



Memorias del 15o. Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

Mesa 4. Química

“Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global”

Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México

Octubre 15 y 16, 2026

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Coordinadores

Dr. Eleazar Aguirre Mandujano

Dra. Landy Hernández Rodríguez

M.C. Carlos Albor Calderón

M.C. Jaime Rocha Quiroz

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



ÍNDICE

1. **Revalorización de recursos agroindustriales del sureste: extracción verde y desarrollo de biomateriales**
Dr. Juan Carlos Cuevas Bernardino 7
2. **Elucidación multi-ómica de los mecanismos moleculares y las aplicaciones inmunitarias y farmacológicas de los interferones**
José Lázaro Francés Mesa..... 8
3. **Caracterización funcional comparativa del bagazo de pseudofruto de marañón (*Anacardium occidentale* L.) de variedades criollas y clones mejorados cultivados en Colombia**
Maria Alejandra Romero Martinez, Claudia Denise De Paula, Ricardo David Andrade Pizarro 23
4. **Obtención y caracterización de membranas de triacetato de celulosa derivadas de bagazo de agave para tratamiento de agua**
Perrusquía-Luévano Susana, Ballinas-Casarrubias María de Lourdes, González-Sánchez Guillermo 31
5. **Análisis Óptimo de la Síntesis de Quitosano por la Técnica de Desacetilación Química Heterogénea a Partir de Exoesqueletos de Camarón**
Abner Hesli Rojas Calva, Jaret del Carmen Ramírez Castellanos, Ventura Rodríguez Lugo y Jesús Ángel Arenas Alatorre 45
6. **Obtención del aceite se semillas de guamúchil (*Pithecellobium dulce*) y su transformación a biodiesel como un biocombustible amigable con el medio ambiente**
Benito Reyes-Trejo; Holber Zuleta-Prada, Lino Reyes, Vanessa Villegas Rodríguez, Sara Suarez Torres 55
7. **Contenido de metabolitos secundarios del extracto de hojas de *Vachellia farnesiana* con potencial bioactividad antitumoral**
Jorge Antonio Velázquez-Guzmán, Ma. del Carmen Hernández-Jaimes, Leticia Buendía-González, Carla Gracia-Morales. 73
8. **Mecanoquímica como ruta verde para la síntesis de fotocatalizadores Pt/TiO₂ y Pt/ZnO aplicados a la degradación de naranja de metilo**
Ana Luisa Díaz Hernández , Lidia Elena Chiñas Rojas, Daniel Montalvo Salinas, Ruby Sheila Gines Palestino 85



- | | |
|---|------------|
| 9. Estudio del perfil de metabolitos de variedades de maíces nativos por espectrometría de masas de ultra alta resolución
<i>Jesús Emanuel Rodríguez Sánchez, Carlos Yamel Gómez Cruz, Gerardo C. Noriega Altamirano, José Javier Castro Arellano, Gustavo G. Medina Mendoza, Yair Cruz Narváez</i> | 96 |
| 10. Caracterización de la composición nutricional y capacidad antioxidante de las flores de Opuntia albicarpa Scheinvar
<i>Fabiola Angélica López Huerta, Gabriela Salazar Cervantes, Abigail Ortiz Mendoza, Diana Guerra Ramírez</i> | 109 |
| 11. Efecto de Tratamientos por Calor-Humedad Sobre las Propiedades Morfológicas, Hidrofilicas y de Empaste del Almidón de la Harina de Ñame (Dioscórrea rotundata)
<i>Ana Luisa Paternina Contreras, Ricardo David Andrade Pizarro, Jorge Antonio Figueroa Flórez</i> | 119 |
| 12. Optimización del tiempo de reposo en nixtamalización para preservar compuestos bioactivos y la calidad tecnológica de tortillas de maíz morado (Zea mays L.)
<i>Verónica Virginia Tepixtle-Colohua; Leticia García-Cruz; Alma Leticia Saucedo-Yáñez; Benito Reyes-Trejo</i> | 131 |
| 13. Desarrollo de un MOF luminiscente de terbio para la detección selectiva de glifosato en agua
<i>Helen Paola Toledo Jaldin, José Isaac Cerón Ramírez, Luis David Rosales Vázquez, Alejandro Dorazco González</i> | 140 |
| 14. Efecto del método de secado en la preservación y caracterización de las capacidades antioxidantes de hongos silvestres comestibles
<i>Gabriela Salazar-Cervantes, Diana Guerra Ramírez, Fabiola A. López Huerta I y Salvador Valle Guadarrama</i> | 156 |
| 15. Biopesticide AI: Sistema de recuperación semántica, extracción de entidades y recomendación de biopesticidas a partir de literatura científica
<i>Luis Germán López Valdez y Holber Zuleta Prada</i> | 168 |
| 16. Sistema híbrido de descubrimiento acelerado (HDS) de biocontroladores fúngicos y sus metabolitos para la agricultura sostenible en México, impulsado por IA
<i>Luis Germán López Valdez y Holber Zuleta Prada</i> | 179 |

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- 17. Explorando las fronteras de las plantas medicinales mexicanas impulsado por IA: exploración in silico de metabolitos secundarios y bioactividad reportada a partir de literatura científica**
Luis Germán López Valdez y Holber Zuleta Prada 189
- 18. Callogénesis in vitro de tomate híbrido 2305 F1 a partir de explantes de tallo**
Imelda Rueda-López, María Cristina Guadalupe López-Peralta, Fernando Carlos Gómez-Merino, Manuel Sandoval-Villa 202
- 19. Extractos metanólicos a base de Echinocereus engelmannii y Echinocereus pectinatus muestran actividad contra glioblastoma humano**
Ana Laura Delgado Miranda, Nancy Edith Rodríguez Garza, Diana Elia Caballero Hernández, César Iván Romo Saénz 212
- 20. Evaluación de la capacidad antioxidante de extractos de semilla de guayaba (Psidium guajava L.)**
Sara Suárez Torres, Lino Joel Reyes Trejo, Benito Reyes Trejo, Yunuhe Abigail Velázquez Pérez 222
- 21. Variación de compuestos bioactivos en productos fermentados a partir de residuos vegetales**
Natalia Rodríguez Salazar, Salvador Valle Guadarrama, Ma. Ángeles Romero Rodríguez, Ofelia Sandoval Castilla, Guillermina Hernández Rodríguez 232
- 22. Modelando los mecanismos de las reacciones orgánicas empleando Gaussian 16 y GaussView6**
Lino Joel Reyes Trejo, María Inés Nicolás Vázquez, Benito Reyes Trejo, Sara Suárez Torres 240
- 23. Digestibilidad in vitro de almidón en tortillas de maíz sometidas a distintos tratamientos térmicos**
Yaraseth Arcangela Falcon-Franco, Consuelo Silvia Olivia Lobato-Calleros, Diana Itzel López-Monterrubio, Diana Edith López-Vázquez 247
- 24. Compuestos fenólicos y antioxidantes de híbridos de maíz (zea mays)**
Guillermina Hernández Rodríguez, Maritza Jiménez Martínez, Ricardo Domínguez Puerto, Diana Guerra Ramírez 260
- 25. Aprovechamiento de residuos de cáscara de Conostegia xalapensis (nigua) mediante extracción asistida de antocianinas con microondas y ultrasonido**
Ricardo Domínguez Puerto, Guillermina Hernández Rodríguez, Diana Guerra Ramírez 269

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- 26. Caracterización fisicoquímica y funcional de proteínas obtenidas de Acheta domesticus**
Rocío Santiago-Pelagio, Eleazar Aguirre-Mandujano, Ma. Angeles Romero Rodriguez, Consuelo Lobato-Calleros, Hugo Espinosa Andrews.....277
- 27. Caracterización proximal, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de Dioscorea alata L. de pulpa blanca**
Sergio Espinal-Hernández, Diana Guerra-Ramírez , Irma Salgado-Escobar, Landy Hernández-Rodríguez, Magali Anabel Cañarejo Antamba 282
- 28. Efecto de hidrocoloides sobre las propiedades funcionales y estabilidad de geles de almidón de arroz tipo Morelos**
Lara Hernández Gaby de Jesús, Aguirre-Mandujano Eleazar, López-Monterrubio Diana Itzel, Hernández-Rodríguez Blanca Elizabeth..... 292



Revalorización de recursos agroindustriales del sureste: extracción verde y desarrollo de biomateriales

Dr. Juan Carlos Cuevas Bernardino
Investigador por México-SECIHTI

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco,
Subsede Sureste

Resumen

Actualmente, la revalorización de los recursos fitogenéticos es crucial para rescatar y dar valor agregado, cultural y científico a las diversas variedades de plantas locales y silvestres que sirven para la alimentación y la agricultura regional. Por otra parte, la generación y acumulación de subproductos agroindustriales representa un gran reto y desafío ambiental crítico, lo que exige alternativas bajo el enfoque de economía circular. En este sentido, el objetivo de esta ponencia es presentar las investigaciones sobre revalorización de recursos fitogenéticos (frijol, ciricote y aguacate) del sureste de México, así como algunas estrategias de aprovechamiento de subproductos agroindustriales mediante tecnologías de extracción verde para su posterior aplicación y transformación en productos o biomateriales de valor agregado. En general, la presentación se enfocará en analizar los resultados más sobresalientes sobre la caracterización fisicoquímica y bioactividad de variedades locales de frijol, frutos de ciricote y aguacates criollos del sureste. De igual manera se abarcará el uso la extracción asistida por ultrasonido para aislar compuestos bioactivos y biopolímeros estructurales como método de extracción verde. Finalmente, se presentarán los principales hallazgos sobre las películas y composites biodegradables desarrollados a partir de biomateriales aislados de los subproductos agroindustriales del sureste del país.



Elucidación multi-ómica de los mecanismos moleculares y las aplicaciones inmunitarias y farmacológicas de los interferones

José Lázaro Francés Mesa^{1,2,*}

Mesa: Nuevas Perspectivas en Química: De lo Molecular a lo Global

Resumen

Los interferones (IFN) son mediadores fundamentales de la inmunidad innata y adaptativa, aunque la complejidad de sus programas transcripcionales y la diversidad de genes estimulados por IFN dificultan su comprensión integral. La presente revisión analiza cómo los enfoques ómicos y multiómicos han permitido dilucidar los mecanismos moleculares de los IFN, su impacto en la inmunidad y su utilidad en el desarrollo de fármacos. Se realizó una revisión bibliográfica de estudios que aplican transcriptómica, proteómica, metabolómica y genómica para investigar la señalización por IFN en contextos infecciosos, inflamatorios y tumorales. Las tecnologías ómicas han descifrado la arquitectura molecular de la señalización por IFN, identificando firmas reguladoras y redes de interacción proteica. Han revelado perfiles diferenciales en COVID-19, dengue, patologías inflamatorias y cáncer. La integración multiómica permite identificar biomarcadores pronósticos, estratificar pacientes y predecir respuestas terapéuticas. En el desarrollo de fármacos, facilita la evaluación de sinergias y rutas moduladas, como se evidencia en el estudio del HeberFERON. La perspectiva ómica ofrece un marco robusto para comprender la complejidad funcional de los IFN y potenciar sus aplicaciones biomédicas.

Palabras clave: Interferones; Biología de sistemas; Multiómica; Inmunidad antiviral; Señalización celular

¹ Facultad de Biología de la Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

² Grupo de Farmacogenómica de la Dirección de Investigaciones Biomédicas del Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología

* ORCID: 0009-0000-8303-6022

Email: joselazarofrancesmesa@gmail.com



Abstract

Interferons (IFNs) are fundamental mediators of innate and adaptive immunity, although the complexity of their transcriptional programs and the diversity of IFN-stimulated genes hinder comprehensive understanding. This review analyzes how omic and multi-omic approaches have enabled the elucidation of the molecular mechanisms of IFNs, their impact on immunity, and their utility in drug development. A bibliographic review of studies applying transcriptomics, proteomics, metabolomics, and genomics to investigate IFN signaling in infectious, inflammatory, and tumor contexts was conducted. Omic technologies have deciphered the molecular architecture of IFN signaling, identifying regulatory signatures and protein interaction networks. They have revealed differential profiles in COVID-19, dengue, inflammatory pathologies, and cancer. Multi-omic integration enables the identification of prognostic biomarkers, patient stratification, and prediction of therapeutic responses. In drug development, it facilitates the evaluation of synergies and modulated pathways, as evidenced in the study of HeberFERON. The omic perspective offers a robust framework for understanding the functional complexity of IFNs and enhancing their biomedical applications.

Keywords: Interferons; Systems biology; Multi-omics; Antiviral immunity; Cell signaling

Introducción

Los interferones (IFNs) constituyen una familia de citocinas esenciales en la respuesta inmune innata y adaptativa del huésped, desempeñando roles cruciales en la defensa antiviral, la inmunomodulación y la vigilancia antitumoral (Samuel, 2007; Schoggins, 2019). Su descubrimiento, que se remonta a mediados de la década de 1950 por Isaacs y Lindenmann, marcó un hito en la comprensión de la inmunidad viral, revelando inicialmente su capacidad para "interferir" con la replicación viral (Mylonas, 2024; Samuel, 2007). Desde entonces, la investigación ha desvelado una complejidad molecular y funcional considerable, clasificando los IFNs en tres tipos principales: Tipo I, Tipo II y Tipo III, cada uno con características estructurales, mecanismos de acción y roles biológicos distintivos, aunque con solapamientos funcionales significativos (Fish & Platanius, 2014; Hervas-Stubbs et al., 2011; Samuel, 2007).

Las tecnologías ómicas, que incluyen la transcriptómica, proteómica, metabolómica y lipidómica, han revolucionado la biología de sistemas al permitir una comprensión integral de las respuestas biológicas a diversas condiciones, incluyendo el complejo panorama de los interferones



(Eisfeld et al., 2024; Lipatova et al., 2021; Peng et al., 2009). Este paradigma de la biología de sistemas busca dilucidar las interacciones complejas dentro de un sistema biológico, ofreciendo una visión holística que supera las limitaciones de los enfoques moleculares individuales (Peng et al., 2009). La integración de múltiples capas ómicas proporciona un "compendio" de datos que iluminan respuestas globales del huésped a estímulos como infecciones virales o tratamientos farmacológicos (Eisfeld et al., 2024).

La integración y análisis de ensayos moleculares de alto rendimiento es un enfoque principal para la medicina de precisión al permitir la comprensión de variaciones específicas de pacientes y enfermedades. Los enfoques integrados permiten visiones integrales de procesos genéticos, bioquímicos, metabólicos, proteómicos y epigenéticos subyacentes a una enfermedad que, de otro modo, no podrían investigarse completamente mediante enfoques de ómica única (Nicora et al., 2020).

La aplicación de estos enfoques ómicos no solo ha permitido una caracterización detallada de la funcionalidad de la señalización de interferones a nivel de ARNm y proteínas (Lipatova et al., 2021), sino que también ha demostrado su capacidad para identificar mecanismos subyacentes en la resistencia celular a terapias, como en el caso de las células de glioblastoma multiforme frente a virus oncolíticos (Lipatova et al., 2021). Al comparar datos de susceptibilidad viral con análisis proteómicos, se ha evidenciado que una protección antiviral más robusta se correlaciona con mayores cambios de expresión y menores valores p para las proteínas sensibles al interferón (IFN), lo que subraya el poder de las ómicas para validar y extender hallazgos biológicos (Lipatova et al., 2021). La coherencia entre los cambios transcriptómicos y proteómicos, y su concordancia con los efectos citopáticos, demuestran la capacidad de las ómicas para ofrecer una comprensión integrada de las respuestas celulares (Lipatova et al., 2021). En última instancia, esta aproximación holística facilita la traslación de la investigación básica a aplicaciones clínicas, como la monitorización del potencial oncolítico de virus y la superación de resistencias en terapias (Lipatova et al., 2021; Peng et al., 2009).

El objetivo de esta revisión es analizar cómo los enfoques ómicos y multiómicos permiten dilucidar los mecanismos moleculares de los interferones, su impacto funcional en la inmunidad antiviral e inflamatoria, y su utilidad para la caracterización de enfermedades y el desarrollo racional de fármacos basados en interferones.



Materiales y Métodos

La presente investigación corresponde a una revisión bibliográfica sistemática de la literatura científica publicada entre 2007 y 2025, enfocada en la aplicación de tecnologías ómicas y multiómicas al estudio de los interferones. La búsqueda se realizó en las bases de datos PubMed, Scopus y Web of Science.

Se incluyeron estudios originales, revisiones sistemáticas y meta-análisis publicados en inglés y español que cumplieran con los siguientes criterios de inclusión: (1) estudios que aplicaran al menos una tecnología ómica (transcriptómica, proteómica, fosfoproteómica, metabolómica, genómica o lipidómica) para investigar la señalización de interferones; (2) investigaciones que abordaran el papel de los interferones en contextos infecciosos, inflamatorios, autoinmunes o tumorales; (3) trabajos que describieran aplicaciones de enfoques multiómicos en el desarrollo de fármacos derivados de interferones; y (4) artículos que proporcionaran datos suficientemente detallados sobre metodologías ómicas y resultados moleculares.

Se excluyeron estudios centrados exclusivamente en aspectos clínicos, editoriales, cartas al editor y estudios con tamaños muestrales insuficientes para análisis estadísticos robustos.

El análisis de datos se realizó mediante un enfoque de síntesis narrativa, organizando los hallazgos en categorías temáticas: (1) mecanismos moleculares de señalización de interferones; (2) papel de los interferones en la defensa antiviral; (3) implicaciones patológicas de la desregulación de interferones; y (4) aplicaciones de las ómicas en el desarrollo de fármacos derivados de interferones.

Mecanismos Moleculares de Interferones

La señalización de los interferones (IFN) es una cascada molecular intrincada que involucra la activación de receptores de superficie celular, quinasas citoplasmáticas y factores de transcripción, culminando en la expresión de genes estimulados por interferón (ISG) (Busnadiego et al., 2025; Schiefer & Hale, 2024). Este proceso no solo es crucial para la defensa antiviral, sino que también modula una amplia gama de funciones celulares, incluyendo el metabolismo y la proliferación.

La cascada de señalización canónica de los IFN Tipo I (IFN-I) y Tipo II (IFN-II) se inicia con la unión de los IFN a sus receptores específicos en la superficie celular. Para los IFN-I, esto incluye



IFNAR1 e IFNAR2 (Schiefer & Hale, 2024). Esta unión provoca la activación de quinasas asociadas a receptores, como JAK1 y TYK2 (Janus kinase), que a su vez fosforilan residuos de tirosina en los receptores y en los transductores de señales y activadores de la transcripción (STAT), específicamente STAT1 y STAT2 (Busnadiego et al., 2025; Schiefer & Hale, 2024). La fosforilación de STAT1 y STAT2 conduce a su dimerización y translocación al núcleo, donde se asocian con el factor regulador del interferón 9 (IRF9) para formar el complejo ISGF3 (IFN-stimulated gene factor 3), que se une a los elementos de respuesta a IFN en los promotores de los ISG, induciendo su transcripción (Schiefer & Hale, 2024). En el caso del IFN- γ (IFN-II), la señalización también involucra la vía JAK-STAT, principalmente a través de STAT1 (Wang et al., 2018).

Estudios recientes empleando enfoques proteómicos avanzados, como el marcaje de proximidad basado en TurboID y la espectrometría de masas, han permitido mapear exhaustivamente los proteomas proximales de los componentes clave de la cascada de señalización de IFN-I (Schiefer & Hale, 2024). Estos análisis han revelado una red de 103 proteínas de alta confianza en estrecha proximidad a IFNAR1, IFNAR2, JAK1, TYK2, STAT1, STAT2 e IRF9. Además de validar interacciones constitutivas conocidas (ej., STAT1-STAT2, STAT2-IRF9), también han identificado interacciones transitorias dependientes de la estimulación por IFN- α 2 (ej., TYK2-STAT1/STAT2, STAT1-IRF9, JAK1-IFNAR2) (Schiefer & Hale, 2024). Estas metodologías han permitido la identificación de nuevos reguladores, como PJA2, una ubiquitina ligasa E3, que actúa como regulador negativo de la señalización de IFN, destacando la complejidad de su modulación (Schiefer & Hale, 2024).

La fosforilación de proteínas juega un papel central en la transducción de señales de IFN. Un atlas dinámico de la fosforilación de proteínas celulares en respuesta a la estimulación con diferentes tipos de IFN (IFN α 2, IFN β , IFN ω , IFN γ o IFN λ 1) ha demostrado una fuerte superposición en los cambios fosfoproteómicos inducidos, pero también cambios únicos para cada tipo de IFN (Busnadiego et al., 2025). Esto sugiere diferencias sutiles en sus vías de señalización activadas. Se ha observado un enriquecimiento de factores implicados en la remodelación de la cromatina, la transcripción y el empalme del ARN entre las proteínas fosforiladas diferencialmente, lo que indica una influencia amplia de los IFN en la biología del ARN y la epigenética (Busnadiego et al., 2025). Un ejemplo notable es la fosforilación de PLEKHG3 en serina-1081, que crea un motivo de unión para las proteínas 14-3-3, coordinando la expresión génica estimulada por IFN (Busnadiego et al., 2025).

Más allá de la regulación génica, los IFN también modulan el metabolismo celular. El IFN- γ ,



por ejemplo, induce una rápida activación de la glucólisis aeróbica y una reducción de la fosforilación oxidativa en macrófagos M1 (Wang et al., 2018). Este cambio metabólico es crucial para mantener la viabilidad celular y la actividad inflamatoria de los macrófagos. El ATP generado por la glucólisis aeróbica es fundamental para sostener la actividad de las enzimas JAK activadas por IFN- γ , que a su vez fosforilan STAT1 (Wang et al., 2018). La inhibición de la glucólisis aeróbica no solo bloquea el fenotipo M1, sino también la producción de citocinas y quimiocinas proinflamatorias, resaltando la interconexión entre el inmunometabolismo y la señalización de IFN (Wang et al., 2018).

Además, el IFN- α puede inducir cambios significativos en el transcriptoma y proteoma de células beta pancreáticas humanas, con remodelación de la cromatina y alteraciones en el empalme alternativo (AS) y el uso del primer exón, aumentando la diversidad de transcritos (Colli et al., 2020). Estos cambios, junto con la modificación/degradación de proteínas, el estrés del RE y la expresión de MHC de clase I, pueden expandir los antígenos presentados por las células beta al sistema inmunitario, con implicaciones en enfermedades autoinmunes como la diabetes tipo 1 (Colli et al., 2020).

La señalización de IFN también reconfigura el interactoma humano. La proteómica cuantitativa ha identificado más de 26,000 interacciones proteicas, muchas de las cuales son exclusivas de la red estimulada por IFN (Kerr et al., 2020). El análisis diferencial de redes revela una reorganización en un amplio espectro de vías celulares en la respuesta antiviral, incluyendo un enriquecimiento significativo en interacciones relacionadas con la traducción y la biogénesis de ribosomas. Se han identificado interacciones proteína-proteína dependientes de IFN que median nuevos mecanismos reguladores a nivel transcripcional y traduccional, e incluso cambios en la composición ribosomal que amortiguan la síntesis de proteínas de genes estimulados por IFN (Kerr et al., 2020). Este mapa del interactoma de IFN proporciona una visión global de las complejas redes celulares activadas durante la respuesta antiviral y es un marco para comprender cómo estas redes se desregulan en enfermedades (Kerr et al., 2020).

Interferones en el Mecanismo de Defensa Antiviral

Los interferones (IFN) son citocinas cruciales en la respuesta inmunitaria innata y adaptativa contra las infecciones virales, orquestando una compleja cascada de eventos antivirales y antiinflamatorios (Busnadiego et al., 2025; Hadjadj et al., 2020). Tradicionalmente, se clasifican en



tres tipos: Tipo I (IFN- α , - β , - ω , - κ , - ϵ), Tipo II (IFN- γ) y Tipo III (IFN- λ) (Busnadiago et al., 2025; Hadjadj et al., 2020). Cada tipo de IFN, aunque comparte mecanismos de acción comunes, también posee especificidades que contribuyen a una respuesta antiviral diferencial (Busnadiago et al., 2025; Galbraith et al., 2022).

La inducción de los IFN Tipo I es una respuesta rápida a la infección viral, mediada por sensores inmunitarios innatos como los receptores tipo Toll (TLR) y los receptores tipo gen inducible por ácido retinoico I (RIG-I) (Hadjadj et al., 2020). Una vez producidos, los IFN Tipo I activan la vía de señalización de la cinasa Janus (JAK) y los transductores de señales y activadores de la transcripción (STAT), lo que lleva a la expresión de cientos de genes estimulados por IFN (ISG) (Hadjadj et al., 2020). Estos ISG codifican proteínas con diversas funciones antivirales, desde la inhibición de la replicación viral hasta la modulación de la respuesta inmunitaria del huésped (Lipatova et al., 2021).

La eficacia de la respuesta de IFN es fundamental para el control de la infección viral. Por ejemplo, en el contexto del COVID-19 grave, se ha observado una actividad alterada del IFN Tipo I, caracterizada por una alta carga viral y una respuesta inflamatoria excesiva (Hadjadj et al., 2020). Pacientes con COVID-19 leve a moderado muestran una respuesta de IFN robusta, mientras que aquellos con enfermedad grave presentan una reducción en la expresión de ISG como MX1, IFITM1 e IFIT2, a pesar de la sobreexpresión de genes relacionados con la señalización de IFN Tipo I como IFNAR1, JAK1 y TYK2 (Hadjadj et al., 2020). Esto sugiere una disfunción en la vía de señalización, donde la inducción no se traduce efectivamente en la expresión de los efectores antivirales.

