los parámetros de humedad y proteína para esta especie son menores, por otro lado, resulta ser mayor en el porcentaje de fibra cruda.

Rendimiento de la materia vegetal

En la **Tabla 3** se muestra el rendimiento que se obtuvo a partir de materia vegetal fresca después de haberse sometido al secado para obtener muestra seca que se utilizará al realizar los análisis correspondientes.

Tabla 3. Rendimiento de materia vegetal por 100g de materia fresca

Muestra Vegeta	Seca (g)	Tamizada (g)	Residuo (g)
Pulpa	7.96	3.05	4.90
Cáscara	7.52	6.46	1.06

A partir de los datos obtenidos fue determinado que el rendimiento de la materia seca es por debajo del 10% para la cáscara y la pulpa.

Rendimiento de extracto crudo

Al realizar la doble extracción de las muestras, se obtuvo un rendimiento de 2.22 ± 0.61^{a} g para la pulpa, y 2.01±0.61^{b} g para la cáscara.

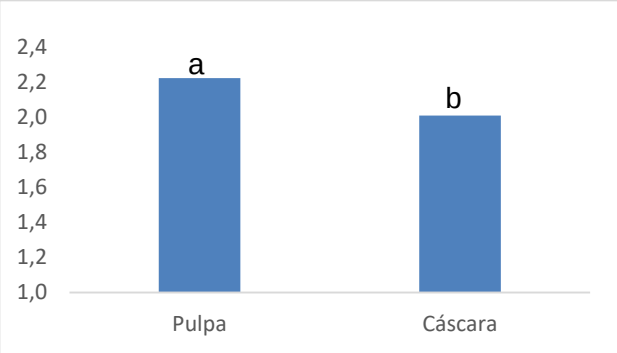


Figura 1. Rendimiento de extracto crudo. Letras iguales en columnas corresponden a un mismo grupo, según la comparación de medias con la prueba de Tuckey a una (P≤0.05).

Aunque los promedios son cercanos, estadísticamente son diferentes.

Rendimiento de polifenoles

Después de llevar a cabo la purificación de los compuestos polifenólicos se obtuvieron los siguientes rendimientos

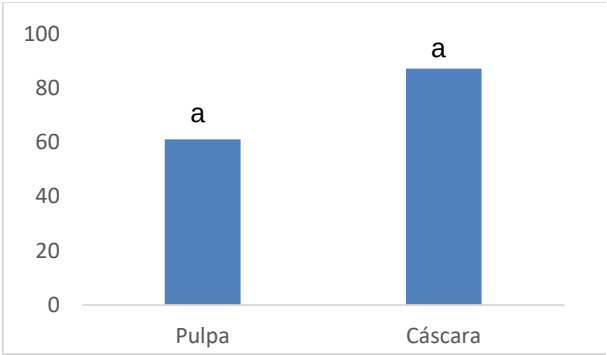


Figura 2. Cantidad de polifenoles purificados. Letras iguales en columnas corresponden a un mismo grupo, según la comparación de medias con la prueba de Tuckey a una (P≤0.05).

Gráficamente podemos observar que existe una diferencia entre los rendimientos de polifenoles, se determinó un mayor

rendimiento en la muestra de cáscara en comparación en el de la pulpa, aunque estadísticamente los rendimientos son iguales. El porcentaje de rendimiento para obtener polifenoles purificados partiendo de 1g de muestra cruda es del 6.12% para la pulpa y 8.73% para la cáscara. De acuerdo con Ostovar *el al* (2026) al purificar el extracto crudo utilizando amberlita XAD-16, la purificación podría aumentar el contenido total de compuestos fenólicos, antocianinas y taninos en 28, 6, y 19 veces, respectivamente.

Actividad antioxidante

Inhibición de los radicales $ABTS^{\bullet+}$

La actividad antioxidante utilizando los radicales $ABTS^{\bullet+}$ se tuvieron los siguientes recultados:

Tabla 4 Actividad antioxidante de pulpa y cáscara de *Opuntia joconostle* a concentraciones de 500 ppm y 1000 ppm

Muestra	**Concentración (ppm)**	**Actividad de inhibición de radicales ($TE\mu \cdot ml^{-1}$)**
POLIFENOLES PURIFICADOS		
Pulpa	500	65.047 ± 7.34^{C}
	1000	98.424 ± 16.12^{B}
Cáscara	500	82.377 ± 11.07^{BC}
	1000	128.345 ± 11.06^{A}
EXTRACTO CRUDO		
Pulpa	500	8.698 ± 6.80^{E}
	1000	11.712 ± 3.40^{E}
Cáscara	500	18.479 ± 0.914^{DE}
	1000	40.156 ± 9.42^{D}

Nota: Letras iguales en columnas corresponden a un mismo grupo, según la comparación de medias con la prueba de Tuckey a una ($P \leq 0.05$). Los resultados representan la media ± DE de cuatro determinaciones

La mayor actividad antioxidante se obtuvo a partir de las muestras de polifenoles purificados a una concentración de 1000 ppm de la muestra de cáscara, la menor actividad antioxidante se obtuvo en la pula a 500 y 1000 ppm con el extracto crudo. Castro *et al.* (2026), reportan una actividad antioxidante de 38.12 ± 2.23 (µM Trolox/g peso seco) en la cáscara de *O. joconostle,* lo cual indica que los resultados obtenidos son similares a los que estos autores reportaron, a la concentración de 1000 ppm enel extracto crudo. Para el caso de la pulpa, Castro *et al* (2025) reportaron una actividad antioxidante de 109.75 ± 4.10 (µM Trolox/g peso seco), de acuerdo con los datos que obtuvimos y comparando con Castro *et al* (2025) la muestra de polifenoles purificados a una concentración de 1000 ppm es similares

Capacidad reductora (Folin-Ciocalteu)

De acuerdo con Muñoz *et al* (2017), este método puede ser inespecífico e interaccionar con otras moléculas como azúcares presentes en los extractos vegetales, que pueden alterar los resultados encontrados, por otro lado, Bautista *et al* (2023), usó el reactivo de Folin-Ciocalteu para determinar la capacidad reductora en muestras de orégano (*Lippia graveolens),* obteniendo datos congruentes comparándolos con otros extractos con capacidad reductora. Los datos obtenidos con esta técnica se muestran en la **Tabla 5.**

La mayor capacidad reductora se obtuvo con la muestra de la cáscara a 1000 ppm con polifenoles purificados; sin embargo, en la concentración de 500 ppm de la pulpa

con polifenoles sin purificar fue la que menos capacidad reductora presentó, esto podría deberse a que en esta muestra contenía una mayor cantidad de impurezas.

De acuerdo con los datos que se obtuvieron en esta técnica, se observó que hubo una mayor interacción en la muestra de cáscara y pulpa en concentraciones de 1000 ppm, de forma contraria, en las muestras de polifenoles que no fueron previamente purificados la interacción fue mucho menor.

Tabla 5. Capacidad reductora en pulpa y cáscara de *Opuntia joconostle* a concentraciones de 500 ppm y 1000 ppm

Muestra	Concentración (ppm)	Actividad de inhibición de radicales (µL GAE·ml^{-1})
POLIFENOLES PURIFICADOS		
Pulpa	500	78.739 ± 14.27^{CDE}
	1000	174.830 ± 32.2^{AB}
Cáscara	500	120.787 ± 28.3^{BC}
	1000	224.803 ± 50.7^{A}
EXTRACTO CRUDO		
Pulpa	500	10.601 ± 4.24^{F}
	1000	26.319 ± 8.33^{EF}
Cáscara	500	53.048 ± 17.45^{DEF}
	1000	111.106 ± 32.9^{BCD}

Nota: Letras iguales en columnas corresponden a un mismo grupo, según la comparación de medias con la prueba de Tuckey a una (P≤0.05). Los resultados representan la media ± DE de cuatro determinaciones

Conclusiones

La especie Xoconostle (*Opuntia joconostle*) tuvo presencia de compuestos bioactivos, que se lograron cuantificar. La cáscara presentó un mayor rendimiento de compuestos polifenólicos en comparación con la pulpa, destacando que la las muestras de polifenoles obtenidos a partir de cáscara a 1000 ppm registraron los valores más altos en ambos ensayos. Hasta el momento estos resultados indican que la cáscara es una parte de interés del fruto para continuar con la caracterización de compuestos bioactivos. Aun se requieren de análisis complementarios para establecer el perfil completo de los metabolitos del xoconostle, y así poder valorar sus posibles aplicaciones como ingredientes funcionales.

Agradecimientos

A la SECIHTI por otorgarme la beca.

Referencias bibliográficas

Alaíz, M. *et al* (2025). Total and free amino acids composition of the peel and pulp from the fruts of seven Mexican Opuntia species, 28 (1). DOI: 10.1080/10942912.2025.2512952

Aranda, N.E, Aguilar, P., Bautista, I., Rojas, R., Robledo, C.L., Martínez, G.C.G. (2024) The Optimization of Ultrasound Assisted Extraction for Bioactive Compounds from Flourensia cernua and Jatropha dioica and the Evaluation of Their Functional Properties. Horticulturae. 10, 709. https://doi.org/10.3390/horticulturae10070709

Arias, J. *et al* (2020). Study of Xoconostle (Opuntia spp.) Powder as Source of Dietary Fiber and Antioxidants, 9, 403-416. DOI:10.3390/foods9040403

Bautista I., Vázquez M., Paz A.D., Gildardo R., Castro C., Rojas R., Martínez G.C.G. (2023) Chemical Profile and Antioxidant Activity of Essential Oils and Polyphenolic Compounds of *Lippia Graveolens* from Different Mexican Localities. Journal of Agriculture and Crops. Vol. 9, Issue. 1, pp: 20-31. DOI: https://doi.org/10.32861/jac.91.20.31

Castro N. C., Jiménez C., Girón J., Alaiz M., Garzón A.G., Drago S.R., Vioque J. (2026) Chemical Composition and Antioxidant Activity of Mexican Opuntia Peel Fruit Polyphenols and Their Maltodextrin Microencapsulates. Wiley Journal of Food Biochemistry Volume 2026, Article ID 7972590, 10 pages DOI: https://doi.org/10.1155/jfbc/7972590