Además, los estudios multiómicos han revelado una especialización funcional entre los subtipos de IFN. En COVID-19, la respuesta transcripcional antiviral en células inmunitarias circulantes se asocia predominantemente con IFNA2 e IFNG, mientras que las firmas proteómicas de daño endotelial y activación plaquetaria se vinculan con IFNB1 e IFNA6 (Galbraith et al., 2022). Esta especialización se extiende a las firmas metabólicas, donde IFNG se asocia fuertemente con la activación de la vía de la quinurenina (Galbraith et al., 2022). La producción diferencial de subtipos de IFN también se correlaciona con distintas constelaciones de tipos de células inmunitarias (Galbraith et al., 2022), lo que indica una secuencia temporal de producción de IFN coordinada con cambios en el compartimento de células inmunitarias periféricas (Galbraith et al., 2022).

La respuesta de los IFN es dinámica y compleja, como se ilustra en la infección por el virus del dengue (DENV), donde la modulación de numerosos genes regulados por interferón (IRG)



enriquece la señalización mediada por citocinas y la quimiotaxis (Usuda et al., 2023). La identificación de genes como IFI27, ISG15 y CYBRD1 como posibles biomarcadores de gravedad de la enfermedad del dengue subraya la relevancia clínica del interferoma (Usuda et al., 2023). La observación de que los IRG continúan expresándose diferencialmente en fases tardías de la enfermedad, e incluso enriquecen procesos biológicos relacionados con la mitosis y el ciclo celular, destaca la amplia influencia de los IFN más allá de la mera contención viral (Usuda et al., 2023).

Implicaciones de los Mecanismos Moleculares de los Interferones en Diversas Patologías y Enfermedades

Los mecanismos moleculares de los interferones (IFN), con su capacidad para orquestar respuestas inmunitarias y modular la expresión génica y el metabolismo celular, tienen profundas implicaciones en la patogénesis de una amplia gama de enfermedades, desde infecciones virales hasta cáncer, enfermedades autoinmunes y neurodegenerativas (Canto et al., 2018; Ejtehadifar et al., 2023; Fernández-García et al., 2024; Han et al., 2021; Hu et al., 2023; Li et al., 2025; Lira-Junior et al., 2025; Liu et al., 2024; Nian et al., 2024; Quan et al., 2024). La disfunción en la señalización de IFN puede ser tanto una causa como una consecuencia de la enfermedad, dictando la gravedad, progresión y respuesta al tratamiento.

En el cáncer, la vía del IFN Tipo I desempeña un papel bifacético. En tumores pulmonares con mutaciones en KRAS, la alteración de la vía del IFN Tipo I es una característica temprana y persistente (Fernández-García et al., 2024). La restauración de esta señalización mediante la expresión de IFN- β o la activación constitutiva de STING (Stimulator of Interferon Genes) transforma tumores inmunológicamente "fríos" en "calientes", haciéndolos susceptibles a la inmunoterapia (Fernández-García et al., 2024). Esto sugiere que la modulación de la vía del IFN-I puede ser una estrategia terapéutica para superar la resistencia a la inmunoterapia. El análisis multi-ómico ha identificado que genes estimulados por interferón (ISG) como OASL tienen una expresión elevada en ciertos tumores, lo que se correlaciona con el pronóstico y con la infiltración de células inmunitarias en el microambiente tumoral (Liu et al., 2024). OASL se asocia positivamente con macrófagos, células Th1 y células T foliculares auxiliares (Tfh), e inversamente con células T CD4⁺ o CD8⁺ vírgenes, lo que sugiere un papel en la modulación de la inmunidad antitumoral (Liu et al., 2024).

En el linfoma difuso de células B grandes (LDCBG), estudios proteómicos basados en espectrometría de masas han identificado el factor regulador del interferón 4 (IRF4) como un biomarcador pronóstico y de resistencia a fármacos (Ejtehadifar et al., 2023). Niveles altos de IRF4



y NUCB1 (Nucleobindin1) se asocian con un mal pronóstico en pacientes con LDCBG (Ejtehadifar et al., 2023), lo que resalta la importancia de la señalización de IFN en la oncogénesis hematológica.

Las enfermedades autoinmunes a menudo se caracterizan por una disregulación de la señalización de IFN. En la artritis reumatoide (AR), las vías de señalización de IFN están activadas en la mayoría de los tipos de células inmunitarias periféricas, incluyendo células NK, monocitos y linfocitos T y B (Han et al., 2021). Esto se asocia con un aumento de la polarización Th1 y una mayor producción de autoanticuerpos, lo que subraya el papel del IFN en la patogénesis de la AR (Han et al., 2021). En la esclerosis múltiple (EM), las células mononucleares de sangre periférica (CMSP) de los pacientes muestran una disregulación en la fosforilación de proteínas STAT, especialmente en respuesta al IFN- α (Canto et al., 2018). Esta activación aberrante se correlaciona con cambios en la expresión de moléculas de HLA, que son cruciales para la presentación de antígenos y la regulación de la respuesta inmune (Canto et al., 2018).

En la coriorretinopatía neovascular (CNV), se ha observado una reducción significativa de los niveles de IFN- β en la retina y el plasma de pacientes con CNV (Hu et al., 2023). El tratamiento con IFN- β no solo reduce el tamaño de la lesión, sino que también promueve la proliferación de células Th17, sugiriendo que la disfunción de IFN- β contribuye a la patología y que su modulación puede ser una diana terapéutica (Hu et al., 2023).

La heterogeneidad de la respuesta inmune impulsada por IFN es evidente en la COVID-19, donde el análisis multiómico ha revelado una heterogeneidad de la respuesta de IFN y su vinculación con el metabolismo lipídico (Lira-Junior et al., 2025). Pacientes con alta expresión de ISG (HIS) muestran una disregulación metabólica significativa, incluyendo reducciones en fosfolípidos, esfingolípidos y plasmalógenos, que se correlacionan con una activación inmunitaria alterada (Lira-Junior et al., 2025). Esto sugiere que la disregulación inmuno-metabólica impulsada por IFN puede contribuir a la inflamación posviral y a las secuelas del COVID prolongado (Lira-Junior et al., 2025). En el contexto de la comorbilidad de Lupus Eritematoso Sistémico (LES) y COVID-19, la interacción entre ambas enfermedades promueve la activación de la vía de señalización JAK-STAT mediada por IFN-I/II en monocitos/macrófagos (Nian et al., 2024). Esto resulta en una producción elevada de monocinas y un mayor riesgo de síndrome de liberación de citocinas (Nian et al., 2024).

Incluso en enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Parkinson (EP), los IFN Tipo I desempeñan un papel en la neuroinflamación (Quan et al., 2024). La microglía, células endoteliales y pericitos exhiben la mayor actividad de IFN-I, y la microglía en el mesencéfalo de



pacientes con EP muestra un estado de activación proinflamatoria. El factor de transcripción NFATc2 se ha identificado como un regulador clave de la respuesta de IFN Tipo I y de la activación microglial proinflamatoria en la EP (Quan et al., 2024), lo que sugiere posibles dianas terapéuticas para mitigar la progresión de la enfermedad.

Finalmente, en el mieloma múltiple (MM), un estudio multiómico ha revelado la activación de la señalización de IFN- γ e IFN- α , y un ciclo de retroalimentación positivo IFN- γ /IFN- α -B2M (Li et al., 2025). Este ciclo patológico, impulsado por IFN- γ secretado por células T CD8⁺ de memoria efectoras e IFN- α por monocitos no clásicos, potencia la expresión de B2M (parte del MHC de clase I), lo que a su vez estimula la presentación de antígenos y reactiva las vías de IFN, creando un círculo vicioso que promueve la proliferación, migración y resistencia a fármacos de las células tumorales (Li et al., 2025).

Empleo de las Ómicas como Herramientas en la Determinación de los Mecanismos Moleculares de Fármacos Derivados de Interferones

Las tecnologías ómicas han emergido como herramientas indispensables para desentrañar los mecanismos moleculares de los fármacos, especialmente aquellos derivados de interferones, ofreciendo una comprensión profunda de cómo estas terapias modulan las redes biológicas a niveles transcriptómico, proteómico y fosfoproteómico (Miranda et al., 2023; Vázquez-Blomquist et al., 2022). Esta aproximación multi-ómica es crucial para optimizar la eficacia de los tratamientos y descubrir nuevas aplicaciones para los interferones.

Un ejemplo es el estudio de HeberFERON, una co-formulación de IFN- α 2b e IFN- γ , que ha demostrado actividad antitumoral en glioblastoma (GBM) y otros tumores sólidos (Miranda et al., 2023; Vázquez-Blomquist et al., 2022). Mediante perfiles proteómicos y fosfoproteómicos basados en LC-MS/MS, se han identificado cambios significativos en el proteoma de células de GBM tratadas con HeberFERON (Vázquez-Blomquist et al., 2022). Se observó una regulación diferencial de cientos de proteínas y fosfopéptidos, con un enriquecimiento funcional en la señalización de IFN, mecanismos antivirales directos e indirectos, ciclo celular, organización del citoesqueleto, traducción/empalme de ARN, autofagia y reparación del ADN (Vázquez-Blomquist et al., 2022).

Particularmente, el análisis de fosfoproteómica reveló una alta interconexión en la red molecular de proteínas fosforiladas, con mTOR como un nodo central que interactúa con la maquinaria de traducción, el citoesqueleto y componentes de la autofagia (Vázquez-Blomquist et al., 2022). Estos hallazgos sugieren que HeberFERON no solo activa las vías canónicas de IFN



(JAK/STAT), sino que también modula vías no canónicas a través de quinasas como CDK1/CDK2, ERK1/2, PK ABC, mTOR y GSK3, regulando una vasta cantidad de sitios de fosforilación, algunos de ellos novedosos (Vázquez-Blomquist et al., 2022). Esta visión integrada a nivel de fosforilación es vital para comprender cómo el fármaco ejerce su efecto antiproliferativo y antitumoral.

Complementariamente, el análisis transcriptómico mediante microarrays ha proporcionado una comprensión detallada de los mecanismos distintivos de HeberFERON en comparación con los interferones individuales (Miranda et al., 2023). Se encontró que HeberFERON regula diferencialmente un conjunto de genes que se superponen solo parcialmente con los regulados por IFN- α 2b o IFN- γ solos (Miranda et al., 2023). El análisis de enriquecimiento funcional reveló que HeberFERON se dirige específicamente a varios eventos relacionados con el ciclo celular mitótico, en particular desde la prometafase hasta la anafase, y el punto de control del huso (Miranda et al., 2023). Se observó una regulación negativa significativa del factor de transcripción FOXM1, un actor clave en varias fases del ciclo celular y altamente expresado en GBM (Miranda et al., 2023).

La integración de los datos ómicos ha permitido postular un modelo mecanicista general donde HeberFERON estimula ampliamente la transcripción de genes involucrados en respuestas antivirales e inmunitarias, pero también se dirige específicamente a transcripciones que codifican proteínas del ciclo celular (Miranda et al., 2023). La señalización de STAT a través de factores como PKR y ATF3 converge en p53, y esta señal se propaga para afectar a los actores del ciclo celular y la proliferación, especialmente en GBM (Miranda et al., 2023). Estos hallazgos no solo explican el arresto de G2/M y el efecto antiproliferativo de HeberFERON en células de GBM, sino que también respaldan su uso como monoterapia o en combinación con quimioterapéuticos (Miranda et al., 2023).

Perspectivas Futuras

A pesar de los avances logrados, la aplicación de enfoques multiómicos al estudio de los interferones enfrenta desafíos sustanciales que definen las fronteras de la investigación futura. En primer lugar, la integración efectiva de datos provenientes de diferentes capas moleculares — genómica, epigenómica, transcriptómica, proteómica, fosfoproteómica, metabolómica y lipidómica— requiere el desarrollo de algoritmos bioinformáticos más sofisticados que permitan capturar las relaciones causales y las dinámicas temporales subyacentes a la respuesta interferónica. La mayoría de los estudios actuales ofrecen instantáneas estáticas o series temporales limitadas, lo que dificulta la reconstrucción de los flujos de información que determinan la progresión desde la



detección del estímulo hasta la resolución de la respuesta.

La incorporación de tecnologías de resolución espacial y temporal constituye una dirección prioritaria. La transcriptómica espacial y la proteómica de células individuales permitirán diseccionar la heterogeneidad celular en las respuestas a interferones dentro de tejidos complejos, como el microambiente tumoral o los focos inflamatorios en enfermedades autoinmunes.

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático emergen como herramientas indispensables para navegar la complejidad de los datos multiómicos. Los modelos de aprendizaje profundo, entrenados con grandes cohortes de pacientes caracterizados multiómicamente, podrían identificar patrones predictivos de respuesta a terapias basadas en interferones que escapan a los análisis convencionales.

Conclusiones

Los enfoques ómicos y multiómicos han transformado la comprensión de los interferones al revelar una complejidad molecular que trasciende la vía canónica JAK-STAT, incorporando dimensiones reguladoras como la fosforilación diferencial de proteínas, la remodelación del interactoma, la modulación metabólica y el control epigenético, lo que ha permitido identificar nuevos reguladores de la señalización y mecanismos de control fino que modulan la especificidad de la respuesta antiviral. La aplicación de estas tecnologías ha demostrado su utilidad clínica al revelar firmas moleculares asociadas a subtipos específicos de interferón en patologías como COVID-19, enfermedades autoinmunes y cáncer, facilitando la estratificación pronóstica de pacientes y la identificación de biomarcadores predictivos. El caso de HeberFERON ejemplifica el potencial traslacional de la integración multiómica, cuya caracterización transcriptómica, proteómica y fosfoproteómica permitió elucidar su mecanismo de acción diferencial, validando su aplicación en glioblastoma. En conjunto, la evidencia analizada establece que la perspectiva ómica ofrece un marco robusto para comprender la complejidad funcional de los interferones y potenciar su aplicación biomédica, aunque el desafío futuro reside en traducir esta riqueza de conocimiento en estrategias terapéuticas precisas, capaces de modular selectivamente las respuestas interferónicas en función del contexto patológico mediante la integración continua de la biología de sistemas, la inteligencia artificial y la medicina traslacional.

Literatura Citada



Busnadiego, I., Lork, M., Fernbach, S., Schiefer, S., Tsolakos, N., & Hale, B. G. (2025). An atlas of protein phosphorylation dynamics during interferon signaling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(13), e2412990122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2412990122>

Canto, E., Isobe, N., Didonna, A., Hauser, S. L., & Oksenberg, J. R. (2018). Aberrant STAT phosphorylation signaling in peripheral blood mononuclear cells from multiple sclerosis patients. *Journal of Neuroinflammation*, 15(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s12974-018-1105-9>

Colli, M. L., Ramos-Rodríguez, M., Nakayasu, E. S., Alvelos, M. I., Lopes, M., Hill, J. L. E., ... & Eizirik, D. L. (2020). An integrated multi-omics approach identifies the landscape of interferon- α -mediated responses of human pancreatic beta cells. *Nature Communications*, 11(1), 2584. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16327-0>

Eisfeld, A. J., Anderson, L. N., Fan, S., Walters, K. B., Halfmann, P. J., Westhoff Smith, D., ... & Kawaoka, Y. (2024). A compendium of multi-omics data illuminating host responses to lethal human virus infections. *Scientific Data*, 11(1), 328. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03124-3>

Ejtehadifar, M., Zahedi, S., Gameiro, P., Cabeçadas, J., da Silva, M. G., Beck, H. C., & Sørensen, S. (2023). Meta-analysis of MS-based proteomics studies indicates interferon regulatory factor 4 and Nucleobindin1 as potential prognostic and drug resistance biomarkers in diffuse large B cell lymphoma. *Cells*, 12(1), 196. <https://doi.org/10.3390/cells12010196>

Fernández-García, F., Fernández-Rodríguez, A., Fustero-Torre, C., Piñeiro-Yáñez, E., Wang, H., Lechuga, C. G., ... & Barbacid, M. (2024). Type I interferon signaling pathway enhances immune-checkpoint inhibition in KRAS mutant lung tumors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(36), e2402913121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2402913121>

Fish, E. N., & Platanias, L. C. (2014). Interferon receptor signaling in malignancy: A network of cellular pathways defining biological outcomes. *Molecular Cancer Research*, 12(12), 1691-1703. <https://doi.org/10.1158/1541-7786.MCR-14-0450>

Galbraith, M. D., Kinning, K. T., Sullivan, K. D., Araya, P., Smith, K. P., Granrath, R. E., ... & Espinosa, J. M. (2022). Specialized interferon action in COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(11), e2116730119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2116730119>

Hadjadj, J., Yatim, N., Barnabei, L., Corneau, A., Boussier, J., Smith, N., ... & Terrier, B. (2020). Impaired type I interferon activity and inflammatory responses in severe COVID-19 patients. *Science*, 369(6504), 718-724. <https://doi.org/10.1126/science.abc6027>

Han, L., Tu, S., Shen, P., Yan, J., Huang, Y., Ba, X., ... & Wang, Y. (2021). A comprehensive transcriptomic analysis of alternate interferon signaling pathways in peripheral blood mononuclear



cells in rheumatoid arthritis. *Aging*, 13(16), 20511-20533. <https://doi.org/10.18632/aging.203432>

Hervas-Stubbs, S., Perez-Gracia, J. L., Rouzaut, A., Sanmamed, M. F., Le Bon, A., & Melero, I. (2011). Direct effects of type I interferons on cells of the immune system. *Clinical Cancer Research*, 17(9), 2619-2627. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-10-1114>

Hu, Y., Qi, S., Zhuang, H., Zhuo, Q., Liang, Y., Kong, H., ... & Xu, G. (2023). Proteotranscriptomic analyses reveal distinct interferon-beta signaling pathways and therapeutic targets in choroidal neovascularization. *Frontiers in Immunology*, 14, 1163739. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1163739>

Kerr, C. H., Skinnider, M. A., Andrews, D. D. T., Madero, A. M., Chan, Q. W. T., Stacey, R. G., ... & Foster, L. J. (2020). Dynamic rewiring of the human interactome by interferon signaling. *Genome Biology*, 21(1), 140. <https://doi.org/10.1186/s13059-020-02050-y>

Li, C., Liao, Y., Xu, L., & Chen, Y. (2025). Multi-omics reveals immune features in immune and non-immune cells, an IFN- γ /IFN- α -B2M positive feedback loop, and targeted metabolic therapy in multiple myeloma. *Frontiers in Immunology*, 16, 1575079. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1575079>

Lipatova, A. V., Soboleva, A. V., Gorshkov, V. A., Bubis, J. A., Solovyeva, E. M., Krasnov, G. S., ... & Kochetkov, S. N. (2021). Multi-omics analysis of glioblastoma cells' sensitivity to oncolytic viruses. *Cancers*, 13(21), 5268. <https://doi.org/10.3390/cancers13215268>

Lira-Junior, R., Ambikan, A. T., Cederholm, A., Rezene, S., Mikaeloff, F., Akusjärvi, S. S., ... & Neogi, U. (2025). Systemic multi-omics analysis reveals interferon response heterogeneity and links lipid metabolism to immune alterations in severe COVID-19. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2025.03.14.643374>

Liu, Y., Yang, R., Zhang, M., Yang, B., Du, Y., Feng, H., ... & Li, Y. (2024). Multi-omics landscape of Interferon-stimulated gene OASL reveals a potential biomarker in pan-cancer: From prognosis to tumor microenvironment. *Frontiers in Immunology*, 15, 1402951. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1402951>

Miranda, J., Vázquez-Blomquist, D., Bringas, R., Fernandez-de-Cossio, J., Palenzuela, D., Novoa, L. I., ... & Guillén, G. (2023). A co-formulation of interferons alpha2b and gamma distinctively targets cell cycle in the glioblastoma-derived cell line U-87MG. *BMC Cancer*, 23(1), 806. <https://doi.org/10.1186/s12885-023-11330-2>

Mylonas, A. (2024). Neurological impact of type I interferon dysregulation. In *Rare Neurodegenerative Disorders — New Insights*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1006023>



Nian, Z., Mao, Y., Xu, Z., Deng, M., Xu, Y., Xu, H., ... & Zhang, F. (2024). Multi-omics analysis uncovered systemic lupus erythematosus and COVID-19 crosstalk. *Molecular Medicine*, 30(1), 81. <https://doi.org/10.1186/s10020-024-00851-6>

Nicora, G., Vitali, F., Dagliati, A., Geifman, N., & Bellazzi, R. (2020). Integrated multi-omics analyses in oncology: A review of machine learning methods and tools. *Frontiers in Oncology*, 10, 1030. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.01030>

Peng, X., Chan, E. Y., Li, Y., Diamond, D. L., Korth, M. J., & Katze, M. G. (2009). Virus-host interactions: From systems biology to translational research. *Current Opinion in Microbiology*, 12(4), 432-438. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2009.06.003>

Quan, Y., Liu, D., Huang, H., Du, X., Liu, C., & Li, Y. (2024). Single-cell multi-omics analysis identifies NFATc2 as a master regulator of type I interferon response and neuroinflammation in Parkinson's disease. *Nature Communications*, 15(1), 5434. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49704-0>

Samuel, C. E. (2007). Interferons, interferon receptors, signal transducer and transcriptional activators, and interferon regulatory factors. *Journal of Biological Chemistry*, 282(28), 20045-20046. <https://doi.org/10.1074/jbc.R700025200>

Schiefer, S., & Hale, B. G. (2024). Proximal protein landscapes of the type I interferon signaling cascade reveal negative regulation by PJA2. *Nature Communications*, 15(1), 4484. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48800-5>

Schoggins, J. W. (2019). Interferon-stimulated genes: What do they all do? *Annual Review of Virology*, 6, 567-584. <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-092818-015756>

Usuda, J. N., Praça, D. R., Fonseca, D. L. M., Marques, A. H. C., Filgueiras, I. S., Chaves, V. G. B., ... & Cabral-Marques, O. (2023). Interferome signature dynamics during the anti-dengue immune response: A systems biology characterization. *Frontiers in Immunology*, 14, 1243516. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1243516>

Vázquez-Blomquist, D., Hardy-Sosa, A., Baez, S. C., Besada, V., Palomares, S., Guirola, O., ... & Guillén, G. (2022). Proteomics and phospho-proteomics profiling of the co-formulation of type I and II interferons, HeberFERON, in the glioblastoma-derived cell line U-87 MG. *Cells*, 11(24), 4068. <https://doi.org/10.3390/cells11244068>

Wang, F., Zhang, S., Jeon, R., Vuckovic, I., Jiang, X., Lerman, A., ... & Chen, W. (2018). Interferon gamma induces reversible metabolic reprogramming of M1 macrophages to sustain cell viability and pro-inflammatory activity. *EBioMedicine*, 30, 303-316. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2018.02.009>



Caracterización funcional comparativa del bagazo de pseudofruto de marañón (*Anacardium occidentale* L.) de variedades criollas y clones mejorados cultivados en Colombia

Maria Alejandra Romero Martinez¹, Claudia Denise De Paula¹, Ricardo David Andrade Pizarro¹

Mesa: Nuevas perspectivas en química: de lo molecular a lo global

Resumen

El bagazo de pseudofruto de marañón (*Anacardium occidentale* L.) constituye un subproducto agroindustrial con alto potencial como fuente de compuestos bioactivos; sin embargo, su composición funcional ha sido poco estudiada en diferentes genotipos cultivados en Colombia. El objetivo de esta investigación fue comparar la composición funcional y la capacidad antioxidante del bagazo de cuatro genotipos de marañón, correspondientes a dos variedades criollas (Criollo Amarillo y Criollo Rojo) y dos clones mejorados (Clon Mapiria y Clon Agrosavia Caribe). Los pseudofrutos fueron recolectados en Chinú, Córdoba (Colombia), y el bagazo obtenido tras la extracción del jugo fue sometido a extracción hidroalcohólica asistida por ultrasonido. Se determinaron compuestos fenólicos totales, taninos condensados y capacidad antioxidante mediante los ensayos FRAP y DPPH. Los datos fueron analizados mediante ANOVA y prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Se encontraron diferencias significativas entre los genotipos evaluados. El Criollo Rojo presentó los mayores contenidos de compuestos fenólicos (1343,30 mg GAE/100 g), taninos condensados (2213,00 mg catequina/100 g), así como la mayor capacidad antioxidante determinada por FRAP (177,35 mg TE/100 g) y DPPH (1912,57 mg TE/100 g), seguido por el Criollo Amarillo. En contraste, los clones mejorados registraron valores significativamente inferiores para todas las variables evaluadas. Los resultados evidencian que las variedades criollas poseen un perfil funcional superior, destacándose como una alternativa promisoría para el aprovechamiento agroindustrial del bagazo y el desarrollo de ingredientes funcionales con potencial antioxidante.

Palabras clave: bagazo de marañón; composición funcional; capacidad antioxidante; valorización de subproductos.

¹ Universidad de Córdoba, Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales, Montería, Colombia.
malejandrromero@correo.unicordoba.edu.co, cdepaula@correo.unicordoba.edu.co y
rdandrade@correo.unicordoba.edu.co



Abstract

Cashew apple bagasse (*Anacardium occidentale* L.) is an agro-industrial by-product with considerable potential as a source of bioactive compounds; however, its functional composition has been scarcely investigated among different genotypes cultivated in Colombia. This study aimed to compare the functional composition and antioxidant capacity of bagasse from four cashew genotypes, including two creole varieties (Yellow Creole and Red Creole) and two improved clones (Mapiria Clone and Agrosavia Caribe Clone). Cashew apples were harvested in Chinú, Córdoba (Colombia), and the bagasse obtained after juice extraction was subjected to ultrasound-assisted hydroalcoholic extraction. Total phenolic compounds, condensed tannins, and antioxidant capacity were determined using the FRAP and DPPH assays. Data were analyzed by analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test ($p \leq 0.05$). Significant differences were found among the evaluated genotypes. The Red Creole exhibited the highest contents of total phenolic compounds (1343.30 mg GAE/100 g), condensed tannins (2213.00 mg catechin/100 g), and antioxidant capacity determined by both FRAP (177.35 mg TE/100 g) and DPPH (1912.57 mg TE/100 g), followed by the Yellow Creole. In contrast, the improved clones showed significantly lower values for all evaluated variables. These findings demonstrate that the local varieties possess a superior functional profile, highlighting their potential for the agro-industrial valorization of cashew apple bagasse and the development of functional ingredients with antioxidant properties.

Keywords: cashew apple bagasse; functional composition; antioxidant capacity; by-product valorization.

Introducción

El marañón (*Anacardium occidentale* L.) es un cultivo tropical de gran importancia económica por el valor comercial de su nuez. Su pseudofruto, aunque representa cerca del 90 % de la biomasa total, sigue siendo subutilizado por su alta perecibilidad y escasa industrialización, generando pérdidas de hasta el 80 % de la producción mundial (Gutiérrez-Paz et al., 2024; Osei et al., 2025). Del procesamiento del pseudofruto se obtiene el bagazo (cashew apple pomace, CAP), que constituye cerca del 40 % de los residuos agroindustriales del marañón. Tradicionalmente considerado un desecho, hoy se reconoce como una biomasa lignocelulósica valiosa dentro de la economía circular, útil para reducir el impacto ambiental y agregar valor a la cadena productiva (Aidoo et al., 2022; Aslam et al., 2024; Gutiérrez-Paz et al., 2024; Osei et al., 2025).

El bagazo conserva gran parte de los compuestos del tejido fresco, siendo fuente de fibra, carbohidratos, minerales, proteínas y metabolitos secundarios (fenoles, flavonoides, carotenoides, taninos) con alta capacidad antioxidante. Compuestos como ácido gálico, ácido



ferúlico, catequinas y quercetina le confieren propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas y antidiabéticas, lo que lo posiciona como materia prima para ingredientes funcionales (Reina et al., 2022; Gutiérrez-Paz et al., 2024; Osei et al., 2025). Investigaciones recientes han incorporado el bagazo en panificación, bebidas fermentadas, cárnicos, snacks y pastas, mejorando su contenido de fibra, capacidad antioxidante y estabilidad oxidativa, además de optimizar métodos de extracción y caracterización funcional (Herkenhoff et al., 2023; Osei et al., 2025).

Sin embargo, la mayoría de estudios se centra en caracterización general o desarrollo de nuevos alimentos, existiendo poca información sobre la variabilidad funcional del bagazo entre genotipos de *Anacardium occidentale*, especialmente entre variedades criollas y clones mejorados. Dado que la acumulación de metabolitos depende de la interacción genotipo-ambiente (Gutiérrez-Paz et al., 2024), comparar materiales genéticos es clave para identificar fuentes con mayor potencial antioxidante, como lo señala la revisión de Osei et al. (2025). Por ello, el objetivo de este trabajo fue comparar la composición funcional y la capacidad antioxidante del bagazo de cuatro variedades de marañón (dos criollas y dos clones mejorados) cultivadas en Colombia, para identificar los genotipos con mayor potencial como ingrediente funcional.

Materiales y Métodos

Localización del estudio y material vegetal

El estudio se desarrolló entre abril y junio de 2025. Los pseudofrutos de marañón (*Anacardium occidentale* L.) fueron recolectados en plantaciones ubicadas en el municipio de Chinú, departamento de Córdoba, Colombia. Los análisis se realizaron en los laboratorios del Departamento de Ingeniería de Alimentos, sede Berástegui de la Universidad de Córdoba (Montería, Colombia). Se evaluaron cuatro genotipos de marañón, correspondientes a dos variedades criollas (Criollo Amarillo y Criollo Rojo) y dos clones mejorados (Clon Mapiria y Clon Agrosavia Caribe). Los pseudofrutos fueron seleccionados en estado de madurez comercial mediante inspección visual, considerando frutos sanos, enteros y libres de daños físicos o fitosanitarios. Posteriormente, fueron lavados y desinfectados mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio (150 ppm) durante 10 min.

Obtención del bagazo y extracción de compuestos bioactivos

El jugo se extrajo utilizando un extractor semindustrial GRT® (Colombia). El bagazo obtenido fue pasado cinco veces a través del extractor para reducir el tamaño de partícula. Para cada genotipo se recolectaron pseudofrutos provenientes de diferentes árboles con el fin de representar la variabilidad del material vegetal evaluado. Posteriormente, los pseudofrutos



fueron procesados para la obtención del bagazo y se realizaron tres extracciones independientes para las determinaciones funcionales.

La extracción de los compuestos bioactivos se realizó mediante sonicación siguiendo la metodología descrita por Cruz et al. (2022), con modificaciones. El bagazo se mezcló con una solución hidroalcohólica acidificada compuesta por etanol al 60 % (v/v) y ácido cítrico al 2 % (m/v), preparados con reactivos grado analítico (Merck®, Darmstadt, Alemania), empleando una relación sólido:líquido de 1:4 (g/mL), de acuerdo con Andrade et al. (2023). La extracción se efectuó durante 10 min a una frecuencia de 40 kHz y los extractos fueron analizados inmediatamente.

Determinación de la composición funcional

Los compuestos fenólicos totales se determinaron mediante el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu descrito por Singleton y Rossi (1965), utilizando ácido gálico (Sigma-Aldrich®, St. Louis, MO, Estados Unidos) como patrón y expresando los resultados como mg de ácido gálico equivalente (GAE)/100 g de muestra. Los taninos condensados se cuantificaron mediante el método de la vainillina descrito por Broadhurst y Jones (1978), utilizando catequina (Sigma-Aldrich®, St. Louis, MO, Estados Unidos) como estándar. La capacidad antioxidante se evaluó mediante los ensayos FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) y DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), siguiendo las metodologías descritas por Benzie y Strain (1996) y Bibi Sadeer et al. (2020), respectivamente. Para estos análisis se emplearon reactivos grado analítico de Merck® (Darmstadt, Alemania) y Sigma-Aldrich® (St. Louis, MO, Estados Unidos). Las lecturas de absorbancia se realizaron en un lector multimodal de microplacas Varioskan™ LUX (Thermo Fisher Scientific Inc., Vantaa, Finlandia).

Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar (DCA), considerando cuatro tratamientos correspondientes a los genotipos evaluados: Criollo Amarillo, Criollo Rojo, Clon Mapiria y Clon Agrosavia Caribe. Todas las determinaciones funcionales se realizaron por triplicado.

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) y las diferencias entre medias se determinaron mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Previamente, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SAS® versión 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, Estados Unidos).



Resultados y discusión

La composición funcional del bagazo de pseudofruto de marañón presentó diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los cuatro genotipos evaluados (Figura 1). En general, las variedades criollas exhibieron mayores concentraciones de compuestos fenólicos y taninos condensados, así como una mayor capacidad antioxidante determinada mediante los ensayos FRAP y DPPH, en comparación con los clones mejorados.

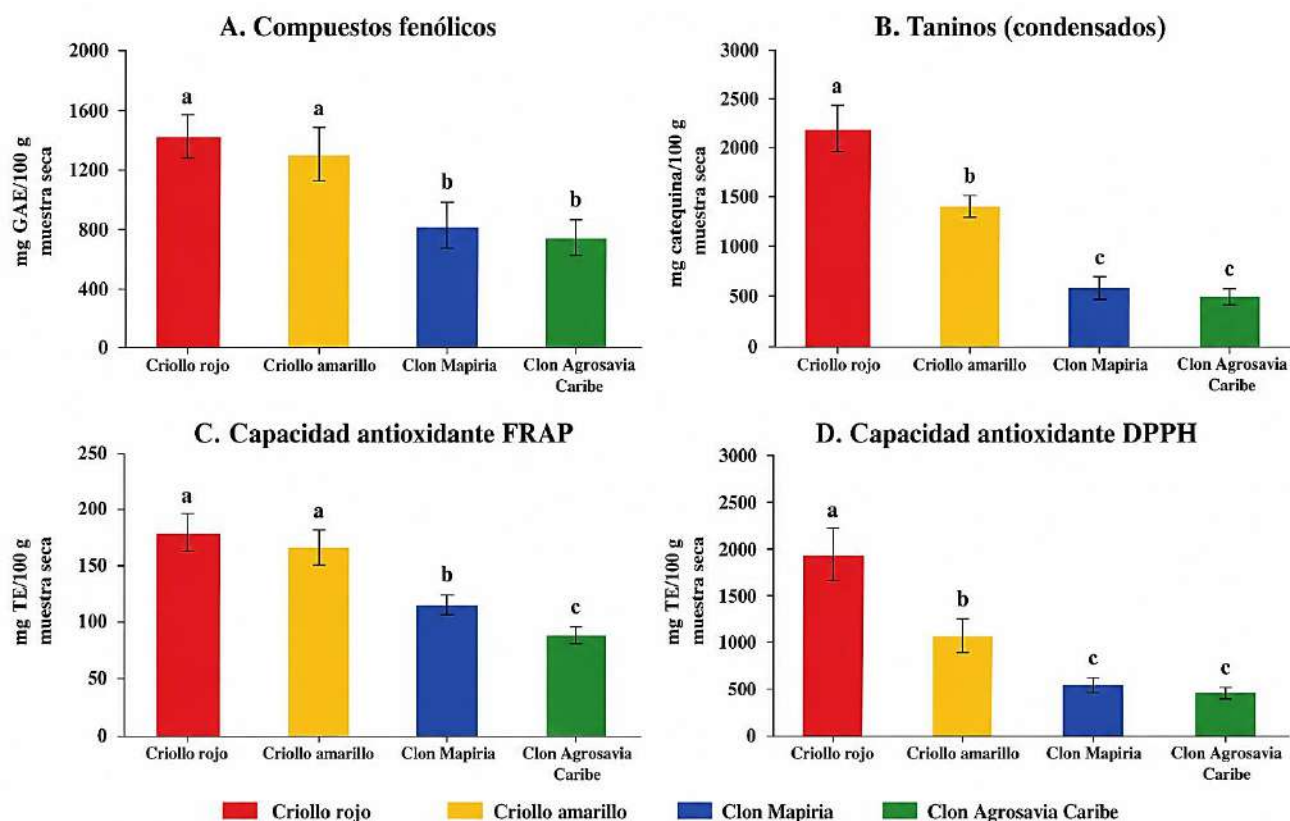


Figura 1. Comparación de la composición funcional y la capacidad antioxidante del bagazo de pseudofruto de variedades criollas y clones mejorados de marañón (*Anacardium occidentale* L.). A) Compuestos fenólicos totales (mg GAE/100 g de muestra seca); B) Taninos condensados (mg catequina/100 g de muestra seca); C) Capacidad antioxidante determinada mediante el ensayo FRAP (mg TE/100 g de muestra seca); y D) Capacidad antioxidante determinada mediante el ensayo DPPH (mg TE/100 g de muestra seca). Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre genotipos según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

El contenido de compuestos fenólicos totales osciló entre 749,21 y 1343,30 mg GAE/100 g



de muestra seca. El Criollo Rojo presentó la mayor concentración ($1343,30 \pm 58,30$ mg GAE/100 g), seguido por el Criollo Amarillo ($1260,05 \pm 139,18$ mg GAE/100 g), sin diferencias significativas entre ambas variedades ($p > 0,05$). En contraste, los clones Mapiria y Agrosavia Caribe registraron contenidos significativamente menores ($p \leq 0,05$). Estas diferencias evidencian una marcada variabilidad en la acumulación de compuestos fenólicos entre genotipos de bagazo de pseudofruto de marañón, comportamiento que ha sido atribuido a la influencia del componente genético sobre la biosíntesis de metabolitos secundarios (Cruz et al., 2022; Andrade et al., 2023).

Una tendencia similar se observó para los taninos condensados. El Criollo Rojo presentó el mayor contenido ($2213,00 \pm 123,45$ mg catequina/100 g de muestra seca), seguido por el Criollo Amarillo ($1391,10 \pm 43,70$ mg/100 g), mientras que los clones mejorados mostraron concentraciones inferiores a 600 mg catequina/100 g de muestra seca. Los taninos constituyen uno de los principales grupos de compuestos fenólicos presentes en el bagazo del pseudofruto de marañón y participan tanto en los mecanismos de defensa de la planta como en su capacidad antioxidante. Estos compuestos actúan como donadores de electrones e hidrógeno, por lo que incrementos en su concentración suelen reflejarse en una mayor actividad antioxidante de los extractos vegetales (Amarowicz & Pegg, 2024; Gutiérrez-Paz et al., 2024; Osei et al., 2025).

La capacidad antioxidante determinada mediante los ensayos FRAP y DPPH presentó el mismo comportamiento observado para los compuestos fenólicos y los taninos. El bagazo del Criollo Rojo registró los mayores valores en ambos ensayos, seguido por el Criollo Amarillo, mientras que los clones Mapiria y Agrosavia Caribe presentaron actividades significativamente menores ($p \leq 0,05$). La estrecha correspondencia entre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante observada en este estudio confirma que estos metabolitos representan los principales responsables del poder reductor y de la capacidad captadora de radicales libres del bagazo de marañón, como ha sido ampliamente descrito para esta matriz vegetal y otros subproductos agroindustriales ricos en compuestos fenólicos (Cruz et al., 2022; Andrade et al., 2023; Bibi Sadeer et al., 2020).

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado por Cruz et al. (2022), quienes demostraron que el bagazo de pseudofruto de marañón conserva una elevada concentración de compuestos bioactivos aun después de la extracción del jugo. De igual manera, Andrade et al. (2023) evidenciaron que los extractos fenólicos obtenidos a partir de este subproducto mantienen una importante actividad antioxidante y elevada estabilidad durante procesos de microencapsulación, resaltando su potencial como ingrediente funcional. Asimismo, revisiones recientes destacan que el bagazo de marañón constituye una fuente importante de fibra y compuestos fenólicos con aplicaciones promisorias en el desarrollo de alimentos funcionales y estrategias de valorización de subproductos agroindustriales (Osei et al., 2025).



La superioridad funcional observada en las variedades criollas podría atribuirse a diferencias genéticas en la biosíntesis y acumulación de metabolitos secundarios. La producción de compuestos fenólicos depende de la interacción entre el genotipo, las condiciones ambientales y el estado fisiológico del fruto, factores que determinan la expresión de enzimas involucradas en la ruta de los fenilpropanoides y, por consiguiente, la acumulación de antioxidantes naturales. En este contexto, los resultados obtenidos indican que las variedades criollas, particularmente el Criollo Rojo, representan una fuente promisoría de compuestos bioactivos para el desarrollo de ingredientes funcionales y estrategias de aprovechamiento agroindustrial del bagazo de marañón (Cruz et al., 2022; Andrade et al., 2023; Osei et al., 2025).

Conclusiones

El bagazo de pseudofruto de marañón presentó diferencias significativas en su composición funcional y capacidad antioxidante entre los genotipos evaluados, lo que evidencia una marcada influencia del material genético sobre la acumulación de compuestos bioactivos. En particular, las variedades criollas -y de manera destacada el Criollo Rojo- registraron los mayores contenidos de compuestos fenólicos y taninos condensados, así como la mayor capacidad antioxidante según los ensayos FRAP y DPPH, superando significativamente a los clones mejorados. Estos resultados confirman que el bagazo de las variedades criollas constituye una fuente más rica de metabolitos bioactivos con potencial funcional, y en conjunto resaltan el valor de este subproducto, especialmente de las variedades criollas. Los resultados obtenidos constituyen una base para la selección de genotipos con mayor potencial funcional y respaldan futuras investigaciones orientadas al aislamiento de compuestos bioactivos y al desarrollo de alimentos funcionales elaborados a partir del bagazo de pseudofruto de marañón.

Literatura Citada

- Aidoo, R., & Kwofie, E. M. (2022). Circularity of cashew apples: Examining the product–process pathways, techno-functional, nutritional/phytochemical qualities for food applications. *ACS Food Science & Technology*, 2(7), 1051–1066. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00093>
- Amarowicz, R., & Pegg, R. B. (2024). Condensed tannins -Their content in plant foods, changes during processing, antioxidant and biological activities. *Advances in Food and Nutrition Research*, 110, 327–398. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2024.03.001>
- Andrade, R., da Silva, D., Souza, M., de Oliveira, R., Maciel, M., Porto, A. L. F., Melo, E. A., Arruda, L. F., & Porto, T. S. (2023). Microencapsulation of phenolic compounds from cashew apple (*Anacardium occidentale* L.) agro-food waste: Physicochemical



- characterization, antioxidant activity, biodisponibility and stability. Food Chemistry Advances, 3, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100364>
- Aslam, N., Hassan, S. A., Mehak, F., Zia, S., Bhat, Z. F., Yıkmış, S., & Aadil, R. M. (2024). Exploring the potential of cashew waste for food and health applications: A review. Future Foods, 9, 100319. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100319>
- 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>
- Bibi Sadeer, N., Montesano, D., Albrizio, S., Zengin, G., Mahomoodally, M. F., & Mollica, A. (2020). The versatility of antioxidant assays in food science: Measuring reactive oxygen species scavenging activity. Antioxidants, 9(8), 709. <https://doi.org/10.3390/antiox9080709>
- Broadhurst, R. B., & Jones, W. T. (1978). Analysis of condensed tannins using acidified vanillin. Journal of the Science of Food and Agriculture, 29(9), 788–794. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740290908>
- Cruz, L., Durán, D., Forero, L., Tarapuez, L., Durán, D., Carazzone, C., & Sierra, R. (2022). Chemical composition and bioactive compounds of cashew (*Anacardium occidentale*) apple juice and bagasse from Colombian varieties. Heliyon, 8(5), e09528. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09528>
- Gutiérrez-Paz, C., Rodríguez-Moreno, M.-C., Hernández-Gómez, M.-S., & Fernández-Trujillo, J. P. (2024). The cashew pseudofruit (*Anacardium occidentale*): Composition, processing effects on bioactive compounds and potential benefits for human health. Foods, 13(15), 2357. <https://doi.org/10.3390/foods13152357>
- Osei, E. D., Amotoe-Bondzie, A., Pokuah, A. A., Laar, W. S., Afoakwah, N. A., & Ivanišová, E. (2025). Cashew apple pomace: Chemical composition and applications in functional food product development -A review. Food Science & Nutrition, 13(4), e70185. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70185>
- 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.



Obtención y caracterización de membranas de triacetato de celulosa derivadas de bagazo de agave para tratamiento de agua

Perrusquía-Luévano Susana¹, Ballinas-Casarrubias María de Lourdes², González-Sánchez Guillermo¹

Mesa: Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

El aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para el desarrollo de materiales funcionales constituye una estrategia sostenible para la valorización de residuos agroindustriales. En este contexto, el bagazo de *Agave tequilana* Weber var. *azul* representa una fuente renovable para la obtención de biopolímeros con aplicaciones en el tratamiento de agua. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y caracterizar membranas de triacetato de celulosa (CTA) derivadas de bagazo de agave y evaluar el efecto de la incorporación de polietilenglicol (PEG) sobre sus propiedades estructurales y de permeabilidad. El CTA se obtuvo a partir de celulosa pretratada con un solvente eutéctico profundo de cloruro de colina-ácido láctico (ChCl-LA), seguido de una acetilación heterogénea, alcanzando un grado de sustitución de 2.70. Las membranas se prepararon mediante evaporación de solvente incorporando PEG como agente formador de poros. La caracterización mediante FTIR y difracción de rayos X confirmó la obtención del CTA y evidenció una disminución de la cristalinidad asociada a la incorporación de PEG, sin modificar la estructura química del polímero. Las micrografías por microscopía electrónica de barrido mostraron la transición de morfologías densas a estructuras más porosas tras la incorporación de PEG. Asimismo, las membranas de CTA derivadas de bagazo de agave alcanzaron una permeabilidad hidráulica de hasta $8.11 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$, superando el desempeño de las membranas de CTA comercial. Estos resultados demuestran el potencial del bagazo de agave como materia prima para la fabricación de membranas sostenibles con aplicaciones en separación y tratamiento de agua.

Palabras clave: Bagazo de agave, solventes eutécticos profundos, triacetato de celulosa, membranas, tratamiento de agua.

¹ Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV S.C.), Chihuahua, Chihuahua, México.

² Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

susana.perrusquia@cimav.edu.mx, guillermo.gonzalez@cimav.edu.mx, mballinas@uach.mx



agave como materia prima sostenible para la fabricación de membranas con potencial en procesos de separación y tratamiento de agua.

Materiales y Métodos

El triacetato de celulosa (CTA) empleado en este estudio se obtuvo a partir de bagazo de *Agave tequilana* Weber var. *azul* pretratado con un solvente eutéctico profundo de cloruro de colina-ácido láctico (ChCl-LA), siguiendo la metodología previamente reportada por Perrusquía-Luévano et al., (2025). Como material de referencia se utilizó triacetato de celulosa comercial (Sigma-Aldrich). Para la preparación de las membranas se emplearon diclorometano (DCM) y polietilenglicol (PEG 6000), ambos de grado analítico.

Preparación de membranas

Las membranas se prepararon mediante el método de evaporación de solvente. Los CTA se disolvieron por separado en diclorometano (DCM) a concentraciones de 0.4% p/v y 1.0% p/v, bajo agitación magnética, hasta obtener soluciones homogéneas. Posteriormente, se incorporó PEG 6000 en las formulaciones correspondientes como agente formador de poros y las soluciones se mantuvieron bajo agitación hasta su completa disolución.

Una vez disuelto, se filtró para eliminar impurezas; el filtrado se vertió en un molde de vidrio y se dejó evaporar a 35 ± 2 °C en una cámara de incubación (ShellLab). Las membranas formadas se desprendieron mediante inmersión en agua destilada. Las membranas obtenidas se designaron como CTA-LA-M y CTA-Com-M, según el origen del polímero.

Caracterización de las membranas

La estructura química de las membranas se analizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) en un equipo IRAffinity-1S (Shimadzu, Japón), en el rango de 400 a 4000 cm^{-1} . La organización cristalina se evaluó mediante difracción de rayos X (XRD) en un difractómetro PANalytical X'Pert PRO, utilizando radiación $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406$ Å) en un rango de 2θ de 5 a 45°. La morfología de la sección transversal y la superficie de las membranas se observó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM) en equipos Hitachi SU3500 y JEOL JSM7401F, respectivamente. Las muestras se fracturaron criogénicamente en nitrógeno líquido y se recubrieron con oro para su visualización.

Propiedades mecánicas y análisis dinámico-mecánico

Las propiedades mecánicas de las membranas se evaluaron mediante análisis dinámico-mecánico (DMA) en un equipo RSA3 (TA Instruments). Los ensayos se realizaron en modo de deformación por



cizalladura a temperatura ambiente (25 °C), con una velocidad de deformación de 0.033 mm s⁻¹. A partir de las curvas de esfuerzo-deformación, se determinaron el módulo de Young, la resistencia a la tracción y la deformación a la ruptura.

La temperatura de transición vítrea (T_g) se obtuvo a partir del máximo del módulo de pérdida (E'') en función de la temperatura, utilizando las mismas condiciones experimentales.

Evaluación de la permeabilidad hidráulica

La permeabilidad hidráulica de las membranas se evaluó en una celda de filtración de flujo cruzado (GE SEPA Osmonic) con un área efectiva de 0.007 m². Las membranas se acondicionaron con agua destilada antes de las pruebas. La permeabilidad se determinó midiendo el volumen de permeado en función del tiempo a una presión de 1.38 bar, calculando el flujo de agua como volumen de permeado por unidad de área, presión y tiempo (L m⁻² h⁻¹ bar⁻¹).

Resultados y Discusión

Morfología por SEM

Las micrografías SEM de las membranas preparadas mediante evaporación-precipitación se presentan en la Figura 1. Las membranas de CTA-LA y CTA-Com sin PEG mostraron una morfología densa y homogénea, sin poros visibles, característica de membranas formadas por la evaporación lenta del disolvente (Vatanpour et al., 2022). Sin embargo, se observaron diferencias en el espesor: las membranas de CTA-LA fueron significativamente más gruesas que las de CTA-Com, lo que sugiere diferencias en la organización del polímero durante su formación.