Castro N. C., Jiménez C., Girón J., Alaiz M., Garzón A.G., Drago S.R., Vioque J. (2025) Polyphenol profile and associated antioxidant, antiproliferative and anti-inflammatory activities of Mexican Opuntia fruits. Food Bioscience. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107577

Georgé, S., Brat, P., Alter, P., Amiot, M. J., (2005). "Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products." J Agric Food Chem, vol. 53, Available: 10.1021/jf048396b

Gutiérrez M., Ruiz D., Vela G., Olivares J. (2018) Características Morfométricas y Fisicoquímicas de Frutos de Xoconostle Cultivados y Silvestres en Hidalgo. Núm. 35 (2018): Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente Núm. 35

Hernández, C., (2025) Infografías del Jardín Botánico del IBUNAM, UNAM. 24 de febrero 2026. https://infografiasjb.ib.unam.mx/xoconostle.html

Muñoz O., Torres G.A., Núñez J.A., De la Rosa L.A., Rodrigo J., Ayala J.F., Alvarez E. (2017) Nuevo acercamiento a la interacción del reactivo de Folín-Ciocalteu con azúcares durante la cuantificación de polifenoles totales. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 20(2): 23-28. DOI: 10.1016/j.recqb.2017.04.003

Ortiz-Sanchez, M.; Solarte-Toro, J.C.; Orrego-Alzate, C.E.; Acosta-Medina, C.D.; Cardona-Alzate, C.A. (2021). Integral use of orange peel waste through the biorefinery concept: An experimental, technical, energy, and economic assessment. Biomass Convers. Biorefin. 11, 645–659. 9https://doi.org/10.1007/s13399-020-00627-y

Osorio O., Álvarez V. B., Dorantes L., Giusti M. M. (2011). Phenolics, betacyanins and antioxidant activity in Opuntia joconostle fruits. Food Research International, 44(7), 2160–2168. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.011

Ostovar N., Girotto C., Nurkolis F., GreggiAntunes M.A., Hoffmann F.A., Barreto G., Granato D. (2026). Purification with XAD-16 resin

intensifies the polyphenolic composition, antioxidant potential, and anti-obesity properties of apple peel extracts. Applied Food Research. DOI: https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.102456

Pimienta E., Méndez L., Ramírez B.C., García J.E., Domínguez R.M. (2008). Effect of xoconostle (*Opuntia joconostle web*.) fruit consumption on glucose and seric lipid. Agrociencia 42: 645-653. 2008.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (6 de enero de 2017) Xoconostle, del desierto mexicano a nuestra mesa, Gobierno de México. 13 de junio 2026.https://www.gob.mx/agricultura/articulos/xoconostle-del-desierto-mexicano-a-nuestramesa#:~:text=El%20xoconostle%2C%20joconostle%20o%20xoconoxtle,excelente%20ingrediente%20contra%20la%20diabetes.

Efecto de tratamientos emergentes en la conservación y propiedades nutracéuticas de una bebida funcional a base de semillas de *Cannabis sativa* L. (hemp)

Juan Diego Romo-Longoria[1*]; Pablo Alan Rodríguez-Salinas[1]; Lidia Rosaura Salas-Cruz[1]; Vania Urías-Orona[2]; Guillermo Niño-Medina[1].
[1] Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2] Facultad de Salud Pública y Nutrición, UANL. Av. Dr. Eduardo Aguirre Pequeño y Yuriria, Colonia Mitras Centro, Monterrey, Nuevo León, C.P. 64460.
*Email: juan.romolng@uanl.edu.mx

Resumen. Se evaluó el efecto de la pasteurización (85 °C, 5 min), la termosonicación (45 °C, 30 min, 40 kHz) y la irradiación UV-C (254 nm, 30 min) sobre las propiedades fisicoquímicas de una bebida funcional elaborada con harina desgrasada de *Cannabis sativa* L. (hemp). El tiempo de tostado se seleccionó mediante evaluación sensorial con 88 jueces no entrenados, cuyas respuestas se capturaron en una plataforma web propia con validación en servidor y folio único. La bebida con harina tostada a 180 °C durante 5 min (T5) obtuvo las mayores calificaciones de aroma, textura, regusto y aceptación global ($p<0.05$) y fue la preferida por 48 de 86 jueces (56 %). La elaboración se estandarizó en cuatro fases, con coeficientes de variación entre lotes control de 1.1 % en °Brix y 1.5 % en pH. Ningún tratamiento modificó la acidez titulable, y las diferencias de color respecto al control fueron pequeñas (ΔE^* de 2.2 a 3.1). La termosonicación y la irradiación UV-C incrementaron los sólidos solubles (5.53 y 5.83 frente a 5.15 °Brix; $p<0.001$), no así la pasteurización. En la bebida control se hicieron pruebas preliminares de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante para establecer las condiciones de análisis de la siguiente etapa.
Palabras clave. hemp, bebida funcional, termosonicación, irradiación UV-C, evaluación sensorial.

Abstract. The effect of pasteurization (85 °C, 5 min), thermosonication (45 °C, 30 min, 40 kHz) and UV-C irradiation (254 nm, 30 min) on the physicochemical properties of a functional beverage made with defatted *Cannabis sativa* L. (hemp) flour was evaluated. The flour roasting time was selected by sensory evaluation with 88 untrained panelists, whose responses were recorded on a purpose-built web platform with server-side validation and a unique code per panelist. The beverage made with flour roasted at 180 °C for 5 min (T5) received the highest scores for aroma, texture, aftertaste and overall acceptance ($p<0.05$) and was preferred by 48 of 86 panelists (56%). The preparation process was standardized in four phases, with coefficients of variation among control batches of 1.1% for °Brix and 1.5% for pH. None of the treatments affected titratable acidity, and color differences relative to the control were small (ΔE^* from 2.2 to 3.1). Thermosonication and UV-C irradiation increased soluble solids (5.53 and 5.83 versus 5.15 °Brix; $p<0.001$), whereas pasteurization did not modify them. In addition, preliminary tests of phenolic compounds and antioxidant capacity were carried out on the control beverage to establish the analytical conditions for the next stage.
Keywords: hemp, functional beverage, thermosonication, UV-C irradiation, sensory evaluation.

Introducción

Las bebidas funcionales a base de semillas oleaginosas han ganado interés por su perfil nutricional y por la posibilidad de incorporar compuestos bioactivos. La semilla de hemp aporta proteína de alta calidad y ácidos grasos esenciales omega-6 y omega-3 (Callaway, 2004; Oomah *et al*., 2002), así como compuestos antioxidantes como tocoferoles y polifenoles. Entre estos últimos se han identificado lignanamidas con actividad antioxidante (Yan *et al*., 2015).

Las bebidas vegetales son productos perecederos que requieren un tratamiento de conservación. La pasteurización, tratamiento térmico convencional, reduce la carga microbiana y prolonga la vida útil, pero el calor puede modificar el color, el sabor y los compuestos termolábiles del producto. En bebidas de maíz, la pasteurización a 85 °C y la termosonicación no produjeron cambios considerables en el pH, la acidez y los sólidos totales, aunque la pasteurización modificó el color, y la capacidad antioxidante de la bebida de maíz morado aumentó tras el tratamiento térmico (Rodríguez-Salinas *et al*., 2021).

La termosonicación combina ultrasonido con temperaturas moderadas. Su efecto se debe a la cavitación (formación y colapso de microburbujas en el líquido), que genera fuerzas de corte capaces de reducir el tamaño de partícula, mejorar la estabilidad de las bebidas y disminuir la actividad microbiana y enzimática (Sotelo-Lara *et al*., 2024). La irradiación UV-C (200 a 280 nm) tiene efecto germicida y se considera una tecnología no térmica de bajo costo. Sin embargo, su aplicación en bebidas está limitada por la baja penetración de la luz en líquidos turbios o con partículas en suspensión, de ahí que suela aplicarse en capas delgadas y con agitación (Koutchma, 2009).

El efecto del procesamiento sobre los compuestos fenólicos depende de la matriz. El tratamiento térmico puede liberar compuestos fenólicos ligados y elevar la actividad antioxidante (Dewanto *et al*., 2002), y la reacción de Maillard genera productos de pardeamiento con capacidad antioxidante, aunque también puede degradar compuestos termolábiles (Nicoli *et al*., 1999; Manzocco *et al*., 2000). Como los métodos para estimar la capacidad antioxidante responden a mecanismos distintos, conviene evaluar más de uno (Prior *et al*., 2005).

Antes de comparar los tratamientos de conservación es necesario definir la formulación base y asegurar que el proceso de elaboración sea reproducible entre lotes, para que las diferencias observadas se atribuyan al tratamiento y no a la preparación. Por ello, en esta etapa se seleccionó el tiempo de tostado de la harina mediante evaluación sensorial, se estandarizó el proceso de elaboración y se evaluó el efecto de los tratamientos de conservación sobre las propiedades fisicoquímicas de la bebida.

Objetivo general. Evaluar el efecto de la pasteurización, la termosonicación y la irradiación UV-C sobre las propiedades fisicoquímicas y nutracéuticas de una bebida funcional elaborada con harina desgrasada de hemp.

Objetivos específicos de esta etapa. (1) Seleccionar el tiempo de tostado de la harina mediante evaluación sensorial con consumidores. (2) Estandarizar el proceso de elaboración de la bebida. (3) Evaluar el efecto de los tratamientos de conservación sobre el color, los sólidos solubles, el pH y la acidez titulable. (4) Establecer, mediante pruebas preliminares, las condiciones de análisis de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.

Materiales y Métodos.

Harina y formulación de la bebida. Se utilizó harina desgrasada de hemp (*Cannabis sativa* L.) de grado alimentario, tostada a 180 °C durante 5, 10 y 15 min (T5, T10 y T15). La bebida se formuló con aceite de hemp emulsificado con lecitina de soya, gomas xantana y guar (70:30), harina desgrasada, inulina de agave, jarabe de agave y canela. La composición para 500 mL se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Formulación de la bebida de hemp (500 mL).