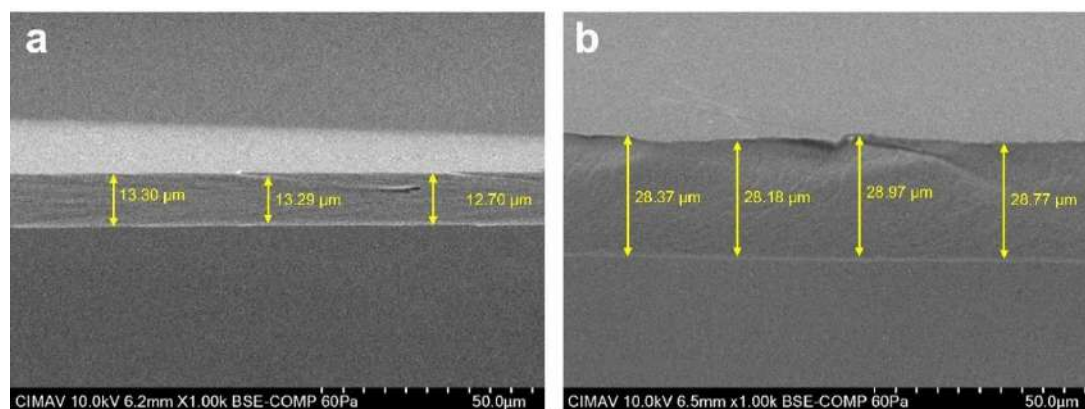


Figura 1. Micrografías transversales obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, 1000X) de membranas de evaporación-precipitación al 0,4 % (p/v): (a) CTA-Com-M; (b) CTA-LA-M



La incorporación de PEG indujo una transición morfológica notable. Las membranas con 5% de PEG mostraron la aparición de estructuras porosas, con una distribución heterogénea de poros tanto en la superficie como en la sección transversal (Figura 2). Esta transición de morfologías densas a porosas se atribuye al efecto del PEG como agente formador de poros, que, durante la evaporación del solvente, genera regiones ricas en PEG que, posteriormente, son lixiviadas al contacto con el agua, dejando vacíos en la matriz polimérica (Bai et al., 2012; Chou et al., 2007). La formación de poros es particularmente evidente en las membranas de CTA-LA con 5% de PEG, lo que sugiere que la lignina residual pudo haber favorecido la formación de una estructura más abierta.

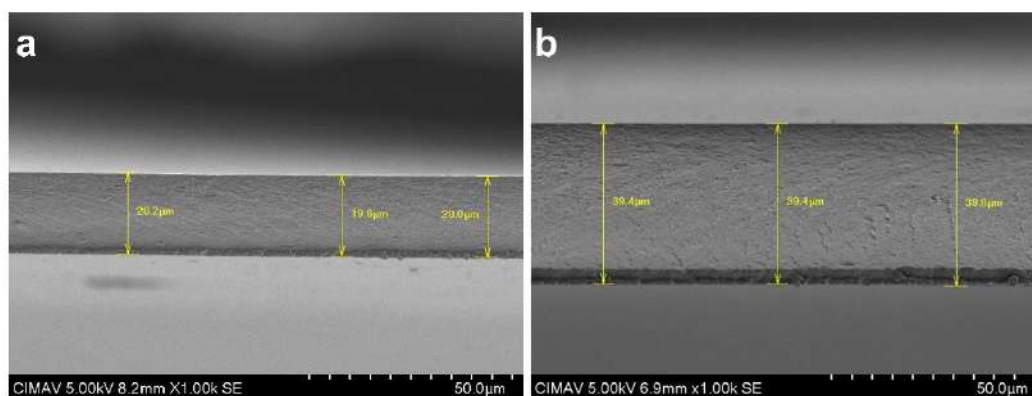


Figura 2. Micrografías de sección transversal obtenidas mediante FE-SEM (1000X) de membranas de CTA-LA al 1.0 % (p/v): (a) sin PEG y (b) con un 5 % de PEG 6000.

Caracterización estructural por FTIR

Los espectros FTIR de las membranas de CTA-LA y CTA-Com se muestran en la Figura 3. En todos los casos se observaron las bandas características del triacetato de celulosa, incluyendo la vibración de estiramiento del grupo carbonilo ($C=O$) alrededor de 1750 cm^{-1} y las vibraciones de los grupos $C-O-C$ en la región de $1200-1050\text{ cm}^{-1}$, lo que confirma la presencia del grupo acetato en la estructura del polímero. No se detectaron bandas adicionales atribuibles al PEG en las membranas que lo incorporaron, lo que sugiere que este actuó como un agente formador de poros que fue eliminado durante la formación de la membrana, sin modificar químicamente la estructura del CTA. Este comportamiento es consistente con lo reportado por otros autores en sistemas de acetato de celulosa con aditivos poliméricos (Alves Cerqueira et al., 2008; Lv et al., 2007).

La similitud de los espectros entre las membranas de CTA-LA y CTA-Com indica que el proceso de obtención del CTA a partir del bagazo de agave mediante DES no introdujo modificaciones químicas indeseadas en la estructura del polímero. Este resultado es relevante porque confirma que el material derivado de biomasa es químicamente análogo al comercial, lo que justifica su uso como sustituto sostenible.

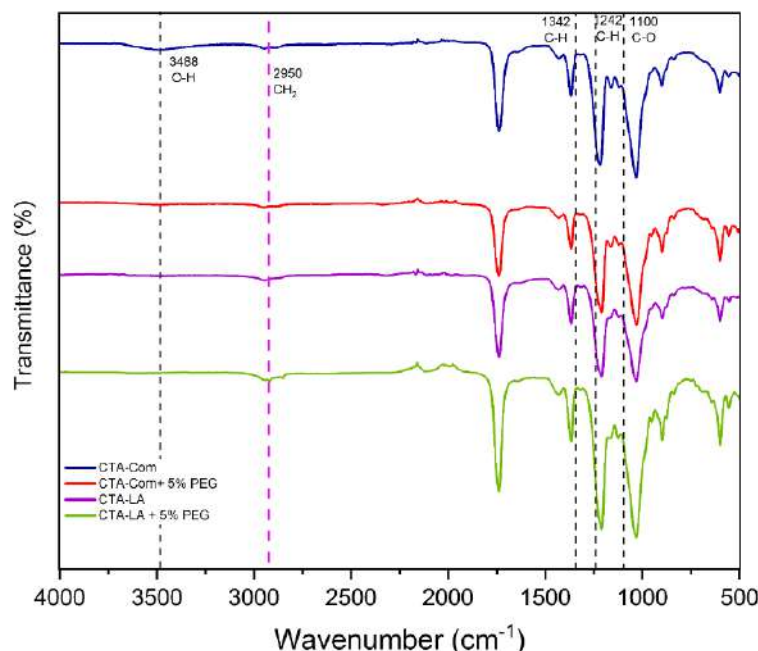


Figura 3. Espectros FTIR de membranas de CTA-LA sin PEG y con un 5 % de PEG 6000, en comparación con el producto comercial CTA-Com.

Análisis de Difracción de Rayos X (DRX)

Los patrones de difracción de rayos X (Figura 4) mostraron diferencias significativas en la organización cristalina entre las membranas de CTA-LA y CTA-Com. Las membranas de CTA-Com presentaron picos característicos alrededor de $2\theta = 7^\circ$, 10.4° y 17.4° , asociados a regiones semicristalinas típicas del triacetato de celulosa (Chen et al., 2016). En contraste, las membranas de CTA-LA mostraron un patrón de difracción desplazado, con picos principales en $2\theta = 9.5^\circ$ y 16.2° , lo que sugiere una organización polimérica distinta, posiblemente influida por la lignina residual (aproximadamente 9%) presente en la celulosa derivada del bagazo (Perrusquía-Luévano et al., 2025).

La incorporación de PEG indujo cambios notables en los patrones de difracción de ambos tipos de membranas. En el caso de CTA-Com-M, se observó una disminución en la intensidad de los picos cristalinos, mientras que en CTA-LA-M los picos se desplazaron ligeramente hacia ángulos 2θ mayores y mostraron una reducción en su intensidad. Estos cambios indican una disminución del empaquetamiento de las cadenas poliméricas y un incremento de la fracción amorfa del polímero, lo cual es consistente con el papel del PEG como disruptor de la organización cristalina (Maheswari et al., 2013; Shoba et al., 2020). La reducción de la cristalinidad es un factor clave que favorece el aumento de la permeabilidad, ya que las regiones amorfas facilitan la difusión del agua a través de la matriz polimérica.

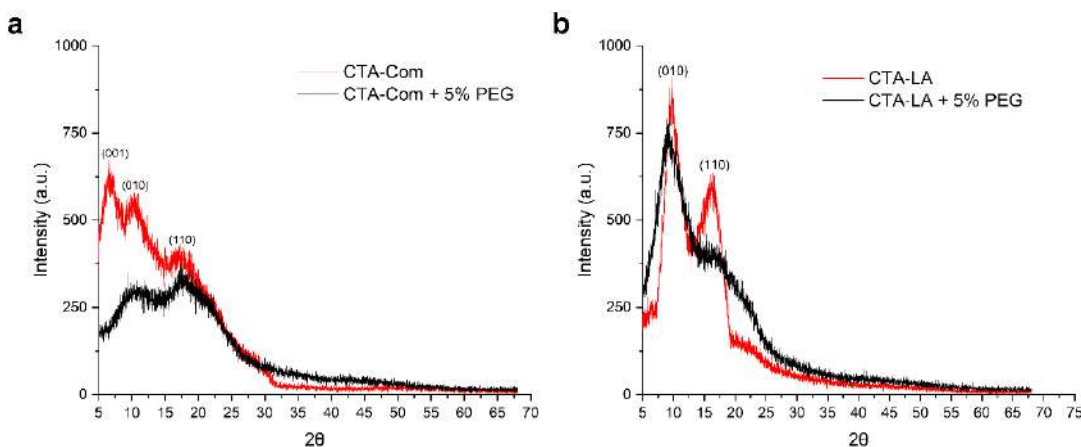


Figura 4. Patrones de difracción de rayos X (DRX) de membranas obtenidas por evaporación-precipitación al 1.0 % (p/v), con y sin 5.0 % de PEG 6000: (a) CTA-Com; (b) CTA-LA.

Propiedades mecánicas y permeabilidad

El comportamiento mecánico y de transporte de las membranas se evaluó mediante análisis dinámico-mecánico (DMA) y pruebas de permeabilidad hidráulica. El cuadro 1 resume los valores del módulo de Young, la temperatura de transición vítrea (T_g) y el flujo de agua para las membranas de CTA-LA y CTA-Com, con y sin la incorporación de PEG al 5% (p/p).

Cuadro 1. Propiedades y permeabilidad de las membranas de triacetato de celulosa al 1.0% m/v.

Membrana	PEG (%p/p)	Módulo de Young (MPa)	T_g (°C)	Presión (banjo) (L m ⁻² h ⁻¹ bar)
CTA-Com (0.4%)	0	988 ± 74.7	183.19	27.58
CTA-LA (0.4%)	0	1250 ± 45.2	170.01	27.58
CTA-Com (1.0%)	0	1000 ± 1.7	184.78	27.58
CTA-Com (1.0%)	5	750 ± 212	187.35	27.58
CTA-LA (1.0%)	0	2500 ± 770	173.88	27.58
CTA-LA (1.0%)	5	867 ± 231	179.81	1.38

Los resultados de DMA mostraron diferencias significativas en el comportamiento mecánico de las membranas en función del origen del polímero y la incorporación de PEG. Las membranas de CTA-LA sin PEG presentaron un módulo de Young de 2500 ± 770 MPa, significativamente mayor que el de las membranas de CTA-Com (1000 ± 1.7 MPa). Este incremento en la rigidez se atribuye a la presencia de lignina residual (aproximadamente 9%) en el CTA derivado de bagazo, la cual puede actuar como un refuerzo dentro de la matriz polimérica, restringiendo la movilidad de las cadenas y aumentando la rigidez del material (Lopatina et al., 2020; Manjarrez Nevárez et al., 2011).



membranas de CTA-LA, el flujo obtenido fue inferior al de las membranas preparadas al 0.4 % (p/v) sin PEG (3.38 vs. 8.11 L m⁻² h⁻¹ bar⁻¹). Este resultado refleja la transición de un mecanismo de transporte gobernado por solución-difusión en membranas densas hacia uno dominado por flujo convectivo a través de poros (Mulder, 1996). La menor permeabilidad observada sugiere que, aunque el PEG indujo la formación de poros, estos no desarrollaron una red completamente interconectada capaz de superar el transporte de agua de la membrana densa.

Conclusiones

En el presente trabajo se demostró la viabilidad de obtener membranas de triacetato de celulosa (CTA) a partir de bagazo de *Agave tequilana* Weber var. *azul*, empleando un pretratamiento con solvente eutéctico profundo de cloruro de colina-ácido láctico (ChCl-LA) y acetilación heterogénea, alcanzando un grado de sustitución de 2.70, comparable al de materiales comerciales. Las membranas fueron preparadas exitosamente mediante evaporación de solvente, lo que confirmó la procesabilidad del CTA derivado de biomasa.

La caracterización estructural reveló que el CTA obtenido a partir de bagazo de agave es químicamente análogo al comercial, pero presenta una organización cristalina distinta, influenciada por la lignina residual (~9%) presente en la celulosa precursora. La incorporación de polietilenglicol (PEG) como agente formador de poros permitió modificar la morfología de las membranas, induciendo la transición de estructuras densas a porosas, sin alterar la estructura química del polímero.

Las membranas de CTA derivado de bagazo (CTA-LA) presentaron propiedades mecánicas superiores a las del CTA comercial, atribuidas al efecto de la lignina residual como refuerzo de la matriz polimérica. Sin embargo, la incorporación de PEG redujo la rigidez y la resistencia mecánica, reflejando el aumento de porosidad. En cuanto al comportamiento térmico, las membranas de CTA-LA mostraron temperaturas de transición vítrea ligeramente menores, lo que sugiere una mayor movilidad segmental asociada a diferencias en el empaquetamiento de las cadenas.

En términos de permeabilidad hidráulica, se demostró que la concentración de polímero y la adición de PEG son factores clave. A baja concentración (0.4% p/v), las membranas de CTA-LA sin PEG alcanzaron valores de permeabilidad superiores ($8.11 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$) a los de las membranas de CTA comercial ($0.26 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$), indicando que la estructura del material derivado de biomasa favorece el transporte de agua. A mayor concentración de polímero (1.0% p/v), la membrana se densifica y no presenta flujo, pero la adición de 5% de PEG permite recuperar la permeabilidad ($3.38 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$) a presiones mucho más bajas (1.38 bar), lo que es consistente con la formación de una estructura porosa. En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el bagazo de agave es una materia prima renovable y sostenible para la fabricación de membranas de triacetato de celulosa con potencial para aplicaciones en procesos de separación y tratamiento de agua. Este trabajo contribuye al aprovechamiento integral de residuos agroindustriales y al desarrollo de materiales funcionales dentro del marco de la economía circular y la química verde.



Referencias

- Alves Cerqueira, D., Rodrigues Filho, G., Nascimento de Assunção, R. M., da Silva Meireles, C., Cardoso Toledo, L., Zeni, M., Mello, K., & Duarte, J. (2008). Characterization of cellulose triacetate membranes, produced from sugarcane bagasse, using PEG 600 as additive. *Polymer Bulletin*, 60(2), 397–404. <https://doi.org/10.1007/s00289-007-0856-8>
- Arefi-Oskoui, S., Khataee, A., Safarpour, M., Orooji, Y., & Vatanpour, V. (2019). A review on the applications of ultrasonic technology in membrane bioreactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104633. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104633>
- Arreola-Vargas, J., Flores-Larios, A., González-Álvarez, V., Corona-González, R. I., & Méndez-Acosta, H. O. (2016). Single and two-stage anaerobic digestion for hydrogen and methane production from acid and enzymatic hydrolysates of *Agave tequilana* bagasse. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2), 897–904. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.016>
- Bai, H., Zhou, Y., Wang, X., & Zhang, L. (2012). The Permeability and Mechanical Properties of Cellulose Acetate Membranes Blended with Polyethylene glycol 600 for Treatment of Municipal Sewage. *Procedia Environmental Sciences, The Seventh International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT 7)*, 16, 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.049>
- Biswas, A., Kim, S., Selling, G. W., & Cheng, H. N. (2014). Conversion of agricultural residues to carboxymethylcellulose and carboxymethylcellulose acetate. *Industrial Crops and Products*, 60, 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.004>
- Chen, J., Xu, J., Wang, K., Cao, X., & Sun, R. (2016). Cellulose acetate fibers prepared from different raw materials with rapid synthesis method. *Carbohydrate Polymers*, 137, 685–692. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.034>
- Chou, W.-L., Yu, D.-G., Yang, M.-C., & Jou, C.-H. (2007). Effect of molecular weight and concentration of PEG additives on morphology and permeation performance of cellulose acetate hollow fibers. *Separation and Purification Technology*, 57(2), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.005>
- da Silva, J. M., Oliveira, L., da Silva, F., Tabosa, J. N., Pacheco, J. G., & da Silva, M. J. (2019). Use of sweet sorghum bagasse (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) for cellulose acetate synthesis. 14(2), 3534–3553. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3534-3553>
- Diop, C. I. K., Li, H. L., Xie, B. J., & Shi, J. (2011). Effects of acetic acid/acetic anhydride ratios on the properties of corn starch acetates. *Food Chemistry*, 126(4), 1662–1669. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.050>



- Guo, J.-H. (1993). Effects of Plasticizers on Water Permeation and Mechanical Properties of Cellulose Acetate: Antiplasticization in Slightly Plasticized Polymer Film. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 19(13), 1541–1555. <https://doi.org/10.3109/03639049309069325>
- Hamed, O. A., Jodeh, S., Al-Hajj, N., Hamed, E. M., Abo-Obeid, A., & Fouad, Y. (2015). Cellulose acetate from biomass waste of olive industry. *Journal of Wood Science*, 61(1), Article 1. <https://doi.org/10.1007/s10086-014-1442-y>
- Keshipour, S., & Maleki, A. (2019). Modification of Cellulose. In Md. I. H. Mondal (Ed.), *Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels* (pp. 435–486). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77830-3_17
- Kobyas, M., Soltani, R. D. C., Omwene, P. I., & Khataee, A. (2020). A review on decontamination of arsenic-contained water by electrocoagulation: Reactor configurations and operating cost along with removal mechanisms. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100519. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100519>
- Lopatina, A., Anugwom, I., Esmaeili, M., Puro, L., Virtanen, T., Mänttari, M., & Kallioinen, M. (2020). Preparation of cellulose-rich membranes from wood: Effect of wood pretreatment process on membrane performance. *Cellulose*, 27(16), 9505–9523.
- Lv, C., Su, Y., Wang, Y., Ma, X., Sun, Q., & Jiang, Z. (2007). Enhanced permeation performance of cellulose acetate ultrafiltration membrane by incorporation of Pluronic F127. *Journal of Membrane Science*, 294(1), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.02.011>
- Ma, Y., Shi, F., Ma, J., Wu, M., Zhang, J., & Gao, C. (2011). Effect of PEG additive on the morphology and performance of polysulfone ultrafiltration membranes. *Desalination*, 272(1), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.054>
- Maheswari, P., Barghava, P., & Mohan, D. (2013). Preparation, morphology, hydrophilicity and performance of poly (ether-ether- sulfone) incorporated cellulose acetate ultrafiltration membranes. *Journal of Polymer Research*, 20(2), 74. <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0074-z>
- Manjarrez Nevárez, L., Ballinas Casarrubias, L., Canto, O. S., Celzard, A., Fierro, V., Ibarra Gómez, R., & González Sánchez, G. (2011). Biopolymers-based nanocomposites: Membranes from propionated lignin and cellulose for water purification. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 732–741. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.014>
- Meier, M. M., Kanis, L. A., Lima, J. C. de, Pires, A. T. N., & Soldi, V. (2004). Poly(caprolactone triol) as plasticizer agent for cellulose acetate films: Influence of the preparation procedure and plasticizer content on the physico-chemical properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 15(10), 593–600. <https://doi.org/10.1002/pat.517>



- Morán-Aguilar, M. G., Calderón-Santoyo, M., de Souza Oliveira, R. P., Aguilar-Uscanga, M. G., & Domínguez, J. M. (2022). Deconstructing sugarcane bagasse lignocellulose by acid-based deep eutectic solvents to enhance enzymatic digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120097. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120097>
- Mulder, M. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8>
- Perrusquía-Luévano, S., González-Sánchez, G., Díaz-Nava, L. E., Ortiz-Basurto, R. I., & Ballinas-Casarrubias, M. de L. (2025). Green pretreatment routes using deep eutectic solvents for biopolymer fractionation and cellulose acetate production from agave bagasse. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 19(4), 1143–1164. <https://doi.org/10.1002/bbb.2787>
- Salahuddin, Z., Farrukh, S., & Hussain, A. (2018). Optimization study of polyethylene glycol and solvent system for gas permeation membranes. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 23(5), 483–492.
- Satlewal, A., Agrawal, R., Bhagia, S., Sangoro, J., & Ragauskas, A. J. (2018). Natural deep eutectic solvents for lignocellulosic biomass pretreatment: Recent developments, challenges and novel opportunities. *Biotechnology Advances*, 36(8), 2032–2050. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.08.009>
- Seymour, R. W., Weinhold, S., & Haynes, S. K. (1979). Mechanical and dielectric relaxation in cellulose esters. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 16(3), 337–353. <https://doi.org/10.1080/00222347908212300>
- Shoba, B., Jeyanthi, J., & Vairam, S. (2020). Synthesis, characterization of cellulose acetate membrane and application for the treatment of oily wastewater. *Environmental Technology*, 41(12), 1590–1605. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1543353>
- Solís-Carvajal, C. A., Pasos, C. A. V., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), Article 22. <https://doi.org/10.31908/19098367.3546>
- Soto-Salcido, L. A., Anugwom, I., Ballinas-Casarrubias, L., Mänttari, M., & Kallioinen, M. (2020). NADES-based fractionation of biomass to produce raw material for the preparation of cellulose acetates. *Cellulose*, 27(12), 6831–6848. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03251-1>
- Vatanpour, V., Pasaoglu, M. E., Barzegar, H., Teber, O. O., Kaya, R., Bastug, M., Khataee, A., & Koyuncu, I. (2022). Cellulose acetate in fabrication of polymeric membranes: A review. *Chemosphere*, 295, 133914. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133914>
- Villanueva-Solís, L. A., Ruiz-Cuilty, K., Camacho-Dávila, A., Espinoza-Hicks, J. C., González-Sánchez, G., & Ballinas-Casarrubias, L. (2020). Lignocellulosic waste pretreatment and esterification using green

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



inifap



solvents. *Separation and Purification Technology*, 250, 117102.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117102>

Wang, W., & Lee, D.-J. (2021). Lignocellulosic biomass pretreatment by deep eutectic solvents on lignin extraction and saccharification enhancement: A review. *Bioresource Technology*, 339, 125587.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125587>

Zhang, Y., Zhou, S., Li, Z., Zhang, H., Zhang, M., Wang, J., Chen, L., & Zhang, H. (2022). Effect of pore-forming/hydrophilic additive anchorage on the mesoporous structure and sieving performance of a blended ultrafiltration (UF) membrane. *Journal of Membrane Science*, 641, 119904.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119904>



Análisis Óptimo de la Síntesis de Quitosano por la Técnica de Desacetilación Química Heterogénea a Partir de Exoesqueletos de Camarón

**Abner Hesli Rojas Calva^{1*}, Jaret del Carmen Ramírez Castellanos¹, Ventura Rodríguez
Lugo¹ y Jesús Ángel Arenas Alatorre²**

Mesa: Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

Actualmente el uso de biomateriales para aplicaciones médicas es un área de interés para investigadores y personal médico, ya que se buscan soluciones a problemáticas relacionadas con la reconstrucción y reparación de tejidos dañados; básicamente a través del uso de productos innovadores con capacidad de ser biocompatibles, estables y mecánicamente resistentes. Este trabajo busca contribuir en la obtención de quitosano debido a su excelente biocompatibilidad, a partir de exoesqueletos de camarón como residuo dentro de procesos de economía circular; evaluando propiedades como el grado de desacetilación, peso molecular y morfología obtenida. El trabajo experimental consistió en evaluar las condiciones óptimas de este proceso, donde, para el método propuesto de desacetilación, se obtuvo una recuperación de 10% de quitosano a partir de los desechos de camarón, así como una predominancia de la fase α -quitina como subproducto del proceso. Para realizar el análisis de los productos y subproductos de la reacción se emplearon técnicas de caracterización química FT-IR y caracterización morfológica mediante MEB y DRX. La importancia de este estudio radica en el análisis del uso potencial del quitosano como andamio en futuras aplicaciones biomédicas, así como evaluar métodos de síntesis y obtención de quitosano.

Palabras clave: Desacetilación, heterogenia, quitina, quitosano.

¹ Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. ICBI-UAEH, Carr. Pachuca - Tulancingo km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo. C.P. 42184.

² Departamento de Materia Condensada, Instituto de Física. UNAM, Sendero Bicipuma, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX. C.P. 04510.

*abner_rojas@uah.edu.mx



b) Desmineralización: Eliminación de la materia orgánica.

c) Decoloración: Separación de los pigmentos lipídicos (carotenoides).

Con la quitina extraída se procede a la obtención del quitosano por un proceso de desacetilación que puede ser químico o enzimático.

El proceso químico se puede efectuar de forma heterogénea u homogénea. La desacetilación homogénea comienza con un pre-tratamiento de hinchamiento y la eventual disolución completa de la quitina en frío mediante la utilización de una relación de quitina a NaOH (p/p) de 1:10. Luego se somete a desacetilación a temperaturas cercanas a la del medioambiente durante períodos largos de tiempo (S. V. Nemtsev, A. I. Gamzazade, S. V. Rogozhin, V. M. Bykova, & V. P. Bykov, 2002). La desacetilación heterogénea, se lleva a cabo en soluciones acuosas concentradas de bases como hidróxidos de sodio o de potasio (40%-50%), bajo condiciones severas (100-160°C) y sin tratamiento previo de la quitina. Las condiciones en las que se lleva a cabo la desacetilación heterogénea presentan el riesgo de reducir la longitud de la cadena (Józef Synowiecki & Nadia Ali Al-Khateeb, 2003). Las limitantes dentro de los procesos ya existentes como la generación de desechos altamente alcalinos y rendimientos bajos de recuperación de quitosano, acompañados de variaciones del grado de desacetilación no mayor al 85 % por tratamiento y variación del peso molecular (Lárez Velásquez, 2006; Sanchez Brenes, Sibaja B., Vega Baudrit, & Madrigal C., 2007).

Estos inconvenientes dentro de los procesos descritos han estimulado el desarrollo de procesos que reduzcan o eliminen el uso y generación de sustancias peligrosas, asociados a bajos rendimientos. Es por ello que en este trabajo se llevó a cabo un estudio comparativo entre dos procesos para la obtención de quitosano mediante desechos de camarón, empleando una síntesis química y electroquímica, logrando que los procesos propuestos eliminen proteínas y/o sales de los residuos de crustáceos, incluso que puedan ser reutilizados en la producción de alimentos animales y pigmentos.

Materiales y Métodos

Se realizó el proceso de obtención de quitina mediante la reacción de hidrólisis, empleando con el fin de desproteinizar NaOH 5M, durante 5 horas, HCl 1M para desmineralizar, durante 2 horas y 50 ml de Etanol para eliminar los pigmentos restantes, esquematizando el sistema de digestión para la extracción de α -quitina a partir de artrópodos.

1.-Proceso de Desproteinización:

El exoesqueleto del camarón se trituro con el fin de homogenizar y aumentar el área superficial (Figura 1).



Figura 1. Cascara de camarón triturada.

La muestra triturada se sometió a lavados con agua desionizada, para posteriormente eliminar la máxima cantidad de agua mediante un secado a 45°C por 24 horas. A continuación, se realizó una solución con NaOH al 5M a un pH > 13 en una relación 1:5 (p/v) y calentando a una temperatura de 62°C ± 1° con agitación constante de 300 rpm durante 2 h, en este paso la muestra se liberó de todas las proteínas presentes. Después del tiempo mencionado, se retiró el NaOH mediante lavados del sólido suspendido hasta alcanzar un pH de 7, se filtró eliminando por completo el NaOH.

2.- Proceso de Desmineralización:

Se generó una solución de 500 ml de HCl 1M a un pH de 2, posteriormente se calienta con el sólido recuperado del proceso anterior a 31°C ± 1°, a agitación de 300 rpm durante 2 h. Pasado este tiempo se filtra el HCl y se somete lavados con agua destilada hasta alcanzar un pH de 7. Después se comprime y se seca a una temperatura de 45 °C.

3.- Proceso de Despigmentación:

Para obtener la quitina se procede a verter la muestra en un matraz erlenmeyer y se agregan 100 ml de etanol puro, se tapa y se deja reposar a 30°C ± 1° durante 24 h a agitación constante de 200 rpm. Pasado este tiempo se retiró el etanol, y se lava la quitina con agua destilada como se describió anteriormente, al final del último lavado se deja nuevamente en 100 ml de etanol modificando la temperatura a 37°C durante 48 h, con lo cual se logra eliminar los colorantes naturales de la quitina. Finalmente se retira el etanol y excesos del mismo mediante lavados a la quitina.

4.- Desacetilación de α -quitina:

Para lograr hidrolizar los grupos acetilos y generar el quitosano se prepara una solución con la quitina y el NaOH al 4M y se lleva a 121°C y 15 libras de presión durante 2 h; después se separa el sobrenadante (quitosano combinado con el NaOH) y el sedimento (quitina) (Figura 2).



Figura 2. Muestra de productos del proceso de desacetilación con NaOH.

El sobrenadante debe mostrar un pH >13, por lo que para poder separar el quitosano del NaOH es necesario neutralizarlo y someterlo a diálisis contra agua destilada en membrana (Figura 3).



Figura 3. Partículas de quitosano en la solución neutralizada.

5.- Caracterización de los Productos

Se realizó una caracterización de los productos mediante Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR) obteniendo los espectrogramas en un intervalo de frecuencia de $4000-400\text{ cm}^{-1}$ en la forma de transmitancia vs. longitud de onda, adicionalmente cada muestra de cada paso del proceso de obtención del quitosano fue analizada por Difracción de Rayos X (DRX), la indexación del



espectro de difracción se realizó con la ayuda del software MATCH 3! que incluye la base de datos COD-Inorg (Power Diffraction Data Base).

Resultados y discusión

Con el fin de proporcionar una sensibilidad analítica adecuada se realizaron las caracterizaciones de los espectros infrarrojos (FTIR) y difracción de rayos X (DRX) de la cascara de camarón, quitina y quitosano, resultado del proceso químico y electroquímico.

Método químico de obtención de quitosano

En cada etapa del proceso se realizó un seguimiento mediante la caracterización de los productos; donde, los análisis de los espectros infrarrojos (FTIR) comparan cada etapa del proceso (cascara de camarón, quitina y quitosano) en la figura 6, donde se puede visualizar 3 muestras en el campo del espectro $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ en la forma de transmisión vs. numero de onda. Las bandas son generalmente grandes debido al carácter macromolecular del compuesto y debido a las numerosas uniones intermoleculares de hidrógeno, que se manifiestan incluso en el estado sólido de la muestra.

En los espectros infrarrojos se pueden observar las bandas típicas del quitosano a 3290cm^{-1} y 3285cm^{-1} determinadas por estiramientos simétricos -OH y superpuestas sobre estiramientos simétricos -NH, así como la aparición del grupo -NH₂ a 3215cm^{-1} , dichas bandas definiéndose en los espectros del quitosano, debido al proceso de desacetilación asociado al segundo pico de identificación de la amina primaria (R-NH₂), corroborado con la disminución del grupo carbonilo (C=O) que aparece a 1664cm^{-1} acompañado de la frecuencia de torsión -NH₂ correspondiente a la quitina a 1574cm^{-1} .

De igual manera se aprecian las bandas de estiramiento C-H en el intervalo de 2800cm^{-1} a 3000 cm^{-1} debido al proceso de desacetilacion, las bandas 1372cm^{-1} y 1375cm^{-1} son determinadas por grupos (-CH₃), las bandas del grupo piranósico a 1077cm^{-1} y estiramientos simétricos C-O a 1074cm^{-1} , el estiramiento C-O-C glucosídico se ve a las frecuencias 705 y 556cm^{-1} .

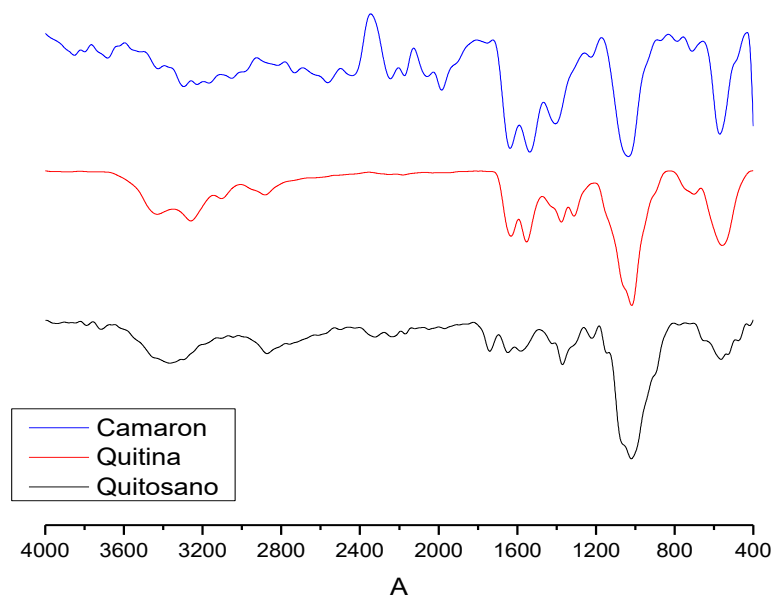


Figura 4. Espectro Infrarrojo método químico (Cascara de camarón-quitina-quitosano).

Los resultados de la fase encontrada se muestran en el siguiente difractograma (Figura 7), donde la estructura cristalina que presenta la quitina se atribuye a una estructura ortorrómbica, que se presenta en una estructura alfa. Donde, se puede discernir un pico principal de gran intensidad a $2\theta = 23,5^\circ$ y un pico secundario en $2\theta = 10^\circ$, en todos los difractogramas, pero con una menor intensidad en los difractogramas de quitosano comparado con el presentado por la quitina esto atribuido a que debido a las condiciones del proceso el producto final (quitosano) presenta un alto grado de amorfismo comparado con la cristalinidad de la fase alfa de quitina. En promedio la amplitud del pico de difracción característico de la estructura cristalina en $2\theta = 23,5^\circ$ presenta un ensanchamiento del 40%.

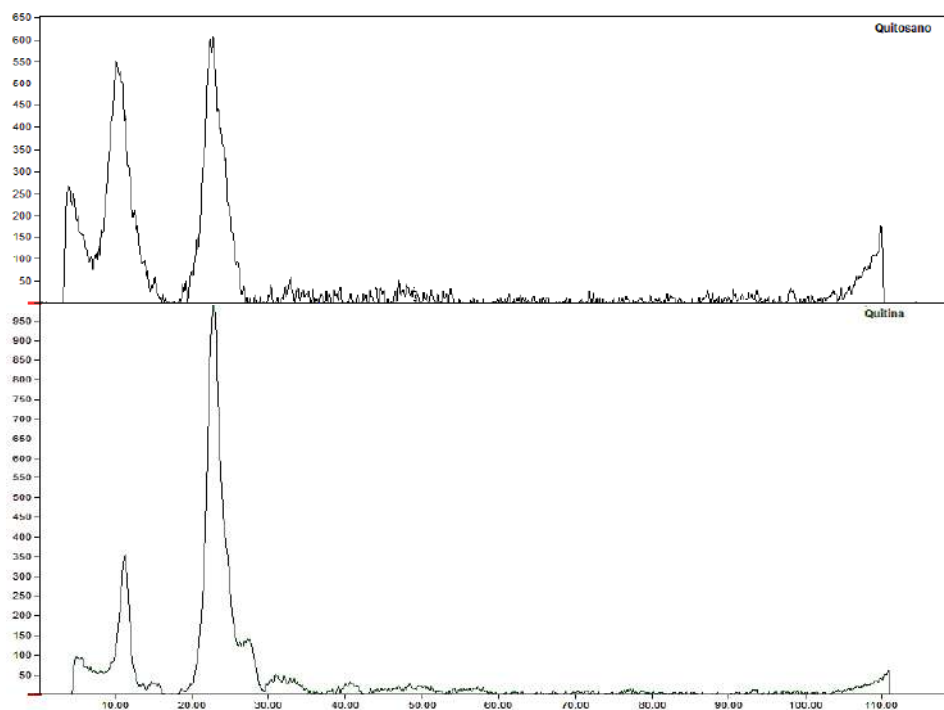


Figura 5. Difracción de rayos X del proceso químico (quitina-quitosano).

El ensanchamiento de los picos y la reducción de la intensidad reflexiva que se visualizan son indicadores directos de un alto grado de desacetilación. A mayor desacetilación, mayor amorfismo y mejor solubilidad del material resultante (Figura 6).

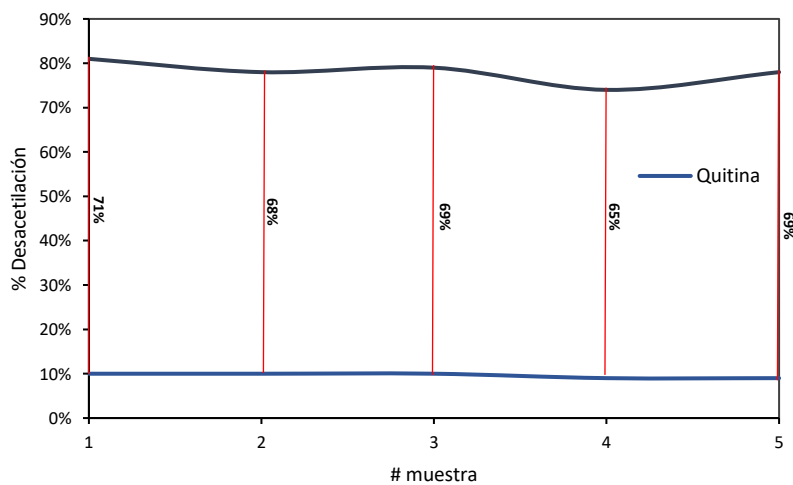




Figura 6. Estudio de grado de desacetilación (quitina-quitosano).

El proceso de desacetilación se siguió específicamente en 5 muestras bajo la metodología propuesta obteniendo una variabilidad de grados de desacetilación, generando un 71% de desacetilación como caracterización máxima y 65% como porcentaje de desacetilación mínimo esto nos deja en promedio un 68.4% de desacetilación promedio.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el estudio evaluando el proceso de obtención de quitosano, mediante la desacetilación de quitina llegando a las siguientes conclusiones:

El método químico presentó un rendimiento del 10 % w/w a partir de la cascara de camarón, empleando una alta concentración de agentes alcalinos (4M NaOH) acompañado de altas condiciones de presión y temperatura (121°C y 15 lb) por un tiempo de 1 hora, generando un quitosano con diferentes pesos molecular y grado de desacetilación, predominando una fase amorfa.

El porcentaje de desacetilación por el método propuesto por este trabajo ronda entre el 68.5 ± 0.5 %. Esto representa una mejora con respecto a reportes de diferentes autores por métodos similares la cual se atribuye al proceso de control de las condiciones de presión y temperatura extremas.

Estudios posteriores sugieren alrededor de 12 hrs. de contacto entre la cascara de camarón y el ac. acético para lograr un mejor grado de desproteinización.

Agradecimientos

Los autores externan su agradecimiento al apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación a través del programa de beca apoyo a Estancias Posdoctorales en Instituciones Nacionales 2026 a través del Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo (CITNOVA).

Literatura Citada

- Arguelles W. . (1994). *Estudio de tres propiedades básicas de la quitosana: formación de películas, obtención de complejos polielectrolitos y adsorción de mercurio*. La Habana, Cuba: Universidad de La Habana.
- Cárdenas Soriano, O. E., Parada Gómez, L. G., & Díaz Crespín, G. (2010). *Caracterización de los productos de la desacetilación selectiva de quitina*. San Salvador: Universidad del Salvador.
- Cardona Trujillo, V., Padilla Quintero, B., Lizcano Valbuena, W., & Rodríguez Marmolejo, A. F. (2012). *Preparación y caracterización fisicoquímica y estructural de un gel conductor a base de quitosano*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Józef Synowiecki, & Nadia Ali Al-Khateeb . (2003). Production, Properties, and Some New Applications of Chitin and Its Derivatives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 43(2), 145-171.

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- Lárez Velásquez, C. (2006). Quitina y Quitosano: materiales del pasado para el presente y el futuro. 2(1).
- Rodríguez Hamamura, N., Valderrama Negrón, A., Alarcón Cavero, H., & López Milla, A. (2010). Preparación de partículas de quitosano reticuladas con tripolifosfato y modificadas con polietilenglicol. 76(4).
- S. V. Nemtsev, A. I. Gamzazade, S. V. Rogozhin, V. M. Bykova, & V. P. Bykov. (2002). Deacetylation of Chitin under Homogeneous Conditions. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 38(6), 521–526.
- Sanchez Brenes, A., Sibaja B., M., Vega Baudrit, J., & Madrigal C., S. (2007). Síntesis y caracterización de hidrogeles de quitosano obtenido del camarón langostino (*Pleurocodes planipes*) con potenciales aplicaciones biomedicas. 8(4).
- Tiantian Wu, Jiaqi Huang, Yangyang Jiang, Yaqin Hu, Xingqian Ye, Donghong Liu, & Jianchu Chen. (2017). *Formation of hydrogels based 1 on chitosan/alginate for the delivery of lysozyme and their antibacterial activity*. China: Food Chemistry .



Obtención del aceite de semillas de guamúchil (*Pithecellobium dulce*) y su transformación a biodiésel como un biocombustible amigable con el medio ambiente

Benito Reyes-Trejo,^{1*} Holber Zuleta-Prada,¹ Lino Reyes,² Vanessa Villegas Rodríguez,² Sara Suarez Torres²

Mesa: Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

Debido al agotamiento de las reservas mundiales de petróleo y a las crecientes preocupaciones ambientales, existe una gran demanda de fuentes alternativas de combustibles derivados del petróleo, como el diésel y la gasolina, además, su sobreexplotación ha causado impactos ambientales, por lo que, se han propuesto fuentes alternas de energía como el biodiésel. En la búsqueda de nuevas materias primas para la producción de biodiésel, el propósito de este trabajo fue caracterizar y transformar el aceite de semillas de guamúchil (*Pithecellobium dulce*) a partir de una muestra colectada en el mercado de Cuernavaca, Morelos para obtener biodiésel. Mismo que se obtuvo mediante una reacción de transesterificación en medio básico; catalizador 0.75% (p/p); reflujo de metanol en relación 6:1 respecto al aceite; tiempo de reacción de 90 minutos, con un rendimiento del 74 %. Caracterización fisicoquímica del biodiésel; Índice de acidez 0.43 ± 0.04 mg KOH/ g muestra, Índice de yodo 75.53 ± 3.57 g I₂/100 g muestra, densidad a 20°C 0.8682 g/cm³, viscosidad a 40° C 5.9036 mm²/s. Empleando la técnica de cromatografía de gases se estableció la composición el aceite de semilla de chabacano y contiene principalmente los ácidos oleico, linoleico y palmítico en las proporciones de 34.45%, 27.47% y 14.06%, respectivamente. Todas las propiedades medidas del biodiésel producido cumplieron con los requisitos de calidad según la norma EN 14214; por lo que, podría utilizarse como combustible alternativo.

Palabras clave: guamúchil, *Pithecellobium dulce*, aceite, biodiésel

¹Laboratorio de Productos Naturales, Área de Química, Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo 56230, México. *Autor de correspondencia: breyest@chapingo.mx, hzuletap@chapingo.mx (H.Z.-P.);



²Departamento de Química Orgánica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán D.F. 04510, México; vanessavillegas886@gmail.com (V.V.-R), linoj23@quimica.unam.mx (L.R),

Abstract

Due to the depletion of global petroleum reserves and growing environmental concerns, there is high demand for alternatives to petroleum-based fuels such as diesel and gasoline; furthermore, the overexploitation of these resources has caused environmental impacts, prompting the proposal of alternative energy sources like biodiesel. In the search for new feedstocks for biodiesel production, the aim of this study was to characterize and transform oil from guamúchil seeds (*Pithecellobium dulce*) collected at a market in Cuernavaca, Morelos into biodiesel. The biodiesel was obtained via a base-catalyzed transesterification reaction using a 0.75% (w/w) catalyst and a 6:1 methanol-to-oil molar ratio; the reaction time was of 90 minutes, resulting in a 74% yield. Physicochemical characterization of the biodiesel yielded the following results: acid value of 0.43 ± 0.04 mg KOH/g sample, iodine value of 75.53 ± 3.57 g I₂/100 g sample, density at 20°C of 0.8682 g/cm³, and viscosity at 40°C of 5.9036 mm²/s. Gas chromatography analysis determined the oil's composition, revealing that it primarily contains oleic, linoleic, and palmitic acids in proportions of 34.45%, 27.47%, and 14.06%, respectively. All measured properties of the produced biodiesel met the quality requirements of the EN 14214 standard; therefore, it could serve as an alternative fuel.

Keywords: guamúchil, *Pithecellobium dulce*, oil, biodiesel.

Introducción

Debido al agotamiento de las reservas mundiales de petróleo y a las crecientes preocupaciones ambientales, existe una gran demanda de fuentes alternativas de combustibles derivados del petróleo, como el diésel y la gasolina. El biodiésel es un combustible limpio y renovable, químicamente es una mezcla de ésteres metílicos con ácidos grasos de cadena larga y que se elabora a partir de recursos biológicos no tóxicos como aceites vegetales, grasas animales o incluso aceites de cocina usados (Leung et al., 2009). La reacción de transesterificación catalizada es la reacción química más preferible y adecuada para la producción de biodiésel, en donde los triglicéridos del aceite reaccionan con alcoholes como metanol o etanol, para acelerar la reacción se utilizan catalizadores ácidos o alcalinos (Sekhar et al., 2018). Se espera que el aceite de las semillas de guamúchil pueda utilizarse para la producción de biodiésel por ello debe llevarse a cabo la caracterización fisicoquímica del aceite y que se encuentre en los parámetros óptimos para su uso. Las semillas del guamúchil son de color negro brillante, el contenido de aceite extraído del polvo de esta semilla es del 16% y es de color amarillo (Sekhar et al., 2021). El actual trabajo tiene como objetivo la obtención de aceite de las semillas de guamúchil (*Pithecellobium dulce*), su



cuantificación y caracterización fisicoquímica necesaria para su aprovechamiento en la elaboración de biodiésel mediante una reacción de transesterificación y ser considerado un combustible sustentable para el medio ambiente, en cuanto a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento de un residuo, asimismo disminuir el problema de desabasto de combustibles. Para la producción de biodiesel se requieren materias primas con contenido de triglicéridos que puedan ser convertidos a biodiesel, generalmente estas materias primas son de origen vegetal proveniente de cultivos oleaginosos, en la actualidad se ha reportado estudios empleando aceite de palma, aceite de algodón, aceite de calabaza entre otras. Sin embargo, es necesario seguir apuntando hacia la búsqueda de nuevas alternativas de materias primas para la producción de biocombustibles, encaminadas fundamentalmente en los residuos de la industria alimenticia, los cuales no generarían conflictos de intereses.

Objetivo general

Es una práctica común desechar semillas después de consumir frutos, y el guamúchil no es la excepción, por lo que el objetivo general de este proyecto es: Aprovechar el producto de desecho del fruto conocido como guamúchil, empleando sus semillas para obtener aceite y por extracción con hexano cuya posterior transformación a biodiesel proporcionara una alternativa de energía amigable con el medio ambiente

Materiales y métodos

Recolección de materia prima

Se colectó una cantidad suficiente de frutos de guamúchil suficientes para tener 800 g de semillas de guamúchil con un proveedor de Yahutepec, Morelos. Se almacenaron en bolsas de papel a temperatura ambiente (24°C).

Selección de las semillas

Se efectuó el pelado y limpieza para retirar del fruto, impurezas como semilla rota, daño por insecto y materia extraña

Caracterización de las semillas de guamúchil

Se llevó a cabo la caracterización de las semillas de guamúchil, se tomó una muestra significativa de 30 semillas a las cuales se le determinó el largo, ancho y grosor con un vernier metálico PRETUL, también se pesaron con una balanza analítica SCIENTECH SA80. Las determinaciones se realizaron a cada semilla.



Molienda de la semilla

Para la molienda de semillas se utilizó una licuadora especial para semilla GRINDER, después de la molienda se pasaron a través de un tamiz 20 (0.841 mm) y se almacenaron en un frasco con tapa y cubierto de la luz.

Determinación de humedad

Para medir el porcentaje de humedad se utilizaron 5g de semillas molidas y tamizada, de la muestra se tomaron 0.5 g que se colocaron en una termobalanza OHAUS MB45 y se extendieron por toda la charola, se realizó esta operación por triplicado a 100°C.

Extracción del aceite

Por maceración

Se emplearon metodologías descritas por nuestro grupo de trabajo con ligeras modificaciones (Reyes-Trejo et al, 2014; López-Yerena et al, 2022) se colocaron 30 g de muestra en matraz Erlenmeyer de 500 mL y se adicionaron 100 mL de hexano, se dejó reposar por tres días, se filtró y se recuperó el disolvente en un recipiente ámbar de vidrio y se volvió a adicionar 100 mL de hexano, así se repitió el procedimiento hasta recuperar tres veces el disolvente. Lo recuperado se filtró y después se secó con Na_2SO_4 anhidro.

Por soxhlet

Se realizó siguiendo el procedimiento de la norma NMX-F-089-S-1978 utilizando 30 g de semilla molida empacadas en cartuchos de papel filtro y 300 mL de hexano a una temperatura de 60°C por 6 horas, después de retirar se secó con Na_2SO_4 anhidro.

Caracterización fisicoquímica del aceite y biodiesel

Se determinó el índice de acidez siguiendo el procedimiento de la norma NMX-F-101-SCFI-2012, el índice de yodo e índice de saponificación se siguió la metodología reportada por Nielsen (2017).

Índice de acidez

Se prepararon las disoluciones de KOH 0.0025N y fenolftaleína al 1% que se utilizó para titular las muestras, la disolución de hidróxido de potasio fue normalizada con Biftalato de potasio como patrón primario, se secó previamente en el horno por 1 hora a 100°C y se calculó la cantidad a pesar para gastar 20.0 mL de la bureta. Para la caracterización del aceite y biodiesel respectivamente. Se pesaron aproximadamente 0.5 g de muestra (aceite o



biodiesel), se adicionaron 20 mL de alcohol etílico neutralizado, calentando suavemente en baño de vapor, se adicionó fenolftaleína al 1% y se tituló con la disolución normalizada de KOH, la prueba se efectuó por triplicado.

Índice de yodo

En esta prueba los reactivos usados fueron diclorometano, indicador de almidón al 1%, reactivo de Wijs, disolución de KI al 15%, disolución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.1N y el patrón primario empleado fue el KIO_3 , el cual se dejó secar por 1 hora en el horno a 100°C , la estandarización de la disolución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ aportó un valor aproximado a 0.1056 N, para la caracterización de aceite y biodiesel respectivamente. Para el análisis de la muestra se pesaron aproximadamente 0.1 g de aceite o biodiesel, añadiendo 5 mL de diclorometano y 6 mL de reactivo de Wijs, se dejó reposar por 30 min en la oscuridad, transcurrido el tiempo se adicionaron 5 mL de la disolución de KI al 15% y se completó con agua destilada hervida y fría, se tituló con la disolución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ normalizada hasta un color amarillo paja, posteriormente agregó el indicador de almidón, se continuó titulando hasta que la coloración azul desapareció, la determinación se efectuó por triplicado.