Ingrediente	% p/v	Cantidad (g)
Aceite de semilla de hemp	2.5	12.5
Lecitina de soya	0.55	2.75
Goma xantana	0.105	0.525
Goma guar	0.045	0.225
Harina desgrasada (T5, T10 o T15)	5.0	25.0
Inulina de agave	2.0	10.0
Jarabe de agave	3.0	15.0
Canela	0.4	2.0
Agua	c.s.p.	500 mL

Elaboración. La bebida se elaboró en cuatro fases (Figura 1). En la fase 1 se calentaron 50 mL de agua a 60 °C, se dispersó la lecitina de soya durante 3 a 5 min, se adicionó el aceite de hemp y se homogeneizó a velocidad máxima durante 5 min hasta obtener una emulsión blanca y estable. En la fase 2 las gomas xantana y guar se premezclaron en seco, se dispersaron en 100 mL de agua fría con agitación constante y se dejaron hidratar de 15 a 20 min. En la fase 3 la harina desgrasada, la inulina de agave y la canela se mezclaron en seco y se dispersaron en 100 mL de agua a temperatura ambiente con agitación vigorosa. En la fase 4 se integraron las fases 1 y 2 bajo agitación, se añadió la fase 3 y el jarabe de agave disuelto en el agua restante, se aforó a 500 mL y se homogeneizó de 3 a 5 min. Cada lote de 500 mL se elaboró por separado, con pesado individual de los ingredientes.

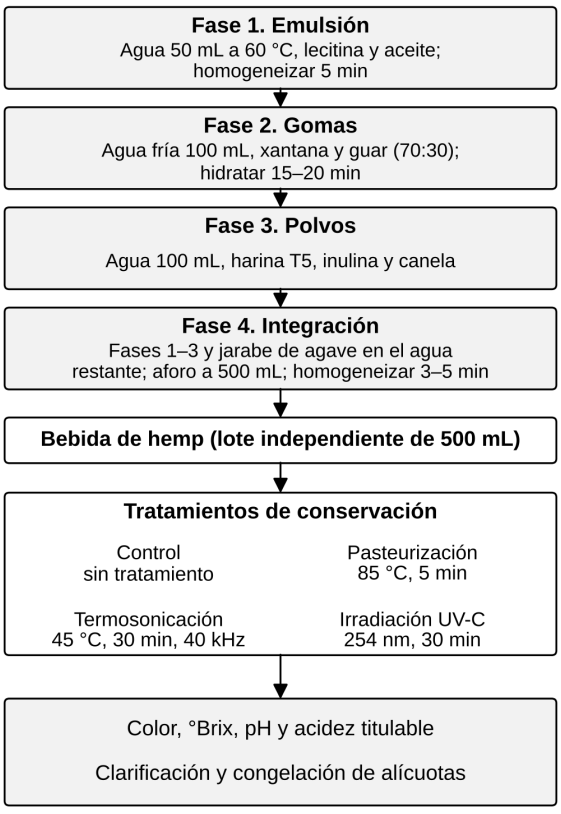


Figura 1. Diagrama de elaboración de la bebida de hemp y de aplicación de los tratamientos de conservación.

Evaluación sensorial. Participaron 91 jueces no entrenados, de los cuales se analizaron 88 registros válidos. Los jueces firmaron el consentimiento informado y sus respuestas se registraron confidencialmente, identificadas solo con un folio. Se evaluaron tres bebidas elaboradas con harina T5, T10 y T15, identificadas con códigos de tres dígitos y presentadas a ciegas en orden estandarizado, con enjuague bucal con agua y consumo de galleta sin sal entre muestras. Se aplicó una escala hedónica de 9 puntos (1 = me disgusta muchísimo; 9 = me gusta muchísimo) para apariencia, aroma, sabor, textura, regusto y aceptación global, y se registró la muestra preferida. El índice de aceptabilidad (IA) se calculó como la media de cada atributo entre 9, multiplicada por 100, y se tomó un IA de 70 % como referencia de buena aceptación (Teixeira *et al*., 1987).

Plataforma digital para la evaluación sensorial. Para la captura de respuestas se desarrolló una aplicación web, alojada en el subdominio sensorial.cumple.app (Netlify), con almacenamiento en una base de datos relacional PostgreSQL (Supabase) (Figura 2). Al firmar el consentimiento informado, cada juez recibió un folio numérico, con lo que su identidad quedó registrada solo en el documento de consentimiento, separada de sus respuestas. El juez capturó en su propio dispositivo el folio, el código de cada muestra, las calificaciones de los seis atributos y la muestra preferida.

Cada envío se procesó en una función de servidor que verificó que el folio fuera un número válido, que cada calificación fuera un entero entre 1 y 9 y que estuvieran completos los códigos de las tres muestras y la preferencia, antes de guardar el registro. Para evitar respuestas duplicadas se emplearon dos niveles de control. El control principal fue una restricción de unicidad sobre el folio en la base de datos, que rechaza un segundo envío con el mismo folio aunque provenga de otro dispositivo o navegador. Como control adicional, el navegador del juez guardó un identificador local que impidió reenvíos accidentales desde el mismo dispositivo. Con fines de auditoría se registraron también el identificador del dispositivo, la dirección IP seudonimizada mediante una función hash y la hora de cada envío. La descarga de los resultados en formato CSV estuvo protegida con una clave de administrador, y los datos se analizaron a partir del archivo exportado, sin transcripción manual.

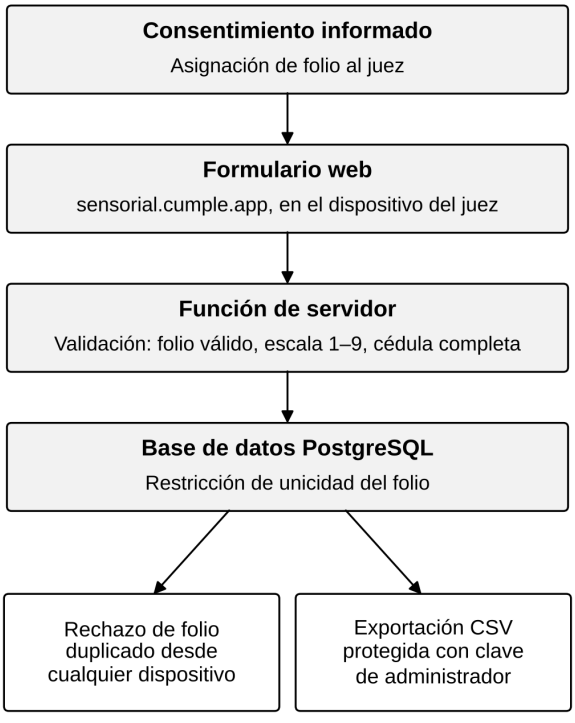


Figura 2. Flujo de captura y control de datos de la plataforma digital para la evaluación sensorial.

Estandarización del proceso. Antes de aplicar los tratamientos de conservación se fijaron las cantidades de agua, temperaturas, tiempos y velocidades de cada fase de elaboración, así como los volúmenes de muestra de cada análisis. Para evaluar la reproducibilidad del proceso se elaboraron lotes control en las dos jornadas de trabajo (tres en la primera y uno en la segunda) y se calculó el coeficiente de variación (CV = DE/media × 100) de cada parámetro fisicoquímico entre los cuatro lotes.

Tratamientos de conservación. Con la harina T5 se prepararon lotes independientes de 500 mL por triplicado para cada tratamiento. En la primera jornada se elaboraron tres lotes control y tres lotes pasteurizados, y en la segunda, tres lotes para termosonicación, tres para irradiación UV-C y un lote control. La pasteurización se realizó a 85 °C durante 5 min según Rodríguez-Salinas *et al*. (2019). Para la termosonicación se colocaron 15 mL de bebida en un baño ultrasónico (PNKKODW, modelo TH-10A) a 45 °C durante 30 min, con frecuencia de 40 kHz y potencia de 70 W. Se tomó como referencia la temperatura de tratamiento de Rodríguez-Salinas *et al*. (2021), quienes emplearon un procesador ultrasónico de sonda, y se adaptaron el equipo y el tiempo de exposición. Para la irradiación UV-C se colocaron 20 mL de bebida en cajas Petri (9 cm de diámetro) con agitación constante y se expusieron a una lámpara germicida (Lumiaction, FL30; 254 nm) durante 30 min a una distancia de 30 cm, dentro de una campana adaptada con una barrera opaca, con base en Bhat *et al*. (2011), con modificaciones.

Análisis fisicoquímicos. El color se midió con un colorímetro Konica Minolta CR-20 en celda con fondo blanco y se registraron los parámetros CIELAB L* (luminosidad), a* (rojo-verde), b* (amarillo-azul), C* (saturación) y h° (ángulo de tono). La diferencia total de color se calculó como $\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{½}$. Los sólidos solubles (°Brix) se determinaron con un refractómetro (Atago, Master-M) a partir de tres gotas de muestra. Para el pH y la acidez titulable se diluyeron 10 mL de bebida en 40 mL de agua destilada. El pH se midió en esta dilución con un potenciómetro (Hanna Instruments, HI98103), y la acidez, por titulación de la misma dilución con NaOH 0.05 N hasta pH 8.2 (AOAC, 1998). Los resultados se expresaron como g de ácido cítrico por 100 mL mediante TTA = (V × N × 0.064 × 100)/v, donde V es el volumen de NaOH gastado (mL), N su normalidad, 0.064 el peso miliequivalente del ácido cítrico anhidro (g/meq) y v el volumen de muestra (mL).