Índice de saponificación

En este ensayo, los reactivos requeridos son disolución alcohólica de KOH 0.5N, HCl 0.5N y fenolftaleína al 1% como indicador. La disolución de HCl fue normalizada al 0.5126N y 0.4962N para la caracterización de aceite y biodiesel respectivamente. Primero se armó un equipo en reflujo en la campana, en un matraz bola se pesaron aproximadamente 2 g de muestra, se adicionaron 25 mL de la disolución alcohólica de KOH y se mantuvo bajo ebullición suave durante 1 hora con agitación, por último, se adicionó el indicador de fenolftaleína y se tituló en caliente el exceso de álcali con la disolución de HCl estandarizada, se comparó con un blanco y la prueba se hizo por triplicado.

Calor de combustión

Para este análisis se empleó calorímetro isoperibólico marca Parr, para lo cual se pesaron aproximadamente 0.5 g de muestra (aceite o biodiesel) y se analizó la cantidad de calor emitida por la combustión de las muestras de aceite, biodiesel y mezclas de diésel y biodiesel.

Densidad y viscosidad

Para la prueba de densidad y viscosidad (cinemática y dinámica) se utilizaron 4 mL de muestra, las cuales mediante un viscosímetro Anton Paar Stabinger SVM 3000 se obtuvieron datos a las temperaturas de 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90°C .

Resonancia Magnética Nuclear



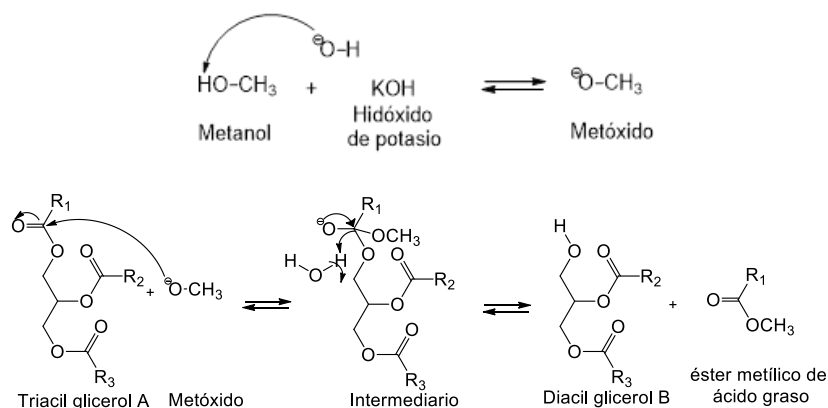
Para esta caracterización espectroscópica se utilizó un espectrómetro marca Agilent NMR VNMRs 400 MHz modelo DD2 (Santa Clara, California, USA), usando como disolvente CDCl_3 y TMS (Tetrametil silano) como referencia interna y a una temperatura de 25°C .

Cromatografía de gases

La composición de ésteres metílicos de ácidos grasos se determinó por cromatografía de gases de acuerdo con la metodología propuesta por Reyes-Trejo et al, (2014) y López-Yerena et al, (2022), con algunas modificaciones, empleando un cromatógrafo de gases marca Agilent 6890 que tiene integrado un detector de ionización de flama (FID) Columna: AT-FAME 30 Mx0.25 mmx0.25 μm espesor de película. Temperatura Inyector: 250°C . Temperatura FID: 250°C . Horno: 180°C [15 min] $10^\circ/\text{min}$ hasta 230°C [3 min]. Flujo: 1.8 mL/min H₂ Split. Tiempo de adquisición: 23.00 [mins]. Método de control: ESTERES FAME2

Obtención de biodiesel a través de la reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación se llevó a cabo en medio básico, con condiciones de temperatura de 60°C por 90 min, en una relación molar 1:6 (aceite: metanol) y 1% y 1.1% de KOH con respecto a la cantidad de aceite obtenido por maceración y/o soxhlet, respectivamente, el monitoreo de la transformación se efectuó cada 30 minutos por cromatografía en capa delgada usando cromatoplasas de sílica gel 60 F254 con una cámara de elución de hexano: acetato de etilo: ácido acético (9:4:1 mL) y se revelaron en un cámara de yodo. A continuación, se transfirió a un embudo de separación y se dejó reposar por 24 horas llevando a cabo la separación de 2 fases, biodiesel en la fase superior y glicerina en la fase inferior, se eliminó la glicerina, residuos de metanol y agua realizando lavados con agua destilada a 70°C hasta llegar a un pH 7, finalmente el biodiesel obtenido se secó con Na_2SO_4 anhidro. El mecanismo de reacción mediante el cual se llevó a cabo la reacción de transesterificación para la obtención de biodiesel se muestra en la figura 1.



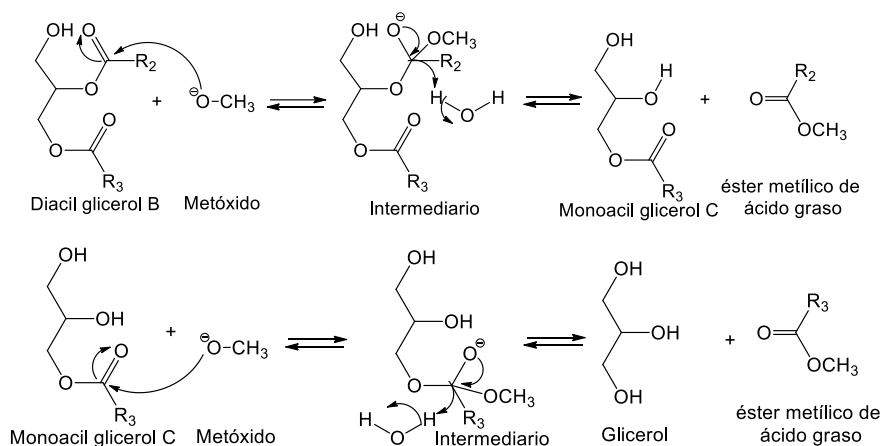


Figura 1.- Mecanismo de transesterificación de triacilglicerol con metanol en medio alcalino

Preparación de mezclas de diésel petroquímico y biodiesel de semilla de guamúchil

Se prepararon mezclas de diésel petroquímico con el biodiesel obtenido del aceite de semilla de guamúchil en las siguientes relaciones Diésel: biodiésel en porcentaje 90:10 (B10), 80:20 (B20), 70:30 (B30), 60:40 (B40) y 50:50 (B50) las cuales se les determinaron las pruebas fisicoquímicas de densidad, viscosidad (cinemática y dinámica) y calor de combustión

Resultados y discusión

Caracterización de las semillas de guamúchil.

Las semillas de guamúchil son de color negro brillante en la cascarilla, el centro es gris, presenta una forma ovoide, para las dimensiones se realizó la estadística correspondiente para determinar el largo, ancho, grosor y masa de una muestra de 30 semillas (ver Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización física de las semillas de guamúchil (*Pithecellobium dulce*).

Dimensión	Valor de semillas de guamúchil
*Largo (cm)	1.00±0.06
*Ancho (cm)	0.75±0.08
*Grosor (cm)	0.37±0.04
*Masa (g)	0.1511±0.0225

*Valores promedio de una muestra de 30 semillas de guamúchil ± desviación estándar

Extracción del aceite de semillas de guamúchil.



En la extracción del aceite de las semillas de guamúchil se realizaron por dos métodos (Soxhlet y maceración) efectuando por triplicado las repeticiones de extracción y se obtuvieron los rendimientos promedio. Para la extracción por el método de Soxhlet se consiguió un rendimiento de 60 mL de aceite o sea con el $15.35 \pm 1.93\%$. Por otra parte, el rendimiento obtenido por el método de maceración fue de 51 mL o sea del $12.86 \pm 2.03\%$, esto se debe a las diferencias del método, en donde soxhlet tiene condiciones de temperatura uniforme, es decir un calentamiento que ayuda a mejor la extracción del aceite.

Caracterización fisicoquímica del aceite de semillas de guamúchil

Es importante tomar en cuenta ciertos parámetros fisicoquímicos para saber si el aceite puede ser utilizado para la obtención de biodiésel. En la Tabla 2 se observan los resultados obtenidos en la caracterización del aceite extraído por soxhlet y maceración de las semillas de guamúchil.

Índice de acidez: El índice de acidez se define como la cantidad de mg de KOH necesaria para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo de aceite o grasa, para llevar a cabo la reacción de transesterificación básica el valor máximo que ácidos grasos libres aceptables es de 2.5% (Leung et al., 2009), de no estar dentro de este rango, se requerirá de un pretratamiento que conlleva mayor costo y tiempo, ya que un exceso de ácidos grasos libres se forma jabón y reduce el rendimiento del biodiesel e inhibe la separación de los ésteres del glicerol. Sin embargo, los valores obtenidos por ambos métodos de extracción están dentro de lo permitido, pero comparando ambos valores se pueden observar que el valor de acidez por el método de soxhlet es mayor y esto se debe a que en este proceso conlleva una elevación de la temperatura acelerando la oxidación.

Tabla 2. Características fisicoquímicas del aceite obtenido de semillas de guamúchil.

Prueba	Aceite de semilla de guamúchil	
	Soxhlet	Maceración
*Índice de acidez (mg KOH/g aceite)	1.79 ± 0.03	0.65 ± 0.06
*Porcentaje de acidez (%Ác. Palmítico)	0.82 ± 0.01	0.29 ± 0.03
*Índice de yodo ($\text{g I}_2 / 100\text{g}$ aceite)	87.48 ± 8.55	81.84 ± 1.29
*Índice de saponificación (mg KOH/ g aceite)	155.33 ± 1.37	185.13 ± 1.20
Densidad 20°C (g/cm^3)	0.9	0.9008
Viscosidad cinemática 40°C (mm^2/s)	29.335	27.948

**Pruebas realizadas por triplicado*

Índice de yodo: Está relacionado con el grado de instauración de los ácidos grasos, entre mayor sea el valor implica un mayor grado de instauración (Mayor cantidad de enlaces dobles en el triacilglicerol). El índice de yodo del aceite extraído por soxhlet es de 87.48 ± 1.37



mientras que el valor para el aceite extraído por maceración fue de 81.84 ± 1.29 , el valor reportado en la literatura es de $83.9 \text{ g I}_2/100 \text{ g}$ de aceite (Sekhar et al., 2021), por lo que el que estuvo más cerca del valor de referencia fue el aceite extraído por maceración. Este parámetro se debe considerar para la elección del aceite para obtener biodiesel, debido a que, esta propiedad influye en la estabilidad oxidativa y polimerización de los glicéridos afectando motores de diésel (Schinas et al., 2009).

Índice de saponificación: Se expresa como el número de mg de KOH requeridos para saponificar los ácidos grasos presente en un gramo de aceite y su valor es un reflejo del peso molecular promedio de los acilglicéridos que constituyen el aceite, el valor encontrado en la referencia es de 175.4 mg KOH/g aceite (Mahesha et al., 2022), este parámetro tiene como propósito conocer si el aceite nos permitirá tener gran rendimiento en la reacción de transesterificación, ya que entre menor sea el índice de saponificación la cantidad de jabón formada durante la reacción sea baja.

Densidad: la densidad del aceite reportado para las semillas de guamúchil es de 0.92 g/cm^3 (Sekhar et al., 2021), por lo que los resultados obtenidos experimentales son iguales al de la literatura. En el figura 1 se observa que la densidad del aceite es mayor la que diésel petroquímico.

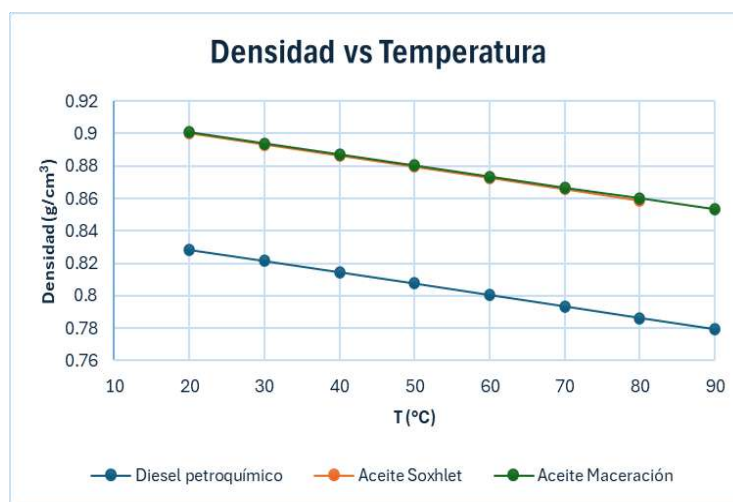


Figura 1. Variación de la densidad del aceite en función de la temperatura.

Viscosidad: La viscosidad del aceite está en un rango de $28\text{-}35 \text{ mm}^2/\text{s}$ (García-Muentes et al., 2018), el aceite obtenido por ambos métodos de extracción se encuentra dentro de este rango. Asimismo, en las figuras 2 y 3 se observa que la viscosidad cinemática como dinámica es mayor en el aceite que en el diésel petroquímico, y disminuye conforme aumenta la temperatura.



Un estudio mostró que se logró un rendimiento del 93.24% de biodiesel de semillas de guamúchil, utilizaron 0.8% de catalizador (NaOH), con una relación molar 1:6 (aceite: metanol), a una temperatura de 60°C por 90 minutos (Sekhar et al, 2018). Al usar casi las mismas condiciones para realizar la transesterificación no se logró el mismo valor de rendimiento que el de la literatura, esto puede deberse ya que el mismo artículo explica que el aumentar la cantidad de catalizador puede favorecer la reacción secundaria de saponificación de triacilglicéridos, disminuyendo el rendimiento sustancialmente.

Caracterización fisicoquímica del biodiesel

En la tabla 4, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas realizadas a el biodiesel producido a través del aceite extraído de la semilla de guamúchil por los métodos de soxhlet y maceración, se comparó con la normatividad estadounidense y europea, asimismo se caracterizó el diésel petroquímico de la gasolinera “Pemex”.

Índice de acidez: El índice de acidez se expresa como la cantidad de mg de KOH requeridos para neutralizar 1 g de ácidos grasos de metil ésteres. Esta prueba refleja la presencia de ácidos grasos libres o ácidos usados para la transformación a biodiesel y también la degradación del biodiesel debido a efectos térmicos (Kaya et al., 2008). Los ácidos grasos libres son ácidos monocarboxílicos que no están ligados a cadena de glicerol. Un alto índice de acidez puede causar severa corrosión en los sistemas que alimentan combustible en un motor, además de indicar un nivel de degradación del lubricante. Lo límites especificados en las normas ASTM D664 y EN 14214 para el índice de acidez en biodiesel es un máximo de 0.80 mg KOH/ g biodiesel, por lo que tanto para el biodiesel obtenido por el aceite extraído por soxhlet y maceración se tuvieron valores de 0.52 ± 0.04 y 0.43 ± 0.04 mg KOH/ g biodiesel, respectivamente así que ambos cumplen con ambas normativas.

Tabla 4. Características fisicoquímicas del biodiesel obtenido del aceite de semillas de guamúchil.

Prueba*	Biodiesel de guamúchil		Diesel	**ASTM
	Soxhlet	Maceración		
Índice de acidez (mg KOH/ g muestra)	0.52 ± 0.04	0.43 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.80 máx..
Índice de yodo (g I ₂ /100 g muestra)	74.79 ± 2.40	76.53 ± 3.57	11.88 ± 1.72	120 máx..
Índice de saponificación (mg KOH/ g muestra)	161.02 ± 2.13	171.51 ± 3.22	0.00 ± 0.00	-
Densidad 20°C (g/cm ³)	0.8678	0.8682	0.8285	0.86-0.90
Viscosidad cinemática 40°C (mm ² /s)	6.078	5.9036	2.4271	1.90-6.0

*Pruebas realizadas por triplicado, **American Society for Testing and Materials.



Viscosidad: La viscosidad cinemática es la velocidad del líquido a fluir, este parámetro afecta la operación de inyección del combustible, a la formación de mezclas y procesos de combustión. La estructura presente en la composición de los ácidos grasos tales como cadenas largas, grados de insaturación, orientación de los dobles enlaces y el tipo de grupo funcional del éster pueden influenciar la viscosidad. La viscosidad de incrementa con el aumento en la longitud de la cadena y decrece con el número de dobles enlaces (García-Muentes et al., 2018). La norma ASTM D445 establece parámetro de 1.9-6 mm²/s, mientras que la norma EN 3104 establece los límites de 3.5-5.0 mm²/s, el biodiesel obtenido no cumple con los estándares establecidos en la norma europea ya que rebasa el límite máximo, en cambio para la norma americana el biodiesel por maceración está dentro del límite y es aceptable. El por qué hay valores altos de viscosidad se debe a que las cadenas de los ésteres metílicos que predominan contienen una gran longitud, como ya se mencionó anteriormente es un factor que influye en el aumento de la viscosidad. La viscosidad dinámica mide la resistencia de un fluido a fluir cuando se le aplica una fuerza externa, y la viscosidad cinemática está relacionada con la viscosidad dinámica a través de la densidad. En la figura 5 se observa, que al igual que la viscosidad cinemática, la viscosidad dinámica disminuye conforme aumenta la temperatura.

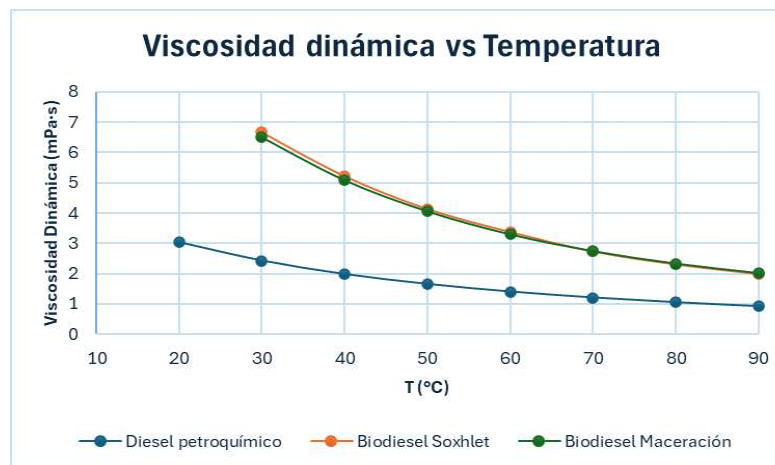


Figura 5. Variación de la viscosidad dinámica del biodiesel en función de la temperatura.

En la figura 6 se muestra que al igual que la densidad, la viscosidad cinemática disminuye conforme aumenta la temperatura. El comportamiento es el esperado por que la temperatura aumenta la energía cinética de las moléculas, provocando que el fluido presente menos resistencia al flujo.

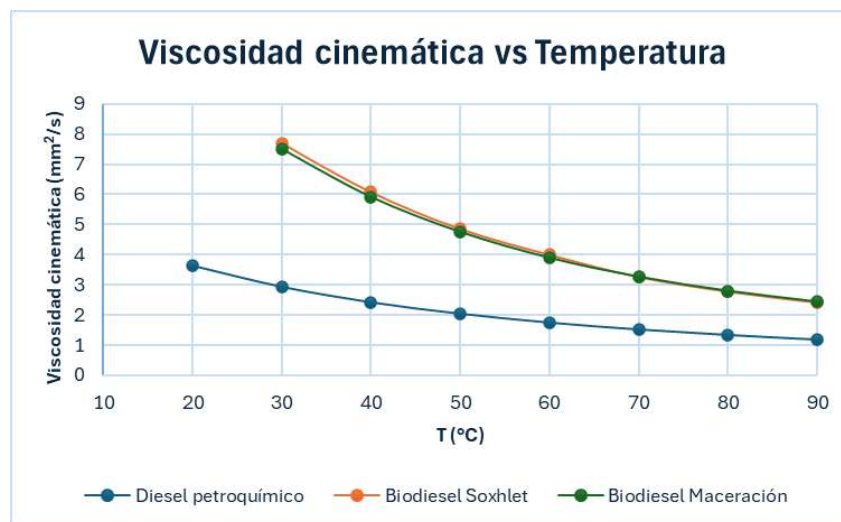


Figura 6. Variación de la viscosidad cinemática del biodiesel en función de la temperatura

Resonancia Magnética Nuclear del biodiesel de semillas de guamúchil.

Para corroborar la obtención de biodiesel (Mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos), se determinaron espectros de RMN de ^1H . En la figura 7 se exhibe el espectro del biodiesel obtenido por maceración. Donde una señal simple en 3.7 ppm, indica los protones del grupo metoxilo ($\text{CH}_3\text{-O-}$) del éster metílico, en la señal de 2.3 ppm se encuentra la fracción metileno vecino a un grupo carbonílico ($-\text{CH}_2\text{-COOR}$) de todos los hidrógenos de las cadenas de ácidos grasos. Las señales de protones relacionadas con el glicerol ya no están presentes, significando el biodiesel de guamúchil está libre de glicerol (Sekhar et al., 2018).

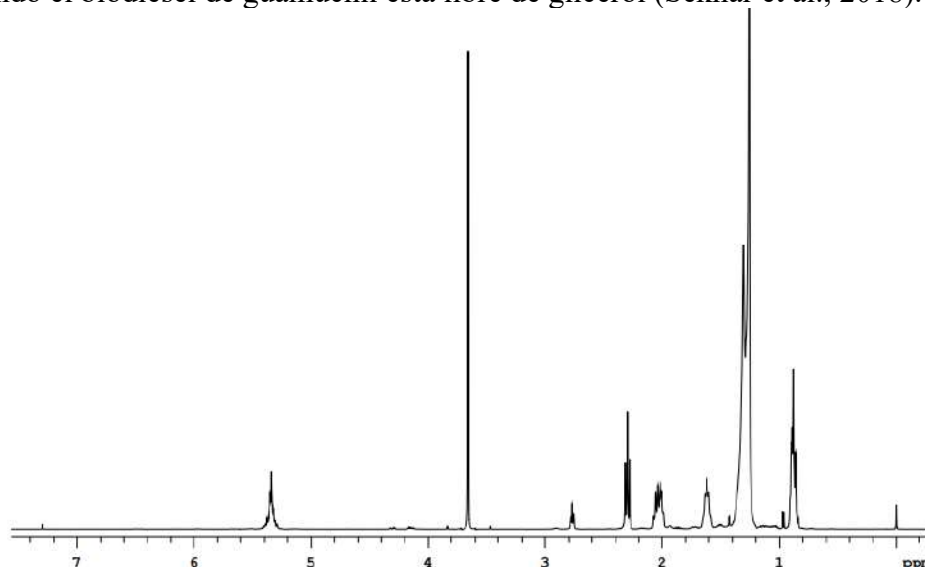




Figura 7. Espectro de Resonancia Magnética Nuclear de ^1H (RMN- ^1H , 400 MHz, CDCl_3 , TMS) del biodiesel obtenido de las semillas de guamúchil

Para analizar el contenido y tipo de ácidos grasos contenidos en el aceite se empleó la cromatografía de gases con detección tipo FID (detector de ionización de flama). Se utilizó una columna AT-FAME, con una dimensión 30 m x 0.25 mm x 0.25 μm espesor de película, inyector a 250°C, temperatura del horno 180°C (15 min) 10°C/ min hasta 230°C (3 min) y flujo 1.8 mL/min. Mediante el uso de estándares analíticos, se estimó la cantidad y tipo de ácidos grasos que contiene el aceite de guamúchil, por comparación de sus tiempos de retención con la muestra de biodiesel, cuyos datos se muestran en la tabla 5 y contiene principalmente los ácidos oleico, linoleico y palmítico en las proporciones de 34.45%, 27.47% y 14.06%, respectivamente.

Tabla 5. Composición de esteres metílicos en el biodiesel obtenido de guamúchil.

Fórmula semidesarrollada	Nombre	Composición (%)
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOCH}_3$	Palmitato de metilo	14.061
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOCH}_3$	Palmitoleato de metilo	0.203
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOCH}_3$	Estearato de metilo	5.476
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOCH}_3$	Oleato de metilo	34.450
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOCH}_3$	Linoleato de metilo	27.472
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOCH}_3$	Behenato de metilo	10.600

Conclusión

El biodiesel obtenido a partir del aceite de guamúchil extraído por la técnica de maceración cumple con los estándares de calidad establecidos por la normatividad americana, constituyendo un gran potencial como biocombustible de calidad, para emplearse en el transporte y la industria. El análisis por RNM del biodiesel indica que efectivamente se obtuvo biodiesel puro



Literatura citada

García-Muentes, S. A., Lafargue-Pérez, F., Labrada-Vázquez, B., Díaz-Velázquez, M., & Del Campo-Lafita, A. E. S. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 143-159.

García González, M. A., Sánchez Mendoza, E., Waksman Minsky, N. H., & Saucedo, A. L. (2022). Fundamentos y analogías para entender mejor la espectroscopía de RMN. *Educación química*, 33(4), 3-13.

Kaya, C., Hamamci, C., Baysal, A., Akba, O., Erdogan, S., & Saydut, A. (2008). Methyl ester of peanut (*Arachis hypogaea* L.) seed oil as a potential feedstock for biodiesel production. *Renewable Energy*, 34(5), 1257-1260.

Kiranmayee, M., & Riazunnisa, K. (2025). Bioactive phytochemical compounds characterization, anti-oxidant and anti-microbial activity of the methanol and acetonitrile leaf extracts of *Pithecellobium dulce*. *Phytomedicine Plus*, 5(2), 100760.

Leung, D. Y., Wu, X., & Leung, M., 2009. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083-1095.

López-Yerena, Anallely; Guerra-Ramírez, Diana; Reyes-Trejo, Benito; Salgado-Escobar, Irma; Cruz-Castillo Juan Guillermo; (2022). Waste from *Persea schiedeana* fruits as potential alternative for biodiesel. Production. Crop Physiology and Crop Production. *Plants*, 11(3), 252-262

Mahesha, C., Rani, G. J., Dattu, V. S., Rao, Y. K., Madhusudhanan, J., L, N., Sekhar, S. C., & Sathyamurthy, R., 2022. Optimization of transesterification production of biodiesel from *Pithecellobium dulce* seed oil. *Energy Reports*, 8, 489-497.

Nielsen, S. 2017. Food Analysis. 5th ed. Indiana: Springer.

NMX-F-089-S-1978. *Determinación de extracto etéreo (método Soxhlet) en alimentos. Alimentos-determinación del éter extracto (Soxhlet)*. Normas mexicanas. Dirección general de normas. [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/2xeaz754> [Último acceso el 17 de septiembre del 2024].

NMX-F-101-SCFI-2012. *Alimentos-Aceites y grasas vegetales o animales-Determinación de ácidos grasos libre- Método de Prueba*. Normas mexicanas. Dirección general de normas. [En línea]. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-f-101-scfi-2012.pdf> [Último acceso el 20 de septiembre del 2024]. 8 / 12



NMX-FF-034/1-SCFI-2002. *Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-cereales-parte I: Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado-Especificaciones y métodos de prueba*. Normas mexicanas. Dirección general de normas. [En línea]. Disponible en: https://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-FF-034-1-SCFI2002_MAIZ_blanco.pdf [Ultimo acceso el 15 de septiembre del 2024].

Ong, H. C., Milano, J., Silitonga, A. S., Hassan, M. H., Shamsuddin, A. H., Wang, C., Mahlia, T. M. I., Siswantoro, J., Kusumo, F., & Sutrisno, J. (2019). Biodiesel production from *Calophyllum inophyllum*-*Ceiba pentandra* oil mixture: Optimization and characterization. *Journal Of Cleaner Production*, 219, 183-198.

Reyes-Trejo, B., Guerra-Ramírez, D., Zuleta-Prada, H., Cuevas-Sánchez, J. A., Reyes, L., Reyes-Chumacero, A., Rodríguez-Salazar, J. (2014). *Annona diversifolia* seed oil as a promising non-edible feedstock for biodiesel production. *Industrial Crops and Products*, 52, 400-404

Schinas, P., Karavalakis, G., Davaris, C., Anastopoulos, G., Karonis, D., Zannil'ps, F., Stournas, S., Lois, E., 2009. Pupkin (*Curcubita pepo* L.) seed oil as an alternative feedstock for the production of biodiesel in Greece. *Biomass and Bioenergy*, 33 (1), 44-49.

Sekhar, S. C., Karuppasamy, K., Vedaraman, N., Kabeel, A., Sathyamurthy, R., Elkelawy, M., & Bastawissi, H. A. E., 2018. Biodiesel production process optimization from *Pithecellobium dulce* seed oil: Performance, combustion, and emission analysis on compression ignition engine fuelled with diesel/biodiesel blends. *Energy Conversion And Management*, 161, 143.

Sekhar, S. C., Karuppasamy, K., Sathyamurthy, R., Elkelawy, M., Bastawissi, H. A. E. D., Paramasivan, P., Sathiyamoorthy, K., & Edison, P. (2018). Emission analysis on compression ignition engine fueled with lower concentrations of *Pithecellobium dulce* biodiesel?diesel blends. *Heat Transfer-Asian Research*, 48(1), 254-269.

Sekhar, S. C., Karuppasamy, K., Vedaraman, N., Sathyamurthy, R., Vijayabalan, P., Elshiekh, A., Nadanakumar, V., & Manokar, A. M., 2021. Process optimization and characterization of manila tamarind seed oil extracted by the soxhlet method. *International Journal Of Energy For A Clean Environment*, 22(1), 35.



cuadros clínicos identificados popularmente como "empacho" (indigestión). En Michoacán, ante la ingesta de frutos inmaduros, se emplea la decocción de la corteza combinada con *Prunus persica* (hueso de durazno), *Persea americana* (hueso de aguacate) y biomasa de maíz tostado. Asimismo, en las entidades de Guerrero y Morelos, la decocción de la corteza constituye el tratamiento de elección (Pérez-Álvarez, 2024).

Diversas investigaciones han demostrado que *Vachellia* contiene diversos metabolitos secundarios como flavonoides, alcaloides, compuestos fenólicos, saponinas, polisacáridos, taninos y terpenoides bioactivos (Seigler, 2003). Se utilizan en la medicina tradicional por sus propiedades antiateroscleróticas, antibacterianas, antihipertensivas, antiinflamatorias, antioxidantes, antiplaquetarias, citotóxicas e hipoglucémicas (Jelassi et al., 2016).

Teniendo en cuenta estos antecedentes, se definió el objetivo de caracterizar el contenido de metabolitos secundarios en hojas de *V. farnesiana* y sus fracciones para identificar posibles compuestos asociados a citotoxicidad y su potencial uso anticancerígeno.

Materiales y Métodos

Colecta e Identificación de la especie vegetal

La especie vegetal fue colectada de ejemplares adultos ubicados en el municipio de San Juan del Río, Querétaro (20°21'55.7"N 99°57'28.3"W). Se realizó la colecta de hojas, tallos, flores y vainas, los cuales fueron identificados en el Herbario Medicinal de Instituto Mexicano del Seguro Social con sede en el Centro Médico Nacional Siglo XXI.

Procesamiento de especie vegetal

Se procesaron únicamente las hojas, iniciando con la determinación del peso fresco (PF). A continuación, la biomasa se ultracongeló a -80°C durante 24 h (Thermo Scientific EXF40086A, EUA) y posteriormente se secó por liofilización (FreeZone 2.5 Labconco, Canadá) durante 24 h, finalmente se pesó la biomasa para determinar su peso seco (PS) y finalmente pulverizadas con un procesador de alimentos. La biomasa seca obtenida se almacenó a 4°C.

Elaboración del extracto crudo

La biomasa seca se mezcló con etanol (Fermont, México) en una proporción (1:30 p/v) y se mantuvo en agitación constante de 100 rpm durante 24 h (Prendo AGO 60-09, México). Una vez transcurrido este tiempo, se realizó una extracción asistida con baño ultrasónico (Shanghai Kudos Ultrasonic Instrument, China) a 40° C y 53 kHz durante 60 minutos. A



por Numonov et al. (2020) con modificaciones. Se utilizó ácido ursólico (0.2 mg/mL) como estándar para construir la curva patrón.

Se llevó 1 mL de estándar o muestra a tubos de ensayo con 9 mL de metanol, a continuación, se llevaron a baño María a 60°C hasta que se evaporó todo el solvente. Posteriormente se añadieron 0.4 mL de una solución vainillina- ácido acético (5% m/v), de inmediato se agregó 1 mL de ácido sulfúrico concentrado () y se llevó a baño María a 60°C durante 30 min. Una vez transcurrido este tiempo, se enfriaron los tubos a temperatura ambiente y se aforaron a un volumen de 10 mL empleando ácido acético glacial. Finalmente se leyeron las muestras en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 547 nm. El resultado de la cuantificación se expresó en miligramos de equivalentes de ácido ursólico por gramo de extracto seco (mg EAU g-1).

Cuantificación de fenoles

El contenido fenólico total se determinó mediante el método de Folin- Ciocalteu, descrito por Singleton y Rossi (1965). Se utilizó ácido gálico para construir la curva patrón.

En tubos eppendorf se colocaron 0.2 mL de extracto o estándar con 1 mL de reactivo Folin-Ciocalteu y se homogenizó durante 4 segundos, posteriormente se agregaron 0.8 mL de carbonato de sodio anhidrido (7.5% p/v), se homogenizó y se dejó reposar durante 2 horas a temperatura ambiente y en oscuridad. La absorbancia fue leída a 765 nm en un espectrofotómetro. El resultado de la cuantificación se expresó en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto seco (mg EAG g-1).

Cuantificación de flavonoides

La determinación de flavonoides se determinó mediante el método colorimétrico con cloruro de aluminio (Mueed et al. 2023), utilizando quercetina como patrón de referencia.

Se tomó 1 mL de muestra y se le añadió 1 mL de $AlCl_3$, la mezcla se agitó vigorosamente durante 5 s y se dejó en reposo durante 10 min en oscuridad y a temperatura ambiente. La absorbancia se midió a 410 nm utilizando un espectrofotómetro. El resultado de la cuantificación se expresó en miligramos de equivalentes de quercetina por gramo de extracto seco (mg QAE g-1).

Cuantificación de actividad antioxidante (DPPH)

La capacidad de eliminación de DPPH será evaluada mediante la metodología propuesta por Brand-Williams et al. (1995) con modificaciones. Se utilizó ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico (Trolox) a distintas concentraciones como patrón de referencia.

Se tomaron 0.2 mL de muestra y se añadirán 0.8 mL de buffer Tris-HCl (Se mezclaron 1.576 g de Tris-HCl en 100 mL de agua destilada), se agitó vigorosamente durante 5 s, a continuación, se añadió 1 mL de DPPH (se disolvieron 0.0078 g de DPPH en 100 mL de



metanol) y se dejó reposar por 30 min en oscuridad a temperatura ambiente, y enseguida se midió la absorbancia a 517 nm.

Cuantificación de actividad antioxidante (ABTS)

Finalmente, se determinó la capacidad de eliminación de ABTS mediante la metodología propuesta por Domínguez et al. (2024). Se utilizó Trolox a distintas concentraciones como patrón de referencia. Se tomaron 100 μ L de muestra y se añadieron 3 mL de reactivo ABTS (se mezclaron 5 mL de ABTS con 88 μ L de K₂SO₄), la mezcla de reacción se agitó vigorosamente durante 5 s, se dejó en reposo durante 10 min a temperatura ambiente; a continuación, se midió la absorbancia a 734 nm.

Resultados y discusión

Identificación de especie vegetal

Las muestras recolectadas fueron identificadas como *Vachellia farnesiana* con el número de váucher 16997 (Fig. 1)



Fig. 1. Váucher del espécimen vegetal colectado en San Juan del Río, Querétaro identificado como *V. farnesiana*.

Fitoquímica del extracto crudo

Previamente se ha reportado la presencia de metabolitos secundarios en *V. farnesiana* a partir de



base libre. En contraste, Herappe (2025) y Domínguez (2024) empleando una metodología muy similar a la del presente trabajo obtuvieron valores muy similares, esto confirma que la partición con solventes de polaridad media es altamente efectiva para fraccionar y concentrar este grupo de compuestos, los cuales han sido ampliamente vinculados con la actividad citotóxica en líneas celulares humanas.

Para la cuantificación de triterpenos, se obtuvo un valor de 283.18 mg UAE/g para la muestra analizada. Estos resultados son similares a lo previamente reportado por Domínguez (2024) y Herappe (2025), quienes registraron valores entre 243.8 y 364.7 mg UAE/g. Una vez más, se atribuyen estas similitudes al método de extracción empleado, lo que demuestra que esta alta cantidad de triterpenos podría asociarse a las propiedades citotóxicas y antioxidantes previamente reportadas.

Finalmente, se evaluó la capacidad antioxidante del extracto crudo mediante los ensayos de DPPH y ABTS, con el objetivo de determinar su eficacia ante radicales libres de distinta naturaleza química, polaridad y volumen estérico. El extracto mostró una elevada actividad antioxidante frente al radical DPPH, lo que demuestra la presencia de metabolitos secundarios con capacidad para transferir átomos de hidrógeno o electrones, neutralizando así la especie radicalaria. Este comportamiento evidencia un potencial protector in vitro contra procesos de estrés oxidativo.

En contraste, la evaluación frente al catión radical ABTS no mostró una capacidad de neutralización significativa. Esta selectividad en la respuesta antioxidante puede atribuirse a las diferencias en la estructura molecular y la polaridad de ambos radicales. El radical DPPH es una molécula voluminosa de naturaleza lipofílica, cuya decoloración se favorece en medios orgánicos como el etanol, lo que facilita la interacción con metabolitos de polaridad intermedia y no polares presentes en el extracto, como triterpenos y fenoles. Por su parte, el ensayo de ABTS se desarrolla en medio hidrofílico; la baja afinidad observada podría estar modulada por impedimentos estéricos específicos o por una menor solubilidad de los compuestos activos en la fase de la reacción, limitando la transferencia electrónica hacia el centro reactivo del radical.

Extracto crudo	
Alcaloides	273.55 ± 0.018 mg AE/g
Triterpenos	283.179 ± 0.0183 mg UAE/g
Flavonoides	199.746 ± 0.0244 mg QAE/g
Fenoles	209.11 ± 0.0070mg GAE/g
DPPH	27.97 ± 0.0045 µg Trolox / g
ABTS	51.1 ± 0.019 µg Trolox / g

Tabla 1. Caracterización fitoquímica del extracto crudo de *V. farnesiana*.



Conclusiones

En el presente estudio se demostró la efectividad del método de extracción etanólica seguido de partición líquido-líquido con disolventes de polaridad creciente para la concentración y fraccionamiento de metabolitos secundarios en hojas de *Vachellia farnesiana*. Esta metodología secuencial superó a las extracciones directas convencionales, permitiendo enriquecer eficientemente compuestos de interés fitoquímico como fenoles totales, flavonoides, alcaloides y triterpenos.

El análisis cuantitativo reveló que las hojas recolectadas durante la temporada primaveral presentan una elevada acumulación de compuestos fenólicos (209.11 mg GAE/g), respaldando la hipótesis de que este órgano vegetal concentra la mayor respuesta biosintética y defensiva frente al estrés ambiental en comparación con otros tejidos como las semillas. Asimismo, el ajuste estequiométrico y la comparación fitoquímica permitieron atribuir los altos niveles de flavonoides (199.75 mg QAE/g) a la selectividad del sistema de extracción y a la influencia de los factores geográficos y fenológicos sobre el metabolismo secundario de la especie.

La concentración exitosa de alcaloides (273.55 mg AE/g) y triterpenos (283.18 mg UAE/g) confirmó que la partición con solventes de polaridad media es determinante para solubilizar y recuperar grupos fitoquímicos no polares y de polaridad intermedia, los cuales suelen disiparse en extractos crudos directos. En conjunto, la alta abundancia de estas familias metabólicas valida la calidad fitoquímica del extracto obtenido y sustenta el potencial citotóxico y antioxidante de *Vachellia farnesiana* para su posterior evaluación en modelos biológicos.

Por último, el extracto de *V. farnesiana* presenta una capacidad antioxidante *in vitro* selectiva, mostrando neutralización frente al radical DPPH y una ausencia de actividad neutralizante frente al catión radical ABTS.

Literatura Citada

Assanga, S. B. I., Luján, L. M. L., Ruiz, J. C. G., McCarty, M. F., Cota-Arce, J. M., Espinoza, C. L. L., ... & Ángulo, D. F. (2020). Comparative analysis of phenolic content and antioxidant power between parasitic *Phoradendron californicum* (toji) and their hosts from Sonoran Desert. *Results in Chemistry*, 2, 100079.

Bahrami, H., & Tafrihi, M. (2023). Global trends of cancer: The role of diet, lifestyle, and environmental factors. *Cancer Innovation*, 2(4), 290–301. <https://doi.org/10.1002/cai2.76>

Biradar, S. R., & Rachetti, B. D. (2013). Extraction of some secondary metabolites & thin layer chromatography from different parts of *Acacia farnesiana* L. *Annals of Biological Research*, 4(6), 1-6.

Bunz, F. (2016). *Principles of cancer genetics* (2.^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94->



017-7486-4

Crosby, D., Bhatia, S., Brindle, K. M., Coussens, L. M., Dive, C., Emberton, M., Esener, S., Fitzgerald, R. C., Gambhir, S. S., Kuhn, P., Rebbeck, T. R., & Balasubramanian, S. (2022). Early detection of cancer. *Science*, 375(6586), eaay9040. <https://doi.org/10.1126/science.aay9040>

Delgadillo-Puga, C., Sánchez-Castillo, D. R., Cariño-Cervantes, Y. Y., Torre-Villalvazo, I., Tovar-Palacio, C., Vásquez-Reyes, S., ... & Noriega, L. G. (2023). *Vachellia farnesiana* pods or a polyphenolic extract derived from them exert immunomodulatory, metabolic, renoprotective, and prebiotic effects in mice fed a high-fat diet. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), 7984.

Domínguez Colín, J. A. (2024). Establecimiento de cultivos in vitro de *Vachellia farnesiana* para la obtención de metabolitos secundarios con potencial actividad citotóxica.

Gabr, A. M. M., El-Sayed, H. M., Ezzat, S. M., & Ghareeb, M. A. (2018). Seasonal variation in phytochemical composition and biological activities of *Acacia farnesiana* (L.) Willd. leaves. (Nota: Falta nombre de revista/volumen, verifica los datos faltantes en tu documento).

Herappe-Mejía, E., García-Morales, C., Orozco-Villafuerte, J., & Buendía-González, L. (2025). Phytochemical profiling of *Prosopis laevigata* and *Vachellia farnesiana* leaf extracts. *International Journal of Secondary Metabolite*, 12(4), 913-923.

Jelassi, A., Zardi-Bergaoui, A., Ben Jannet, H., & Bouajila, J. (2016). The effect of different tree leaves incorporation on the growth and nitrogen availability to wheat.

Lozano, H. B. (2021). Investigation of the Antimicrobial Activity and Secondary Metabolites of Leaf Extracts from *Vachellia Rigidula*, *Vachellia Farnesiana*, *Senegalia Berlandiery*, and *Senegalia Gregii*.

Mueed, A., Shibli, S., Al-Quwaie, D. A. H., Ashkan, M. F., Alharbi, M., Alanazi, H., Binothman, N., Aljadani, M., Majrashi, K. A., Huwaikem, M., El-Saadony, M. T., & Saad, A. M. (2023). Extraction, characterization of polyphenols from certain medicinal plants and evaluation of their antioxidant, antitumor, antidiabetic, antimicrobial properties, and potential use in human nutrition. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1125106. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1125106>

Olmedo-Juárez, A., Zarza-Albarran, M. A., Rojo-Rubio, R., Zamilpa, A., González-Cortazar, M., Mondragón-Ancelmo, J., ... & Mendoza-de Gives, P. (2020). *Acacia farnesiana* pods (plant:



Fabaceae) possesses anti-parasitic compounds against *Haemonchus contortus* in female lambs. *Experimental parasitology*, 218, 107980.

Pérez-Álvarez, S., Uranga-Valencia, L. P., Hernández-Salas, J., Chávez-Medina, J. A., & Magallanes-Tapia, M. A. (2024). El Huizache.: Botánica y Biotecnología. *Revista Planta*, 17(29).

Seigler, D. S. (2003). Phytochemistry of *Acacia*—sensu lato. *Biochemical Systematics and Ecology*, 31(8), 845-873. [https://doi.org/10.1016/S0305-1978\(03\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0305-1978(03)00082-6)

Shamsa, F., Monsef, H., Ghamooshi, R., & Verdian-rizi, M. (2008). Spectrophotometric determination of total alkaloids in some Iranian medicinal plants. *Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*, 32(1), 17-20.

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.

Sonkin, D., Thomas, A., & Teicher, B. A. (2024). Cancer treatments: past, present, and future. *Cancer genetics*, 286, 18-24.

Wall, M. E., Wani, M. C., Brown, D. M., Fullas, F., Oswald, J. B., Josephson, F. F., ... & Farnsworth, N. R. (1996). Effect of plant extracts on the activity of various enzymes. *Phytomedicine*, 3(3), 281-285.

Wyld, L., Audisio, R. A., & Poston, G. J. (2015). The evolution of cancer surgery and future perspectives. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 12(2), 115-124. <https://doi.org/10.1038/nrclinonc.2014.191>

Zarza-Albarrán, M. Á., Olmedo-Juárez, A., Mendoza-de Gives, P., Ancelmo-Mondragón, J., Arece-García, J., Aviles-Nova, F., ... & Rojo-Rubio, R. (2024). Productive response, carcass traits, and meat quality of sheep fed with increasing levels of crushed dry fruits of *Acacia farnesiana*. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 15(4), 778-799.



experimental para futuras investigaciones enfocadas en la optimización de la síntesis mecanoquímica y en el diseño de fotocatalizadores más eficientes para aplicaciones ambientales.

Palabras clave: Fotocatálisis heterogénea, Mecanoquímica, Pt/TiO₂, Pt/ZnO, Fotorreactor.

Abstract

Heterogeneous photocatalysis is a promising alternative for the degradation of organic pollutants present in wastewater. In this study, the photocatalytic activity of Pt/TiO₂ and Pt/ZnO materials synthesized via mechanochemistry was evaluated using methyl orange as a model pollutant under UV irradiation. The photocatalysts were prepared by high-energy milling followed by heat treatment and were subsequently evaluated in a photoreactor by monitoring dye degradation using UV-Vis spectrophotometry. Both synthesized materials exhibited significant photocatalytic activity in the degradation of methyl orange, reaching maximum degradation percentages of 76.24% for Pt/TiO₂ and 64.86% for Pt/ZnO at an initial concentration of 30 ppm, after 360 min of irradiation.

The results demonstrate that mechanochemistry is a green and viable route for synthesizing Pt/TiO₂ and Pt/ZnO photocatalysts, as it aligns with the principles of green chemistry due to its low solvent consumption. The materials obtained serve as an experimental benchmark for future research focused on optimizing the mechanochemical synthesis and designing more efficient photocatalysts for environmental applications.

Keywords: Heterogeneous photocatalysis, Mechanochemistry, Pt/TiO₂, Pt/ZnO, Photoreactor.

Introducción

El crecimiento poblacional y el desarrollo industrial han incrementado significativamente la generación de aguas residuales, lo que ha favorecido la descarga de efluentes con concentraciones elevadas de contaminantes procedentes de diversas actividades industriales. Entre estos, los colorantes orgánicos representan uno de los principales desafíos para el tratamiento de aguas residuales debido a su elevada estabilidad química y persistencia ambiental, características que dificultan su degradación por procesos naturales y tratamientos convencionales (Bopape *et al.*, 2024). Estos compuestos son ampliamente utilizados en industrias como la textil, alimentaria, farmacéutica y papelera, lo que propicia su presencia en cuerpos de agua cuando los efluentes no reciben un tratamiento adecuado. Su acumulación reduce la penetración de la radiación solar, altera



los procesos fotosintéticos y puede generar subproductos con efectos tóxicos para los organismos vivos (Sharafinia & Rashidi, 2023). Entre ellos, los colorantes azoicos constituyen el grupo de mayor producción a nivel mundial; dentro de este grupo, el naranja de metilo (MO) es ampliamente utilizado como compuesto modelo en estudios de degradación fotocatalítica debido a su elevada estabilidad química y persistencia en medios acuáticos.

Los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales, como la coagulación-floculación, la adsorción y la filtración, presentan limitaciones en cuanto a su eficiencia, su costo o la transferencia de contaminantes a otra fase, lo que requiere un tratamiento posterior (Sánchez Villamarín, 2022). Como alternativa, las tecnologías avanzadas de oxidación han cobrado gran interés por su capacidad para degradar contaminantes orgánicos hasta obtener compuestos menos perjudiciales. Entre ellas, la fotocatálisis heterogénea destaca por aprovechar la energía luminosa para generar especies reactivas capaces de oxidar una amplia variedad de contaminantes orgánicos, lo que la convierte en una de las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de aguas residuales.

Entre los materiales fotocatalíticos más estudiados se encuentran el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de zinc (ZnO), debido a su estabilidad química, baja toxicidad, disponibilidad y elevada actividad fotocatalítica eficientes (Barba Nieto, 2023). No obstante, la eficiencia de ambos materiales continúa siendo objeto de investigación debido, principalmente, a la rápida recombinación de los pares electrón-hueco fotogenerados, fenómeno que limita el aprovechamiento de las especies reactivas generadas durante el proceso fotocatalítico. Por ello, se han propuesto diversas estrategias para mejorar su desempeño, entre ellas la formación de heterouniones, el control de la morfología, la generación de defectos cristalinos y la modificación mediante metales nobles.

Entre los metales nobles empleados en la modificación de semiconductores destacan Ag, Au, Pd y Pt. En particular, el Pt actúa como un cocatalizador que favorece la transferencia de electrones desde la banda de conducción del semiconductor hacia las nanopartículas metálicas. Este fenómeno disminuye la recombinación de los pares electrón-hueco y prolonga la vida útil de las cargas fotogeneradas, lo que incrementa la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) y de radicales superóxidos ($\text{O}_2^{\bullet-}$), principales responsables de la degradación oxidativa del naranja de metilo. El Pt ha sido ampliamente investigado en aplicaciones fotocatalíticas relacionadas con la producción de hidrógeno debido a su capacidad para actuar como sitio de captura de electrones y favorecer la separación de cargas fotogeneradas (García de la Cruz, 2016; Lakshmanareddy *et al.*, 2019). Sin embargo, el desempeño fotocatalítico de materiales modificados con Pt destinados a la degradación



de colorantes orgánicos continúa siendo objeto de estudio, ya que depende de factores como el semiconductor empleado, el método de síntesis y las condiciones de operación.