Pruebas preliminares de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante. Para establecer el manejo de la muestra y las condiciones de cada ensayo, los métodos se aplicaron a la bebida control. En los ensayos se empleó la fracción clarificada de la bebida, obtenida mediante dos ciclos de centrifugación a 7000 rpm durante 10 min a 4 °C, distribuida en alícuotas de 2 mL y almacenada en congelación hasta su análisis. Cada alícuota se descongeló una sola vez. Los fenoles totales se determinaron con el reactivo de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965): se mezclaron 0.2 mL de muestra con 2.6 mL de agua destilada y 0.2 mL de reactivo, se adicionaron 2 mL de Na_2CO_3 al 7 %, se

incubó 90 min en oscuridad y se leyó la absorbancia a 750 nm. Los flavonoides se determinaron con el método de cloruro de aluminio (Zhishen *et al*., 1999), con lectura a 510 nm, y los taninos condensados con el método de vainillina-H_2SO_4 (Sun *et al*., 1998), con lectura a 500 nm. La capacidad antioxidante se determinó por DPPH (Brand-Williams *et al*., 1995), ABTS (Re *et al*., 1999) y FRAP (Benzie y Strain, 1996), con lecturas a 517, 734 y 593 nm, respectivamente. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (EAG), catequina (EC) o Trolox (ET) por litro, con curvas de calibración de ácido gálico (0–200 mg/L), catequina (0–200 mg/L) y Trolox (0–500 mg/L).

Análisis estadístico. Los datos sensoriales se analizaron con la prueba de Friedman, seguida de la prueba de Wilcoxon de rangos con signo para las comparaciones por pares con corrección de Holm, y la preferencia con una prueba de chi cuadrada de bondad de ajuste (H_0: distribución uniforme). Los datos fisicoquímicos se expresaron como media ± desviación estándar de lotes independientes y se analizaron mediante ANOVA de una vía y la prueba de Tukey ($p<0.05$), previa verificación de la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene (°Brix, p=0.44; pH, p=0.30). El grupo control se integró con los lotes control de ambas jornadas (n = 4) y cada tratamiento con tres lotes (n = 3). Los análisis se realizaron en Minitab.

Resultados y Discusión.

Selección sensorial del tostado. Las bebidas elaboradas con harina T5, T10 y T15 se diferenciaron en aroma, sabor, textura, regusto y aceptación global (Friedman, $p<0.05$), mientras que la apariencia no mostró diferencias (p=0.510; Cuadro 2; Figura 3). La bebida T5 obtuvo la mayor calificación de aroma (7.17), con diferencia significativa respecto a T10 (5.49) y T15 (5.23), que no se distinguieron entre sí. En textura, regusto y aceptación global las tres bebidas fueron diferentes y la calificación disminuyó al aumentar el tiempo de tostado. En sabor, T15 obtuvo la menor calificación (4.26).

Cuadro 2. Calificación hedónica de las bebidas elaboradas con harina tostada (n=88).

Atributo	T5	T10	T15	p
Apariencia	5.09 a	5.12 a	5.20 a	0.510
Aroma	7.17 a	5.49 b	5.23 b	<0.001
Sabor	5.03 a	4.81 a	4.26 b	0.015
Textura	5.53 a	5.06 b	4.65 c	<0.001
Regusto	5.40 a	4.84 b	4.41 c	0.012
Aceptación global	5.77 a	5.27 b	4.69 c	<0.001

Medias de la escala hedónica de 9 puntos. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (Wilcoxon pareado con corrección de Holm, $p<0.05$). p: prueba de Friedman.

La preferencia también favoreció a T5 (48 de los 86 jueces que indicaron una muestra preferida, 56 %), seguida de T10 (24 %) y T15 (20 %) ($\chi^2(2)=19.84$; $p<0.001$). El IA de la aceptación global fue de 64.1 % para T5, 58.6 % para T10 y 52.1 % para T15. Ninguna bebida alcanzó un IA de 70 % en la aceptación global, aunque el aroma de T5 sí lo superó (79.7 %). Los atributos con menor aceptación en T5 fueron el sabor (55.9 %) y la apariencia (56.6 %), aspectos que deberán mejorarse en la formulación.

Con base en estos resultados se seleccionó T5 para elaborar las bebidas de los tratamientos de conservación.

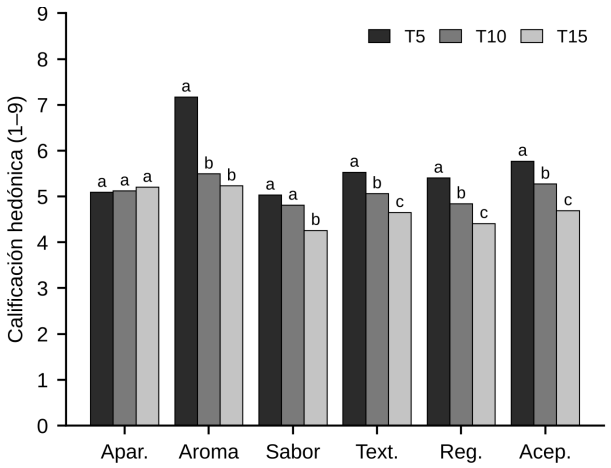


Figura 3. Calificación hedónica media de las bebidas elaboradas con harina tostada a 180 °C durante 5, 10 y 15 min (n=88). Letras distintas dentro de cada atributo indican diferencias significativas (Wilcoxon pareado con corrección de Holm, p<0.05).

Plataforma digital. La plataforma permitió aplicar la evaluación al mismo tiempo en los dispositivos de los jueces y almacenar cada respuesta en la base de datos al momento del envío. La validación en el servidor impidió el registro de calificaciones fuera de la escala o de cédulas incompletas, y la restricción de unicidad evitó registrar más de una respuesta con el mismo folio. Con la exportación en formato CSV se eliminaron los errores de transcripción propios de las cédulas en papel, y el folio permitió mantener la confidencialidad de los jueces sin perder la trazabilidad con el consentimiento informado.

Estandarización del proceso. Los lotes control elaborados en las dos jornadas mostraron baja variación en los parámetros fisicoquímicos (Cuadro 3). El CV fue de 1.1 % en °Brix, 1.5 % en pH y 0.9 % en el ángulo de tono, y se mantuvo entre 4.8 y 5.4 % en L*, b* y C*. Los CV mayores se observaron en a* (9.8 %) y en la acidez titulable (11.3 %), parámetros de magnitud baja (a* ≈ 3.2; gasto de NaOH ≈ 1.2 mL), en los que una variación absoluta pequeña se traduce en un CV relativo alto. El ángulo de tono del control de la segunda jornada (78.15°) fue similar al de la primera (78.23 ± 0.91°), y los °Brix (5.1 frente a 5.17 ± 0.06) se mantuvieron dentro de la variación de la primera jornada. Esto indica que el proceso de elaboración en cuatro fases produjo una bebida reproducible entre lotes. El pH (6.50) y la luminosidad (L* 46.55) del control de la segunda jornada fueron mayores que los de la primera.

Cuadro 3. Variación de los lotes control elaborados en dos jornadas (n=4).

Parámetro	Media ± DE	CV (%)
L*	43.91 ± 2.10	4.8
a*	3.16 ± 0.31	9.8
b*	15.03 ± 0.81	5.4
C*	15.36 ± 0.81	5.3
h°	78.21 ± 0.74	0.9
°Brix	5.15 ± 0.06	1.1
pH	6.38 ± 0.10	1.5
Acidez (g ác. cítrico/100 mL)	0.038 ± 0.004	11.3

CV: coeficiente de variación. Tres lotes de la primera jornada y uno de la segunda.

Propiedades fisicoquímicas de los tratamientos de conservación. Los tratamientos de conservación afectaron los sólidos solubles, el pH, la luminosidad, la coordenada b* y la saturación (p<0.05), mientras que la coordenada a*, el ángulo de tono y la acidez titulable no mostraron diferencias significativas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Propiedades fisicoquímicas de la bebida de hemp con los tratamientos de conservación.

Parámetro	C	P	TS	UV-C
L*	43.91 ± 2.10 ab	40.83 ± 0.55 b	46.53 ± 0.85 a	46.03 ± 1.31 a
a*	3.16 ± 0.31 a	3.60 ± 0.26 a	3.47 ± 0.25 a	3.43 ± 0.21 a
b*	15.03 ± 0.81 b	14.93 ± 0.15 b	16.53 ± 0.76 a	15.33 ± 0.35 ab
C*	15.36 ± 0.81 b	15.37 ± 0.15 ab	16.90 ± 0.82 a	15.70 ± 0.30 ab
h°	78.21 ± 0.74 a	76.40 ± 1.04 a	78.20 ± 0.40 a	77.33 ± 1.01 a
ΔE*	—	3.1	3.0	2.2
°Brix	5.15 ± 0.06 c	5.20 ± 0.00 c	5.53 ± 0.06 b	5.83 ± 0.06 a
pH	6.38 ± 0.10 b	6.37 ± 0.06 b	6.60 ± 0.00 a	6.53 ± 0.06 ab
Acidez	0.038 ± 0.004 a	0.042 ± 0.005 a	0.033 ± 0.002 a	0.037 ± 0.005 a

C: control (n=4); P: pasteurización; TS: termosonicación; UV-C: irradiación UV-C (n=3). Media ± DE. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas (ANOVA y Tukey, p<0.05). ΔE*: diferencia total de color respecto al control. Acidez en g de ácido cítrico/100 mL.

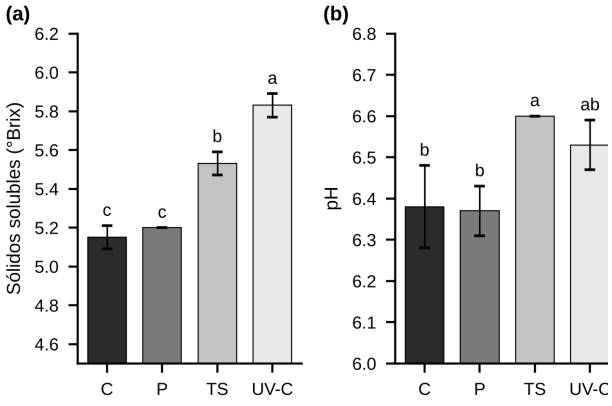


Figura 4. Sólidos solubles y pH de la bebida de hemp con los tratamientos de conservación. C: control; P: pasteurización; TS: termosonicación; UV-C: irradiación UV-C. Las barras indican la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, p<0.05).

La pasteurización no modificó los sólidos solubles (5.20 °Brix), mientras que la termosonicación y la irradiación UV-C los incrementaron a 5.53 y 5.83 °Brix, respectivamente, con diferencias significativas entre los tres grupos (p<0.001; Figura 4). En bebida de chufa no se observaron cambios en los sólidos solubles tras tratamiento térmico ni irradiación UV-C (Zhu *et al*., 2019), y en bebida de almendra tampoco tras la termosonicación (Manzoor *et al*., 2021). En bebida de maíz blanco, el aumento de los sólidos totales tras la pasteurización se atribuyó a la evaporación de agua (Rodríguez-Salinas *et al*., 2021). Dado que el control de la segunda jornada registró 5.1 °Brix, el aumento en la bebida de hemp se asocia con los tratamientos y no con la jornada de elaboración. La irradiación UV-C se aplicó durante 30 min en capa delgada y en recipiente abierto, condiciones que podrían favorecer la pérdida de agua y la concentración de los sólidos. En la termosonicación, aparte de una posible evaporación durante 30 min a 45 °C, la cavitación puede fragmentar polisacáridos como la goma xantana (Li *et al*., 2019), lo que podría aumentar la fracción soluble aportada por las gomas y la inulina.

El pH de la bebida termosonicada (6.60) fue mayor que el del control (6.38) y el de la pasteurizada (6.37), y la irradiación UV-C presentó un valor intermedio (6.53). Kesavan *et al*. (2023) observaron un aumento del pH en jugo de kutkura termosonicado, más marcado a mayor tiempo y temperatura de exposición. No obstante, el control de la segunda jornada registró un pH de 6.50, cercano al de las bebidas termosonicada y UV-C elaboradas

ese mismo día. Por ello, la diferencia respecto al control combinado puede atribuirse en parte a la jornada de elaboración, y su magnitud (0.22 unidades) es del orden de la exactitud del potenciómetro (±0.2). La acidez titulable no mostró diferencias entre tratamientos (0.033 a 0.042 g de ácido cítrico/100 mL), en concordancia con lo reportado en bebidas de maíz, donde la acidez se mantuvo en 0.03 % (como ácido málico) con la pasteurización y la termosonicación (Rodríguez-Salinas *et al*., 2021).

Ningún tratamiento difirió del control en luminosidad. La diferencia se presentó entre la bebida pasteurizada, ligeramente más oscura (L* 40.83), y las bebidas termosonicada y UV-C (L* 46.53 y 46.03), elaboradas en jornadas distintas. El control de la segunda jornada también presentó una luminosidad alta (L* 46.55). En bebida de chufa, la pasteurización redujo L* y b*, mientras que la irradiación UV-C produjo cambios menores (Zhu *et al*., 2019), y en horchata la irradiación UV-C incrementó ligeramente la luminosidad (Corrales *et al*., 2012). La termosonicación presentó valores de b* y C* mayores que el control (amarillo ligeramente más intenso). La diferencia total de color respecto al control fue de 3.1 en la pasteurización, 3.0 en la termosonicación y 2.2 en la irradiación UV-C. Estos valores se ubican en el intervalo de 2 a 3.5, en el que un observador no entrenado puede percibir la diferencia, pero por debajo de 3.5, a partir del cual la diferencia se considera clara (Mokrzycki y Tatol, 2011). En consecuencia, los tratamientos produjeron cambios de color pequeños.

Pruebas preliminares de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante. Las pruebas en la bebida control permitieron establecer el manejo de la muestra para los ensayos. Dada la turbidez de la bebida entera, debida a la emulsión de aceite, las gomas y la harina, se adoptó la clarificación por centrifugación y el almacenamiento de la fracción clarificada en alícuotas de un solo uso. En el ensayo de flavonoides la absorbancia superó el intervalo de la curva de calibración, por lo que se estableció la dilución previa de la muestra para los análisis siguientes. Los valores obtenidos en los demás ensayos se presentan en el Cuadro 5 y servirán de referencia para comparar los tratamientos de conservación.

Cuadro 5. Resultados de las pruebas preliminares en la bebida control.

Ensayo	Media ± DE	Unidad
Fenoles totales (Folin-Ciocalteu)	172.0 ± 8.4	mg EAG/L
Taninos condensados	155.1 ± 12.3	mg EC/L
DPPH	71.7 ± 15.5	mg ET/L
ABTS	117.8 ± 15.0	mg ET/L
FRAP	344.4 ± 32.7	mg ET/L

Tres lotes control de la primera jornada. EAG: equivalentes de ácido gálico; EC: equivalentes de catequina; ET: equivalentes de Trolox.

Perspectivas. En la siguiente etapa se determinarán los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de la bebida con los cuatro tratamientos, según las condiciones establecidas en las pruebas preliminares, y se evaluará la calidad microbiológica de la bebida para relacionar el efecto de cada tratamiento con su capacidad de conservación. La plataforma digital se empleará en las próximas evaluaciones sensoriales.

Conclusiones

La evaluación sensorial indicó que el tostado de la harina a 180 °C durante 5 min (T5) produjo la bebida con mayor calificación de aroma, textura, regusto y aceptación global, preferida por 48 de 86 jueces (56 %). La plataforma digital permitió capturar las respuestas con validación en servidor y un registro por folio. El proceso de elaboración en cuatro fases mostró baja variación entre lotes. Ninguno de los tratamientos de conservación modificó la acidez titulable y los cambios de color fueron pequeños. Los sólidos solubles aumentaron con la termosonicación y la irradiación UV-C, pero no con la pasteurización. Las pruebas preliminares establecieron las condiciones para el análisis de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de la siguiente etapa.

Agradecimientos

Se agradece a la Facultad de Agronomía de la UANL por el apoyo para realizar esta investigación en pro de la ciencia del cannabis, y a los Dres. Guillermo Niño Medina, Romeo Rojas, Alejandro Luna y Pablo Alan Rodríguez por la asesoría técnica durante el desarrollo experimental.

Referencias Bibliográficas

AOAC. (1998). Official methods of analysis of AOAC International (16th ed.). AOAC International.

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. Analytical Biochemistry, 239(1), 70–76.

Bhat, R., Ameran, S. B., Voon, H. C., Karim, A. A., & Tze, L. M. (2011). Quality attributes of starfruit (Averrhoa carambola L.) juice treated with ultraviolet radiation. Food Chemistry, 127(2), 641–644.

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT – Food Science and Technology, 28(1), 25–30.

Callaway, J. C. (2004). Hempseed as a nutritional resource: An overview. Euphytica, 140(1–2), 65–72.

Corrales, M., De Souza, P. M., Stahl, M. R., & Fernández, A. (2012). Effects of the decontamination of a fresh tiger nuts’ milk beverage (horchata) with short wave ultraviolet treatments (UV-C) on quality attributes. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 13, 163–168.

Dewanto, V., Wu, X., & Liu, R. H. (2002). Processed sweet corn has higher antioxidant activity than fresh sweet corn. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(17), 4959–4964.

Kesavan, R. K., Gogoi, S., & Nayak, P. K. (2023). Influence of thermosonication and pasteurization on the quality attributes of kutkura (Meyna spinosa) juice. Applied Food Research, 3(1), 100268.

Koutchma, T. (2009). Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods.

Food and Bioprocess Technology, 2(2), 138–155.

Li, Y., Xiang, D., Wang, B., & Gong, X. (2019). Oil-in-water emulsions stabilized by ultrasonic degraded polysaccharide complex. Molecules, 24(6), 1097.

Manzocco, L., Calligaris, S., Mastrocola, D., Nicoli, M. C., & Lerici, C. R. (2000). Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. Trends in Food Science & Technology, 11(9–10), 340–346.

Manzoor, M. F., Siddique, R., Hussain, A., Ahmad, N., Rehman, A., Siddeeg, A., Alfarga, A., Alshammari, G. M., & Yahya, M. A. (2021). Thermosonication effect on bioactive compounds, enzymes activity, particle size, microbial load, and sensory properties of almond (Prunus dulcis) milk. Ultrasonics Sonochemistry, 78, 105705.

Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011). Colour difference ΔE – A survey. Machine Graphics and Vision, 20(4), 383–411.

Nicoli, M. C., Anese, M., & Parpinel, M. (1999). Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables. Trends in Food Science & Technology, 10(3), 94–100.

Oomah, B. D., Busson, M., Godfrey, D. V., & Drover, J. C. G. (2002). Characteristics of hemp (Cannabis sativa L.) seed oil. Food Chemistry, 76(1), 33–43.

Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53(10), 4290–4302.

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, 26(9–10), 1231–1237.

Rodríguez-Salinas, P. A., Muy-Rangel, D., Urías-Orona, V., Zavala-García, F., Suárez-Jacobo, A., Heredia, J. B., Rubio-Carrasco, W., & Niño-Medina, G. (2019). Thermal processing effects on the microbiological, physicochemical, mineral, and nutraceutical properties of a roasted purple maize beverage. Farmacia, 67(4), 587–595.

Rodríguez-Salinas, P. A., Urías-Orona, V., Muy-Rangel, D., Heredia, J. B., Suarez-Jacobo, A., Báez-González, J. G., Zavala-García, F., & Niño-Medina, G. (2021). Efecto de termosonicación y pasteurización sobre propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y nutracéuticas en bebidas de maíz. Biotecnia, 23(1), 92–101. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i1.1204

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 16(3), 144–158.

Sotelo-Lara, D. M., Amador-Espejo, G. G., Álvarez-Araiza, D. F., Cordero-

Rivera, A. K., Millán-Quintero, K. G., Campos-Vega, R., & Velázquez-Estrada, R. M. (2024). Ultrasound and thermosonication as promising technologies for processing plant-based beverages: A review. Food Technology and Biotechnology, 62(4), 538–552.

Sun, B., Ricardo-da-Silva, J. M., & Spranger, I. (1998). Critical factors of vanillin assay for catechins and proanthocyanidins. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 46(10), 4267–4274.

Teixeira, E., Meinert, E. M., & Barbetta, P. A. (1987). Análise sensorial de alimentos. Editora da UFSC.

Yan, X., Tang, J., Dos Santos Passos, C., Nurisso, A., Simões-Pires, C. A., Ji, M., Lou, H., & Fan, P. (2015). Characterization of lignanamides from hemp (Cannabis sativa L.) seed and their antioxidant and acetylcholinesterase inhibitory activities. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63(49), 10611–10619.

Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, 64(4), 555–559.

Zhu, Y., Elbrhami, A. A., Popović, V., Koutchma, T., & Warriner, K. (2019). Comparative effects of thermal, high hydrostatic pressure, and UV-C processing on the quality, nutritional attributes, and inactivation of Escherichia coli, Salmonella, and Listeria introduced into tiger nut milk. Journal of Food Protection, 82(6), 971–979.

Elaboración y caracterización de oleogeles adicionados con aceites esenciales y su empleo en el desarrollo de alimentos con potencial funcional

Dalia Leticia Muñoz-Carlos*; Nancy del Pilar Medina-Herrera; Romeo Rojas-Molina; Beatriz Adriana Rodríguez-Romero; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez- Ávila.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399. *Email: dalia.munozcrl@uan.edu.mx

Resumen. Los oleogeles como sustitutos de grasas en alimentos han mostrado un potencial significativo. En esta investigación, se evaluó su uso en la formulación de masa de maíz, con el objetivo de reducir el contenido de grasas saturadas y mejorar el perfil nutricional. En esta etapa, se formularon gorditas de maíz elaboradas con oleogeles adicionados con aceite esencial de orégano para caracterizarlos fisicoquímicamente, evaluando parámetros relevantes como color, dureza, acidez, índice de peróxidos y migración de grasa, permitiendo observar la susceptibilidad del aceite frente a la oxidación, contribuyendo a la evaluación de funcionalidad como sustituto de grasas. Se evaluó el efecto del oleogel seleccionado en etapas anteriores y se comparó con aquella masa elaborada con la manteca de puerco, analizando las diferencias fisicoquímicas y funcionalidad. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos en los parámetros de color (L*, a* y b*) y acidez. En contraste, no hubo diferencias significativas en dureza, índice de peróxidos y migración de grasa ($p > 0.005$). En conjunto, los resultados sugieren que el oleogel puede representar una alternativa saludable para la sustitución de la manteca. Este enfoque podría contribuir al desarrollo de alternativas más saludables y funcionales para la industria alimentaria combinando sabor, nutrición y beneficios adicionales para la salud.
Palabras clave. Alimentos funcionales, oleogeles, desarrollo de alimentos, aceites esenciales, sustituto de grasas.

Abstract. Oleogels as fat substitutes in food products has shown significant potential. In this research, the use of oleogeles in the formulation of maize dough was evaluated with the aim of reducing the content of saturated fats and improving its nutritional profile. In this phase, maize gorditas made with oleogeles were formulated to characterize them physiochemically, evaluating relevant parameters such as color, hardness, acidity, peroxide index and fat migration, allowing to observe the susceptibility of the oil to oxidation, contributing to the evaluation of functionality as a fat substitute. The effect of the oleogel selected in a previous phase was evaluated and compared with pork lard, its physicochemical proprieties and functional characteristics were analyzed. The results showed significant differences ($p < 0.005$) between treatments in color parameters (L*, a* y b*) and acidity index. In contrast, there were no significant differences in hardness, peroxide index and fat migration ($p > 0.05$). Overall, the results suggest that oleogels may represent a healthy alternative for fat substitution. This approach has the potential to offer healthier and more functional alternatives for the food industry, combining taste, nutrition, and additional health benefits.
Keywords: Functional foods, oleogels, food product development, essential oils, fat substitution

Introducción

El alto consumo de grasas en la dieta ha sido considerado perjudicial para la salud, y generalmente las guías nutricionales a nivel mundial recomiendan evitar el consumo excesivo de grasas *trans* y saturadas (Youngyo Kim, 2020). La relación entre las grasas en la dieta y el riesgo de padecer enfermedades crónicas ha sido un importante motivo de preocupación en las últimas décadas. La ingesta excesiva de grasa está relacionada con enfermedades como obesidad, enfermedades del corazón, diabetes, hígado y cáncer de páncreas, entre otras (Zhu *et al*., 2019).

A nivel mundial, las grasas sólidas desempeñan un papel crucial como ingredientes funcionales en la formulación de productos alimenticios, ya que proporcionan propiedades reológicas y sensoriales esenciales en productos como margarinas, pasteles, galletas y alimentos fritos (Silva *et al*., 2021). Sin embargo, la mayoría de estas grasas se producen mediante hidrogenación parcial de aceites vegetales, proceso que genera grasas *trans* industriales (Pușcaș *et al*., 2020). Estas grasas aumentan los niveles de colesterol LDL y reducen el HDL, incrementando el riesgo de enfermedades cardiovasculares (de Souza *et al*., 2015; Co & Marangoni, 2018). Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reportado que cada año aproximadamente 278,000 muertes son atribuidas al consumo de grasas *trans* industriales (WHO, 2024).

Debido a estos efectos adversos, la OMS recomienda limitar el consumo de grasas saturadas a menos del 10% de la energía total y las grasas *trans* a menos del 1% (FAO, 2010; WHO, 2018a). Además, en 2018, la OMS lanzó la iniciativa REPLACE para eliminar las grasas *trans* industriales del suministro alimentario mundial (WHO, 2018b), lo que ha impulsado a la industria alimentaria a buscar alternativas más saludables. No obstante, la sustitución de grasas *trans* ha incrementado en algunos casos la ingesta de grasas saturadas, lo cual mantiene el desafío de desarrollar grasas sólidas sin comprometer la textura ni la calidad de los alimentos (Reuss *et al*., 2009).

En este contexto, la tecnología de oleogelación ha surgido como una alternativa prometedora a la hidrogenación parcial. Este proceso permite estructurar aceites líquidos insaturados en forma de gel sin modificar su composición química, reduciendo así las grasas saturadas y eliminando las grasas *trans* (Luo *et al*., 2019; Wijarnprecha *et al*., 2019). Los oleogeles son sistemas coloidales en los que el aceite queda atrapado dentro de una red tridimensional de agentes estructurantes como ceras, ácidos grasos o polímeros (Pehlivanoğlu *et al*., 2016; Tanislav *et al*., 2022). Esta tecnología no solo mejora el perfil nutricional, sino que mantiene propiedades sensoriales deseables como la textura y estabilidad (Silva-Avellaneda *et al*., 2021).

Por otra parte, los oleogeles han cobrado relevancia por su capacidad de vehiculizar compuestos bioactivos como los componentes de los aceites esenciales, antioxidantes o ácidos grasos omega-3, mejorando la funcionalidad del alimento (Barragán-Martínez *et al*., 2022; Li *et al*.,

2021; Martins *et al*., 2017). Los aceites esenciales aportan propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias, además de contribuir al aroma y sabor de los productos (Pehlivanoğlu *et al*., 2016; Tanislav *et al*., 2022).

En investigaciones recientes, el uso de oleogeles en alimentos como helados, productos de panadería y cárnicos, ha demostrado reducir el contenido de grasas saturadas sin afectar la textura ni la aceptabilidad sensorial (Pere Morell *et al*., Alejandre *et al*., 2019). Por tanto, los oleogeles con incorporación de aceites esenciales representan una vía innovadora para desarrollar productos alimenticios funcionales y saludables, alineados con las metas internacionales de eliminación de grasas *trans* y mejora de la nutrición a nivel global.

En esta investigación se evaluó la utilización de oleogeles con la incorporación de aceite esencial como componente bioactivo y los beneficios nutricionales que ofrece en el desarrollo de masa de maíz. En esta última etapa, se evaluó el efecto sobre las propiedades fisicoquímicas de gorditas de maíz a base de oleogel con 6 % de cera de candelilla, adicionado con aceite esencial de orégano frente a gorditas de maíz elaboradas con manteca de puerco destacando sus diferencias y beneficios.

Objetivo general

Formular, caracterizar gorditas de maíz elaboradas con oleogel adicionado con aceite esencial de orégano.

Objetivos específicos

1) Caracterizar fisicoquímicamente gorditas de maíz elaboradas con manteca de puerco.
2) Formular y caracterizar fisicoquímicamente gorditas de maíz elaboradas con oleogeles a base de cera de candelilla y aceite de ajonjolí tostado adicionados con aceite esencial de orégano.
3) Determinar las diferencias fisicoquímicas de las gorditas con manteca de puerco *vs* las gorditas elaboradas con oleogel.

Materiales y Métodos

1. Oleogeles.
1.1. Preparación del oleogel. En la primera etapa se formuló y desarrollo solo el oleogel a base de aceite de ajonjolí tostado.
Las muestras de oleogel se prepararon con cera de candelilla orgánica (obtenida de Lucio Blanco, Cuatro Ciénegas, Coahuila, México; coordenadas: latitud, 26.165556; longitud, 102.188333) que fue blanqueada y pulverizada según Bernal *et al*. (2005) y mezclada con aceite de Ajonjolí tostado a 6% (m/m). Se calentó el aceite vegetal entre 75 a 85 ºC, se agregó el porcentaje de concentración de cera de candelilla seleccionado (6 %) y se mezcló durante 13 minutos, se agregó el aceite esencial de orégano a 1% (m/m) y se mezcló nuevamente durante 2 minutos. Los oleogeles resultantes se dejaron reposar durante un día en refrigeración (0 a 4 °C) para la fase de gelificación. Finalmente, las muestras se almacenaron hasta su uso para la elaboración de las gorditas de maíz. Todos los tratamientos se realizaron en cuadruplicado.

1.1.2 Caracterización fisicoquímica

El color de superficie de las gorditas se determinó mediante un método instrumental utilizando un colorímetro de Konica Minolta (CR410, Osaka, Japón). Los parámetros de color L*, a* y b* se determinaron midiendo la superficie de cada gordita en la parte central con un espesor aproximado de 3 cm. El parámetro L* describirá el valor de luminosidad, donde 0 es negro y 100 es blanco. Los valores negativos del parámetro a* representaron verde, y los valores positivos representaron colores rojos. Los valores negativos de b* indicaron azul, y los valores positivos indicaron amarillo (Onacik-Gür & Żbikowska ,2019) (Xia *et al*., 2015).

Se determinó el índice de acidez según NMX-F101-1987, donde 2.5 g de muestra se disolvieron con 18.75 ml de éter y 18.75 ml de alcohol etílico al 95% en un baño de agua. Se utilizó una solución alcohólica de 0.1 N KOH con cuatro gotas de 1% de fenolftaleína.

Por otra parte, la evaluación de dureza se realizó con una prueba de punción de las gorditas medidas según el método modificado por (Jang *et al*., 2015). Se utilizó el analizador de texturas (TA. XT Plus, Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido) con una cuchilla de corte de 5 mm para la medición a temperatura de ambiente (18 a 22°C). La cuchilla penetró en la muestra hasta 10 mm a 1.0 m/s. La fuerza máxima fue la medida de la dureza registrada en el gráfico de fuerza versus distancia de penetración.

El índice de peróxidos se determinó por medio de un fotómetro Hanna HI83730, se tomó una muestra de aceite proveniente de las gorditas con una jeringa previamente enjuagada, asegurándose de la eliminación de las burbujas antes de colocar la muestra en el vial de medición. Se mezcló la muestra invirtiendo el vial dos veces para homogeneizarla. A continuación, se colocó la celda con la muestra en el equipo y se realizó el blanco presionando el botón de cero. Posteriormente, se retiró el vial, se añadió el reactivo correspondiente y se colocó nuevamente la tapa. La mezcla se agitó vigorosamente durante un minuto con el temporizador activado y, una vez transcurrido este tiempo, se colocó nuevamente el vial en la celda y se esperó cinco minutos. Finalmente, antes de que concluyan los últimos 30 segundos del temporizador, se retiró el vial, se agitó un par de veces se limpió y colocó nuevamente en la celda, donde el equipo mostró la lectura en miliequivalentes.

Cuadro 1. Variables y métodos utilizados

Variable	Descripción	Método
Color (L*, a*, b*)	Evaluación de luminosidad y coordenadas cromáticas	Colorímetro Konica Minolta (CR410, Osaka, Japón)
Punto de fusión (°C)	Temperatura de transición sólido-líquido	Método tubo capilar Bernal *et al*. (2005)
Textura (N)	Determinación de firmeza o dureza	Analizador de textura (Jang *et al*., 2015).
Índice de acidez	Medida de ácidos grasos libres	Titulación con KOH Bernal *et al*. (2005)
Índice de peróxidos	Indicador de oxidación primaria	Fotómetro Hanna HI83730 (Noonim *et al*., 2022)
Migración de grasas	Medición de grasa desprendida del producto.	Método de papel filtro Onacik-GüR Y Zbikowska (2020).

Resultados y Discusión

Para esta etapa de la investigación se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) de un factor, considerando como factor de estudio el tipo de grasa, con dos tratamientos: (T1) gorditas de maíz con manteca de puerco y (T2) gorditas de maíz elaboradas con oleogel estructurado con 6% de cera de candelilla y adicionado con aceite esencial de orégano. Se realizaron cuatro repeticiones por tratamiento.

Se evaluó el efecto del tipo de grasa (manteca vs oleogel) sobre las propiedades fisicoquímicas de las gorditas de maíz. Los resultados se analizaron mediane un análisis de varianza ANOVA de una vía, estableciendo un nivel de significancia de ($p < 0.05$) para determinar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab 21.



Figura 1. Muestras de masa de gorditas de maíz cocidas trituradas elaboradas con manteca de puerco y oleogel a base de Aceite de Ajonjolí con 6% de cera de candelilla y 1 mm de aceite esencial de orégano.

Se evaluó el efecto del tipo de grasa sobre las propiedades de color (L*, a* y b*) en las gorditas de maíz elaboradas con manteca frente a las de oleogel. En cuanto a la luminosidad (L*), se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$). Los valores de luminosidad en las gorditas con manteca de puerco se encontraron en un rango de 43.44 ± 3.40, mientras que aquellas elaboradas con oleogel registraron 16.31 ± 1.81, lo que indica una menor luminosidad y, por consiguiente, una apariencia más oscura en este último tratamiento. Al respecto, Totosaus *et al*. (2024) observaron que la incorporación de sistemas de geles emulsionados que contenían oleogel de cera de candelilla modificaron la coloración de productos de panificación, obteniendo muestras más oscuras que las formulaciones convencionales. En los parámetros a* y b* se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$).

Para la coordenada a*, las gorditas elaboradas con manteca de puerco presentaron un valor promedio de 62.08 ± 11.43, mientras que aquellas elaboradas con oleogel registraron -4.32 ± 0.54. Por lo tanto, las muestras elaboradas con manteca presentaron una mayor contribución de las tonalidades rojizas y amarillas en comparación con las elaboradas con oleogel. Por otra parte, para la coordenada b*, obtuvieron valores de 166.50 ± 20.30 para las gorditas con manteca de puerco y 52.54 ± 0.59 para los tratamientos con oleogel, los valores positivos de b* indican una tendencia hacia tonalidades amarillas y las diferencias en este parámetro podrían estar relacionadas con las características de los sistemas lipídicos y su interacción con los componentes de la matriz alimentaria

durante el procesamiento térmico Liu *et al*. (2024).

La estructura del oleogel, así como la naturaleza del aceite utilizado para su elaboración, pueden modificar las propiedades ópticas del producto final. Martínez-Velasco *et al*. (2024) encontraron que la sustitución de margarina por oleogel de cera de candelilla y aceite de canola modificó la percepción del color de la miga de pan, observándose tonalidades menos claras y una tendencia hacia colores amarillo oscuro conforme aumentó la proporción de oleogel. Estos resultados demuestran que la incorporación de sistemas lipídicos estructurados puede influir en las características visuales de los productos alimenticios.

En conjunto, los resultados de L*, a* y b* indican que la sustitución de manteca de puerco por oleogel modificó significativamente las características colorimétricas de las gorditas de maíz. Estas modificaciones pueden representar un aspecto importante para la calidad del producto, debido a que el color constituye una característica visual que puede influir en su aceptación sensorial.

Para la variable dureza no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = 0.214$). Las gorditas elaboradas con manteca de puerco presentaron una dureza promedio de 103.40 ± 20.10, mientras que aquellas elaboradas con oleogel registraron un valor de 118.06 ± 6.59. Aunque numéricamente el tratamiento con oleogel presentó una dureza aproximadamente 14.18% mayor que el tratamiento control, esta diferencia no fue suficiente para demostrar un efecto significativo del tipo de grasa sobre la resistencia mecánica del producto.

Este comportamiento sugiere que la sustitución de la manteca de puerco por el oleogel estructurado con 6% de cera de candelilla permitió mantener características de dureza estadísticamente similares a las del producto convencional. Lo anterior puede explicarse considerando que los oleogeles desarrollan redes tridimensionales mediante la cristalización de agentes estructurantes, las cuales permiten inmovilizar el aceite líquido y proporcionar propiedades semisólidas al sistema lipídico (Tan *et al*., 2023). Asimismo, Liu *et al*. (2024) señalan que el efecto de los oleogeles sobre la textura de los alimentos depende de factores como el tipo de estructurante, la concentración utilizada y las interacciones con los componentes de la matriz alimentaria. En este sentido, los resultados obtenidos son favorables, ya que indican que la incorporación del oleogel no ocasionó modificaciones significativas en la dureza de las gorditas, lo que representa una característica importante para su posible utilización como sustituto de la manteca de puerco.

En cuanto al índice de acidez, presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$). Las gorditas elaboradas con manteca de puerco registraron un valor promedio de 1.40 ± 0.08%, mientras que las elaboradas con oleogel presentaron un valor considerablemente menor, de 0.36 ± 0.08%. Esto representa una reducción aproximada del 74.29 % en el índice de

acidez del tratamiento T2 respecto al tratamiento T1. El índice de acidez constituye un indicador relacionado con la cantidad de ácidos grasos libres presentes en la fracción lipídica, cuya concentración puede incrementarse como consecuencia de procesos de hidrólisis de los triglicéridos. En este contexto, el menor valor observado en las gorditas elaboradas con oleogel podría estar relacionado con las características del aceite utilizado para su elaboración, así como con su composición y condiciones de procesamiento. Adicionalmente, el aceite esencial de orégano contiene compuestos bioactivos, entre ellos carvacrol y timol, a los que se les atribuyen propiedades antioxidantes (Nurzyńska-Wierdak & Walasek-Janusz, 2025).

Respecto al índice de peróxidos, este permite estimar la presencia de productos primarios de oxidación, principalmente hidroperóxidos, generados durante las reacciones de deterioro oxidativo de los ácidos grasos. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.587$). Las gorditas elaboradas con manteca de puerco presentaron un rango de 11.00 ± 2.08 meq O_2/kg, mientras que las elaboradas con oleogel registraron 12.00 ± 2.80 meq O_2/kg. Aunque se observó un incremento en el tratamiento con oleogel, este no fue estadísticamente significativo, por lo que no es posible afirmar que el tipo de grasa utilizado haya modificado el nivel de oxidación. En base a los resultados se puede decir que, aunque el aceite esencial de orégano contiene compuestos fenólicos como el carvacrol y el timol, reconocidos por su actividad antioxidante (Nurzyńska-Wierdak & Walasek-Janusz, 2025), su incorporación al oleogel no produjo una reducción estadísticamente demostrable del índice de peróxidos en las gorditas. Esto podría estar relacionado con la concentración del aceite esencial, las características del aceite portador y las condiciones de procesamiento térmico, factores que pueden influir en la estabilidad oxidativa de los sistemas lipídicos.

Por último, para la migración de grasas no se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = 0.486$). Las gorditas elaboradas con manteca de puerco presentaron una migración de 0.28 ± 0.12%, mientras que aquellas elaboradas con oleogel registraron un valor de 0.435 ± 0.400%. Aunque el tratamiento con oleogel presentó un incremento numérico en la migración de grasa, la variabilidad observada entre las repeticiones fue considerable y no permitió establecer diferencias significativas respecto al tratamiento control. Este resultado sugiere que la sustitución de la manteca de puerco por el oleogel no modificó significativamente la capacidad de retención de grasa de las gorditas. De acuerdo con Tan *et al*. (2023), la estructura de los oleogeles puede contribuir a controlar el movimiento de la fase lipídica, aunque su capacidad de retención depende de la composición y características de la red estructural. Además, Borjas-Celaya *et al*. (2026), menciona que al evaluar oleogeles estructurados con cera de candelilla en tortillas de harina, se reportó que la sustitución de grasa convencional por oleogel no ocasionó diferencias significativas en la migración de grasa. Con

base a estos resultados, se puede indicar que el olegel presentó un comportamiento muy similar al de la manteca de puerco.

Cuadro 2. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) de una vía.

Parámetro	Manteca de puerco (T1)	Oleogel (T2)	P value
L*	43.44 ± 3.40	16.31 ± 1.81	**< 0.001**
a*	62.08 ± 11.43	−4.32 ± 0.54	**< 0.001**
b*	166.50 ± 20.30	52.54 ± 0.59	**< 0.001**
Dureza (N)	103.40 ± 20.10	118.06 ± 6.59	**< 0.214**
Índice de acidez (%)	1.40 ± 0.08	0.36 ± 0.08	**< 0.587**
Índice de peróxidos (meq O_2/kg)	11.00 ± 2.08	12.00 ± 2.80	**< 0.486**

Se consideraron diferencias estadísticamente significativas cuando **p < 0.05**. Los valores de p inferiores a 0.001 se reportan como **p < 0.001**.

Conclusiones

La sustitución de manteca de puerco por oleogel estructurado con 6 % de cera de candelilla y adicionado con aceite esencial de orégano modificó significativamente las características de color de las gorditas, observándose una disminución en los parámetros de color, evidenciando que el tipo de grasa empleado influye considerablemente en las características visuales del producto.

Según los resultados observados, el tipo de grasa no tuvo ningún efecto estadísticamente significativo sobre la dureza de las gorditas (p = 0.214). Aunque las muestras elaboradas con oleogel presentaron valores superiores, estos resultados prueban que la sustitución de la manteca de puerco por el oleogel permitió mantener una textura similar a la del producto convencional. Por otro lado, el índice de peróxidos tampoco obtuvo ifeencias significativas entre los tratamientos (p=0.587), lo que puede sugerir que el aceite esencial no demuestra una modificación significativa de la oxidación en este tipo de alimento.

Por último, los resultados sobre la migración de grasas tampoco presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (p = 0.486), evidenciando que el oleogel estructurado con 6% de cera de candelilla presentó un comportamiento estadísticamente similar al de la manteca de puerco respecto a este parámetro.

Finalmente, los resultados de este estudio demuestran que el oleogel constituye una alternativa potencial para sustituir la manteca de puerco en la elaboración de gorditas de maíz, ya que permitió conservar características de dureza, oxidación y migración de grasa estadísticamente similares a las del tratamiento convencional, además de presentar un menor índice de acidez.

Adicionalmente, debido a que su formulación utiliza ingredientes de origen vegetal y no incorpora componentes de origen animal, representa una alternativa compatible con el desarrollo de alimentos veganos. Esto amplía sus posibilidades de aplicación en la elaboración de productos a base de masa de maíz dirigidos a consumidores que buscan alternativas vegetales. Sin embargo, las modificaciones

observadas en el color deberán considerarse para futuras evaluaciones de aceptación sensorial y calidad del producto.

Agradecimientos

A la Facultad de Agronomía.
Al SECIHTI por el otorgamiento de la beca nacional de Posgrado.

Referencias Bibliográficas

Alejandre, M., Astiasarán, I., & Ansorena, D. (2019). Formulation of healthy low-fat meat products using oil-in-water emulsions as fat replacers. Meat Science, 153, 74–79. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.03.006

Barragán-Martínez, L., García-Segovia, P., & Martínez-Monzó, J. (2022). Oleogels as fat replacers and carriers of bioactive compounds in food. Food Chemistry Advances, 1, 100019.

Borjas-Celaya, A., Martínez-Ávila, G., Rodríguez-Romero, B., Rojas-Molina, R., & Aranda-Ledesma, N. (2026). Evaluación de aceites vegetales en la formulación de oleogeles con base de cera de candelilla orgánica y su aplicación en el desarrollo de una tortilla de harina. RIIIT Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, 14(82), 112–125. https://revistas.uadec.mx/RIIIT/es/article/view/1086

Chen, Y., Liang, R., & Zhang, Q. (2020). Lipid oxidation in oleogels: Mechanisms and influencing factors. Food Chemistry, 309, 125704. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125704

Cryst. Growth Des. (2023). Crystal Growth & Design, 23(3), 1422–1433. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c01334

de Souza, R. J., Mente, A., Maroleanu, A., Cozma, A. I., Ha, V., Kishibe, T., & Anand, S. S. (2015). Intake of saturated and trans unsaturated fatty acids and risk of all-cause mortality, cardiovascular disease, and type 2 diabetes: Systematic review and meta-analysis of observational studies. BMJ, 351, h3978.

Espina, L., Somolinos, M., Lorán, S., Conchello, P., García, D., & Pagán, R. (2019). Chemical composition of commercial citrus essential oils and evaluation of their antimicrobial and antioxidant properties. Food Control, 100, 74–80. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.01.016

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). Fats and fatty acids in human nutrition: Report of an expert consultation. FAO.

Hwang, H. S., Singh, M., Lee, S., & Winkler-Moser, J. K. (2020). Comparison of waxes for soybean oil oleogels: Rheological and thermal properties. Food Research International, 137, 109708. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109708

Liu, L., Gao, Z., Chen, G., Yao, J., Zhang, X., Qiu, X., & Liu, L. (2024). A comprehensive review: Impact of

oleogel application on food texture and sensory properties. Food Science & Nutrition, 12(6), 3849–3862. https://doi.org/10.1002/fsn3.4110

Luo, X., Li, L., Xie, H., & Zhang, Y. (2019). Oleogelation of edible oils: A review on the principles, methods, and applications. Food Research International, 123, 12–24.

Martínez-Velasco, A., Trujillo-Ramírez, D., Bustos-Vázquez, G., & Cervantes-Arista, C. (2024). The use of candelilla wax/canola oil oleogel in the formulation of sponge cake bread improves morphostructural and sensory properties. Discover Food, 4, Article 160. https://doi.org/10.1007/s44187-024-00245-x

Martins, A. J., Cerqueira, M. A., & Vicente, A. A. (2020). Influence of oleogelators on the physicochemical properties of edible oleogels. Trends in Food Science & Technology, 97, 451–463. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.015

Martins, A. J., Vicente, A. A., & Cunha, R. L. (2017). Influence of oil type and structuring method on the physicochemical properties of β-carotene-loaded oleogels. Food Research International, 100, 190–200.

Nurzyńska-Wierdak, R., & Walasek-Janusz, M. (2025). Chemical composition, biological activity, and potential uses of oregano (Origanum vulgare L.) and oregano essential oil. Pharmaceuticals, 18(2), Article 267. https://doi.org/10.3390/ph18020267

Oh, I. K., Lee, S., & Lee, J. (2019). Physical and thermal properties of oleogels structured with natural waxes. Journal of Food Engineering, 252, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.001

Onacik-Gür, S., & Żbikowska, A. (2020). Effect of high-oleic rapeseed oil oleogels on the quality of short-dough biscuits and fat migration. Journal of Food Science and Technology, 57(5), 1609–1618. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04193-8

Patel, A. R. (2020). A colloidal gel perspective for understanding oleogelation. Current Opinion in Food Science, 35, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.11.002

Pehlivanoğlu, H., Demirci, M., & Toker, O. S. (2016). Oleogels: Promising structuring materials for food products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(9), 1330–1340.

Pușcaș, A., Mureșan, V., & Muste, S. (2020). Oleogelation: An alternative to improve the nutritional profile of bakery and confectionery products. Journal of Food Quality, 2020, 1–12.

Reuss, R., Ball, M. J., & Mann, N. J. (2009). Dietary intake of trans fatty acids in Australia and New Zealand. Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition, 18(3), 367–372.

Sharma, S., Barkauskaite, S., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2021). Essential oils

as additives in food packaging. Food Chemistry, 343, 128403. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128403

Silva, J., Wang, Y., & Goh, K. K. T. (2021). Global trends and perspectives in fat structuring and margarine production. Food Hydrocolloids, 111, 106262.

Silva-Avellaneda, E., García, C., & Martínez, M. (2021). Functional and sensory properties of food oleogels: A review. Journal of Food Engineering, 290, 110211.

Tan, T. H., Chan, E. S., Manja, M., Tang, T. K., Phuah, E. T., & Lee, Y. Y. (2023). Production, health implications and applications of oleogels as fat replacer in food system: A review. Journal of the American Oil Chemists' Society, 100(9), 681–697. https://doi.org/10.1002/aocs.12720

Tanislav, D., Gómez-Estaca, J., & Herrero, A. M. (2022). Advances in edible oleogels: Structures, functionalities and applications. Trends in Food Science & Technology, 122, 178–190.

World Health Organization. (2018a). Healthy diet. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet

World Health Organization. (2018b). REPLACE: An action package to eliminate industrially produced trans-fatty acids. https://www.who.int/publications/i/item/9789241513807

World Health Organization. (2024). Countdown to 2023: WHO report on global trans fat elimination 2024. https://www.who.int/publications/i/item/9789240092497

Wijarnprecha, K., Thongngam, M., & Permadi, P. (2019). Oleogelation: A promising approach to improve the nutritional profile of foods. Food Reviews International, 35(4), 365–381.

Youngyo Kim. (2020). Impact of dietary fats on human health. Nutrition Reviews, 78(3), 137–147.

Zhu, Y., Bo, Y., & Liu, Y. (2019). Dietary fat intake and risk of type 2 diabetes: Meta-analysis of prospective cohort studies. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 29(9), 968–977.

Zulim Botega, D. C., Marangoni, A. G., Smith, A. K., & Goff, H. D. (2021). The potential application of oleogels in food products. Food & Function, 12(2), 772–789. https://doi.org/10.1039/D0FO02610G