Además de la composición química del material, la ruta de síntesis desempeña un papel determinante en las propiedades estructurales y fotocatalíticas de los semiconductores. En este contexto, la mecanoquímica ha emergido como una alternativa eficiente para la obtención de materiales funcionales, ya que permite llevar a cabo reacciones en estado sólido con un consumo mínimo o nulo de disolventes, en concordancia con los principios de la química verde (Kanmaz *et al.*, 2023; Paneque-Quevedo, 2019). Entre las técnicas mecanoquímicas más utilizadas, destaca la molienda de alta energía (ball milling), que favorece la mezcla íntima de los precursores mediante impactos y esfuerzos de corte, lo que promueve modificaciones estructurales que pueden influir en las propiedades finales de los materiales obtenidos (Amrute *et al.*, 2021; Danielis *et al.*, 2024). Considerando que tanto la composición química como la ruta de síntesis pueden influir en el desempeño de un fotocatalizador, resulta de interés evaluar la actividad fotocatalítica de materiales basados en TiO_2 y ZnO , modificados con Pt y sintetizados mediante mecanoquímica, bajo condiciones experimentales equivalentes.

Por lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la actividad fotocatalítica de los materiales Pt/TiO_2 y Pt/ZnO sintetizados mediante mecanoquímica mediante la degradación de naranja de metilo como compuesto modelo bajo irradiación UV en un fotorreactor. Con ello, se busca aportar información sobre el comportamiento fotocatalítico de ambos materiales, obtenidos mediante la misma ruta de síntesis y evaluados bajo condiciones experimentales equivalentes.

Materiales y Métodos

Materiales y reactivos

Se empleó dióxido de titanio (TiO_2 , marca: Fermont), óxido de Zinc (ZnO , marca: Jalmex) y acetilacetato de platino (II) ($\text{Pt}(\text{acac})_2$, marca: Sigma - Aldrich) como precursores para la síntesis de los catalizadores. Durante la síntesis se emplearon etanol y agua desionizada como medio para la molienda asistida por líquido.

La actividad fotocatalítica de los materiales se evaluó utilizando naranja de metilo (MO, marca: Sigma - Aldrich) como contaminante modelo. Las soluciones se prepararon con agua desionizada y la concentración residual del colorante se determinó mediante espectrofotometría UV-Vis.

Síntesis de los catalizadores



Los materiales modificados con Pt se sintetizaron mediante un procedimiento mecanoquímico basado en el protocolo reportado por (Agrelo-Lestón *et al.*, 2025), conservando el contenido nominal de Pt (0.33 % en peso) y escalando cuatro veces las cantidades de reactivos para obtener una mayor cantidad de material, de acuerdo con los requerimientos experimentales del presente estudio. Para la síntesis de Pt/TiO₂ se colocaron 1.462 g de TiO₂ y 0.01 g de acetilacetato de platino (II) [Pt(acac)₂] en un reactor de zirconio de 25 mL, junto con 16.5 g de bolas de zirconio de 8 mm de diámetro. Con el propósito de favorecer la interacción entre los precursores durante la molienda, se empleó la técnica de Liquid-Assisted Grinding (LAG), adicionando 400 µL de etanol y 400 µL de agua destilada como agentes auxiliares.

El proceso de molienda se llevó a cabo en un molino de bolas a una frecuencia de 28 Hz durante 40 minutos. Posteriormente, el contenido se transfirió a otro recipiente para realizar tres ciclos de lavado, cada uno consistente en la adición de 10 mL de etanol, seguida de 20 minutos de agitación y 15 minutos de centrifugación. Tras los lavados, el material se secó en una mufla a 100 °C durante 24 horas. Finalmente, se recuperó en cápsulas de porcelana para completar un tratamiento térmico de 6 horas a 400 °C. Una vez concluido este proceso, la muestra se almacenó en viales para su uso posterior.

La síntesis del material Pt/ZnO se realizó siguiendo el mismo procedimiento experimental, sustituyendo únicamente el TiO₂ por ZnO como semiconductor de partida.

Sistema fotocatalítico experimental

Las corridas fotocatalíticas se realizaron en un sistema de reacción fotocatalítica de fabricación propia, constituido por un reactor cilíndrico de vidrio de borosilicato con una capacidad de 500 mL, colocado sobre una parrilla de agitación para mantener la suspensión homogénea del fotocatalizador durante todo el proceso experimental. El reactor se instaló en el interior de una cámara de reacción revestida con material reflectante para favorecer el aprovechamiento de la radiación incidente.

El sistema de irradiación estuvo conformado por dos lámparas UV de 15 W con una longitud de onda de emisión de 365 nm, colocadas paralelamente en la pared posterior de la cámara de reacción, y una lámpara UV sumergible de 7 W instalada directamente en el interior del reactor. Esta configuración permitió irradiar simultáneamente la suspensión desde el exterior y el interior del reactor durante las corridas fotocatalíticas.

Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y sin emplear un sistema de enfriamiento. La configuración del sistema de reacción fotocatalítica utilizado en este estudio se ilustra en la Figura 1.

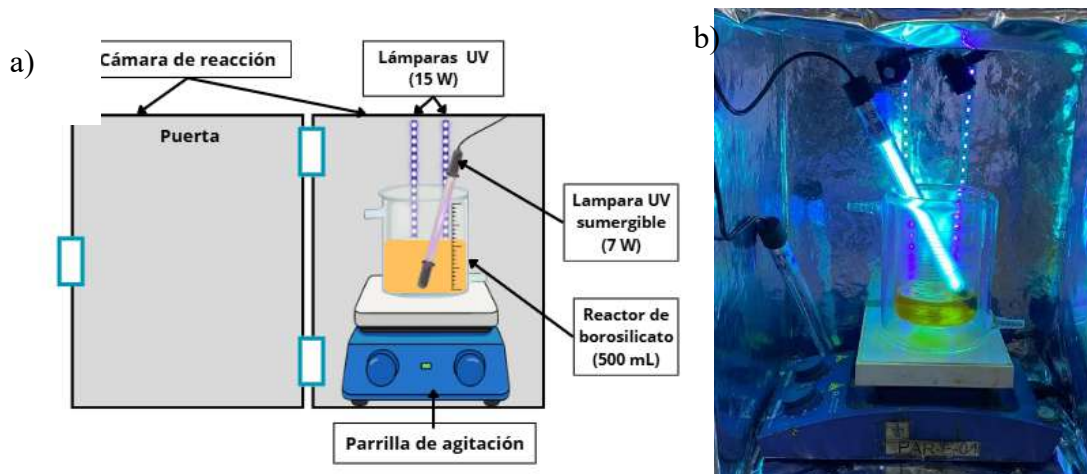


Figura 4. Sistema de reacción fotocatalítica empleado en este estudio: (a) esquema del montaje experimental y (b) fotografía del sistema utilizado durante las corridas fotocatalíticas.

Corridas fotocatalíticas

La actividad fotocatalítica de los materiales Pt/TiO_2 y Pt/ZnO se evaluó mediante ensayos de degradación de naranja de metilo (MO); en cada experimento se utilizaron 100 mL de solución y 10 mg de fotocatalizador, con agitación continua durante todo el ensayo. Las pruebas se realizaron en el sistema de reacción fotocatalítica descrito en el apartado anterior bajo irradiación UV.

Como primera etapa, ambos fotocatalizadores se evaluaron bajo las mismas condiciones experimentales durante 180 min, con el propósito de comparar su desempeño fotocatalítico a diferentes concentraciones iniciales de naranja de metilo (20, 25 y 30 ppm). Durante cada corrida experimental se recolectaron alícuotas de 10 mL a intervalos de 30 min para el seguimiento de la degradación del colorante.

Con base en los resultados obtenidos en la primera etapa, se seleccionó la concentración inicial que representa la mayor carga del contaminante (30 ppm) para evaluar la influencia del tiempo de reacción sobre el desempeño fotocatalítico. Para ello, las corridas se prolongaron hasta 360 min, manteniendo las mismas condiciones experimentales y realizando muestreos durante las primeras 3 horas cada 30 min y, posteriormente, cada hora.

Las muestras obtenidas fueron centrifugadas para separar el fotocatalizador en suspensión. Posteriormente, el sobrenadante se diluyó en una proporción 1:10 y la concentración residual de



naranja de metilo se determinó mediante espectrofotometría UV-Vis a 466 nm. El porcentaje de degradación fotocatalítica se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Degradación (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde C_0 es la concentración inicial de naranja de metilo y C_t es la concentración del colorante en el tiempo.

Resultados y discusión

Comparación del desempeño fotocatalítico de Pt/TiO₂ y Pt/ZnO en función de la concentración

La influencia de la concentración inicial de naranja de metilo sobre la actividad fotocatalítica de los materiales Pt/TiO₂ y Pt/ZnO se evaluó a 20, 25 y 30 ppm durante 180 min de irradiación UV. La comparación del porcentaje de degradación alcanzado por ambos fotocatalizadores bajo estas condiciones se muestra en la Figura 2.

En términos generales, ambos materiales mostraron actividad fotocatalítica; sin embargo, la concentración inicial del colorante influyó de manera distinta en su desempeño. El fotocatalizador Pt/TiO₂ presentó su mayor porcentaje de degradación a una concentración inicial de 30 ppm, alcanzando 57.70 %, mientras que Pt/ZnO mostró su mejor desempeño a 20 ppm, con 50.26 %. Estos resultados evidencian que el incremento de la concentración inicial favoreció el comportamiento fotocatalítico de Pt/TiO₂ bajo las condiciones evaluadas, mientras que en Pt/ZnO no se observó una tendencia similar.

Al comparar ambos fotocatalizadores, se observó un comportamiento semejante a una concentración inicial de 20 ppm; sin embargo, conforme la concentración aumentó, las diferencias entre ambos materiales fueron más evidentes. A 25 y 30 ppm, Pt/TiO₂ presentó porcentajes de degradación mayores que Pt/ZnO, lo que sugiere que la concentración inicial del contaminante influye de manera distinta en la respuesta fotocatalítica de ambos materiales bajo las condiciones experimentales empleadas.

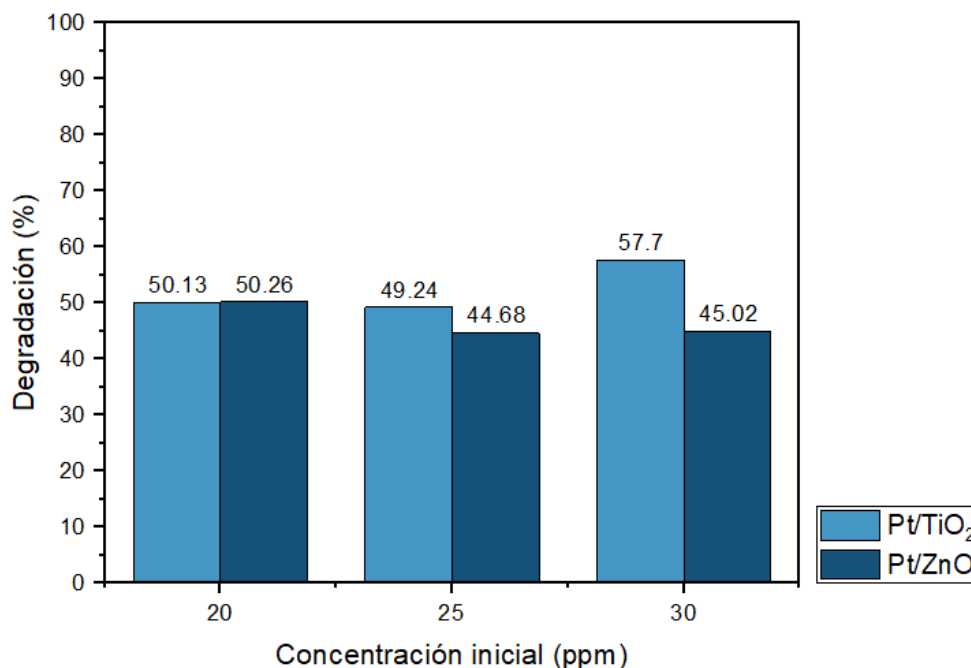


Figura 5. Comparación entre Pt/TiO₂ y Pt/ZnO a 20, 25 y 30 ppm durante 180 min

Efecto del tiempo de irradiación en la degradación de naranja de metilo

La degradación fotocatalítica de naranja de metilo aumentó a medida que transcurría el tiempo de irradiación en ambos materiales; no obstante, Pt/TiO₂ alcanzó porcentajes de degradación superiores a los de Pt/ZnO durante la mayor parte del ensayo, como se observa en la Figura 3. En ambos casos se registró un incremento gradual del porcentaje de degradación, lo que indica que la reacción fotocatalítica permaneció activa durante todo el periodo experimental.

Al finalizar los 360 min de irradiación, el material Pt/TiO₂ alcanzó un porcentaje de degradación de 76.24 %, mientras que Pt/ZnO obtuvo 64.86 % bajo las mismas condiciones experimentales. Con el transcurso del tiempo de reacción, la diferencia entre ambos fotocatalizadores se hizo más evidente, ya que Pt/TiO₂ mantuvo porcentajes de degradación superiores durante el periodo de evaluación.

El incremento continuo de la degradación en ambos materiales sugiere que el proceso fotocatalítico permaneció activo durante todo el periodo de evaluación, sin alcanzar un comportamiento estable al finalizar las seis horas de irradiación. Este resultado indica que el tiempo de reacción es un factor



importante para favorecer la degradación de naranja de metilo en las condiciones experimentales empleadas.

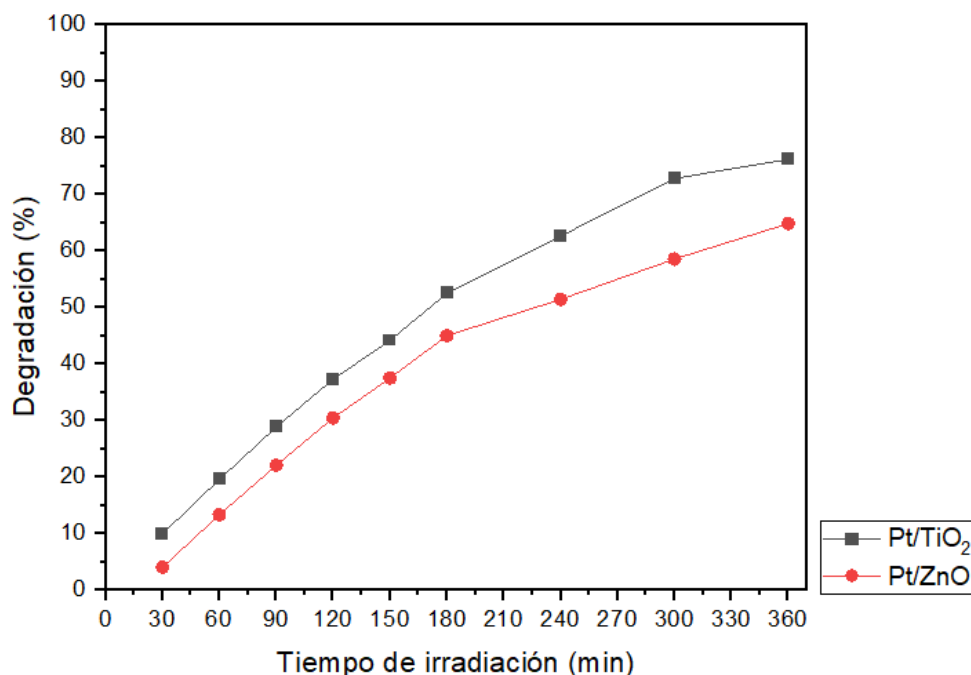


Figura 6. Cinética de degradación de Pt/TiO₂ y Pt/ZnO a 30 ppm durante 360 min de reacción

Los resultados obtenidos coinciden con estudios previos en los que la modificación de TiO₂ y ZnO con Pt incrementó la actividad fotocatalítica durante la degradación de naranja de metilo. En dichos estudios, la mejora del desempeño se relacionó con una menor recombinación entre los pares electrón-hueco y una separación más eficiente de las cargas fotogeneradas, lo que favoreció el desarrollo de las reacciones fotocatalíticas (Jaramillo-Páez *et al.*, 2018; Nhu & Nguyen, 2025).

El comportamiento diferencial observado con ambos catalizadores puede atribuirse a sus propiedades electrónicas. En TiO₂, el incremento de la concentración inicial de naranja de metilo favoreció la interacción entre el contaminante y los sitios activos disponibles, permitiendo un mayor aprovechamiento de las especies reactivas generadas durante la irradiación, a diferencia del Pt/ZnO, donde el aumento de la concentración inicial probablemente incrementó la competencia por los radicales hidroxilo y otras especies oxidantes disponibles, lo que limitó la velocidad de degradación. Este comportamiento evidencia que la respuesta fotocatalítica depende no sólo de la cantidad de



contaminante presente, sino también de la naturaleza del semiconductor y de la interacción metal-soporte (Ángel-Hernández *et al.*, 2021).

La actividad fotocatalítica de los catalizadores demuestra el potencial de la síntesis por mecanoquímica como estrategia sostenible para la preparación de materiales funcionales. A diferencia de métodos convencionales como la síntesis hidrotérmica, solvotérmica o la impregnación húmeda, la molienda de alta energía permite incorporar el Pt sobre los semiconductores utilizando cantidades mínimas de solventes y reduciendo significativamente el número de etapas experimentales. Estas características reducen la generación de residuos líquidos y simplifican el proceso de síntesis, lo que se alinea con los principios de la química verde.

Conclusiones

Se sintetizaron con éxito los fotocatalizadores Pt/TiO₂ y Pt/ZnO mediante mecanoquímica y se evaluó su actividad fotocatalítica para la degradación de naranja de metilo bajo irradiación UV. Ambos materiales mostraron actividad fotocatalítica; sin embargo, Pt/TiO₂ alcanzó el mayor porcentaje de degradación (76.24 %), mientras que Pt/ZnO obtuvo 64.86 % bajo las condiciones experimentales evaluadas. Asimismo, el incremento del tiempo de irradiación favoreció la degradación de naranja de metilo en ambos sistemas, observándose un mejor desempeño fotocatalítico con Pt/TiO₂.

La síntesis mecanoquímica permitió obtener fotocatalizadores activos para la degradación de naranja de metilo. Los resultados obtenidos aportan información sobre el comportamiento fotocatalítico de los sistemas Pt/TiO₂ y Pt/ZnO sintetizados mediante la misma ruta y evaluados bajo condiciones experimentales equivalentes, lo que constituye una base para futuras investigaciones orientadas a optimizar las condiciones de síntesis y profundizar en los mecanismos que rigen su actividad fotocatalítica.

Literatura citada

- Agrelo-Lestón, A., Soler, L., & Llorca, J. (2025). Pt/TiO₂ prepared by mechanochemistry boosts photocatalytic production of hydrogen. *ChemCatChem*, 17(15), e00538.
- Amrute, A. P., De Bellis, J., Felderhoff, M., & Schüth, F. (2021). Mechanochemical synthesis of catalytic materials. *Chemistry—A European Journal*, 27(23), 6819-6847.



Ángel-Hernández, B., Hernández-Aldana, F., Osorio, G. P., & Gutiérrez-Arias, J. M. (2021). Municipal wastewater treatment by photocatalysis: comparison between UV lamp and solar radiation using TiO₂ and ZnO/TiO₂ synthesized catalysts. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(3), Cat2438-Cat2438.

Barba Nieto, I. (2023). Catalizadores multicomponente basados en TiO₂-Pt para foto-producción de hidrógeno.

Bopape, D. A., Ntsendwana, B., & Mabasa, F. D. (2024). Photocatalysis as a pre-discharge treatment to improve the effect of textile dyes on human health: A critical review. *Heliyon*, 10(20).

Danielis, M., Colussi, S., Divins, N. J., Soler, L., Trovarelli, A., & Llorca, J. (2024). Mechanochemistry: a green and fast method to prepare a new generation of metal supported catalysts. *Johnson Matthey Technology Review*, 68(2), 217-231.

García de la Cruz, D. (2016). *Síntesis de materiales base bismuto y plomo utilizados como cocatalizadores para la producción de hidrógeno vía fotocatalisis* Universidad Autónoma de Nuevo León].

Jaramillo-Páez, C., Navío, J. A., Hidalgo, M., & Macías, M. (2018). ZnO and Pt-ZnO photocatalysts: Characterization and photocatalytic activity assessing by means of three substrates. *Catalysis Today*, 313, 12-19.

Kanmaz, N., Buğdaycı, M., & Demirçivi, P. (2023). Solvent-free mechanochemical synthesis of TiO₂-ethyl cellulose biocomposite for adsorption of tetracycline and organic dyes. *Journal of Molecular Liquids*, 378, 121643.

Lakshmanareddy, N., Rao, V. N., Cheralathan, K. K., Subramaniam, E. P., & Shankar, M. V. (2019). Pt/TiO₂ nanotube photocatalyst—Effect of synthesis methods on valance state of Pt and its influence on hydrogen production and dye degradation. *Journal of colloid and interface science*, 538, 83-98.

Nhu, V. T. T., & Nguyen, V.-T. (2025). Pt/TiO₂ nanoparticles synthesized via gamma irradiation to improve photocatalytic degradation of methyl orange in visible light. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 558, 165560.

Paneque-Quevedo, A. A. (2019). Mecanoquímica: Una visión general más allá de la Química Inorgánica. *Revista Cubana de Química*, 31, 71-86.

Sánchez Villamarín, S. E. (2022). Remoción de Naranja de Metilo disuelto por medio de fotocatalisis con nanopartículas de TiO₂ y radiación solar.

Sharafinia, S., & Rashidi, A. (2023). MIL-101 (Cr) hybrid nanoporous carbon derived MOF as a nano-adsorbent for dye removal using RSM-CCD. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(12), 105288.



Estudio del perfil de metabolitos de variedades de maíces nativos por espectrometría de masas de ultra alta resolución

Jesús Emanuel Rodríguez Sánchez¹, Carlos Yamel Gómez Cruz², Gerardo C. Noriega Altamirano^{3*}, José Javier Castro Arellano³, Gustavo G. Medina Mendoza², Yair Cruz Narváez^{2*}

Mesa 4. Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

Los maíces nativos mexicanos presentan variación agronómica y química que puede aprovecharse para reconocer materiales productivos y metabolitos de posible interés nutraceutico. El objetivo de este trabajo fue comparar el rendimiento agronómico estimado de ocho poblaciones de maíz nativo e identificar señales putativamente anotadas como compuestos asociados en la literatura con actividad antioxidante. Se estudiaron 39 muestras que componen a las 8 variedades. El rendimiento se estimó a partir del peso de grano por mazorca, el número de mazorcas por planta y la densidad de siembra. Los granos molidos se sometieron a extracción metanol-acuosa y los extractos se analizaron por infusión directa con ionización por electrospray acoplada a un espectrómetro de masas en polaridades positiva y negativa. Para la tabla comparativa se priorizaron señales detectadas en al menos 60 % de las réplicas biológicas de cada población. Las variedades CEE y P0#U presentaron los mayores rendimientos estimados, con 10.84 y 10.05 ton/ha, respectivamente, seguidos de OPR con 8.19 ton/ha. Todas las poblaciones presentaron señales de interés; OPR mostró el mayor número de anotaciones consistentes entre ambas polaridades. Los resultados indican que el rendimiento y la amplitud del perfil de metabolitos representan atributos complementarios.

Palabras clave: maíz nativo; rendimiento agronómico; metabolómica; actividad antioxidante.

Abstract

Mexican native maize exhibits agronomic and chemical variation that can be used to identify productive materials and metabolites of potential nutraceutical interest. The objective of this study was to compare the estimated agronomic yield of eight native maize populations and to identify signals tentatively annotated as compounds associated in the literature with antioxidant activity. A total of 39 samples representing the eight populations were studied. Yield was estimated from grain weight per ear, number of ears per plant, and planting density. Ground kernels were subjected to methanol–water extraction, and the extracts were analyzed by direct infusion electrospray ionization mass spectrometry in positive and negative ionization modes. For the comparative table, signals detected in at least 60% of the biological replicates within each population were prioritized. CEE and P0#U showed the highest estimated yields, with 10.84 and 10.05 t/ha, respectively, followed by OPR with 8.19 t/ha. All populations presented signals of interest, while OPR showed the highest number of consistent annotations across both ionization modes. These results indicate that yield and metabolite-profile breadth represent complementary attributes.



Keywords: native maize; agronomic yield; metabolomics; antioxidant activity.

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No. 19 “Leona Vicario”, Tecámac, Estado de México, México. C. P. 55740. Correo electrónico: jrodriguez.s2405@alumno.ipn.mx

² Instituto Politécnico Nacional-ESIQIE-UPALM, Laboratorio de Posgrado e Investigación en Operaciones Unitarias. Edificio 7, 1.er Piso, Sección A, Av. Luis Enrique Erro S/n, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, C. P. 07738, Delegación Gustavo A. Madero, Ciudad de México, Mexico. Correo: ycruzn@ipn.mx

³ Universidad Autónoma Chapingo, Academia de Meteorología, Área de Agronomía. km 38.5 Carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México, Mexico: Correo: gerardonorieg@gmail.com

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) constituye un alimento básico y un recurso agrícola de gran relevancia para México. La diversidad de los maíces nativos se manifiesta en rasgos de mazorca, pigmentación, adaptación local, rendimiento y composición química, por lo que su caracterización puede contribuir tanto a su aprovechamiento productivo como a la conservación de la diversidad biológica y alimentaria (Ranum et al., 2014; Gálvez Ranilla, 2020; Ku Pech et al., 2026).

Además de sus componentes mayoritarios, el grano contiene fenoles, flavonoides, antocianinas, carotenoides y otros metabolitos especializados. Diversos trabajos han mostrado que la concentración y composición de estas sustancias varían entre genotipos, colores de grano y productos derivados, y que los extractos de maíces pigmentados pueden presentar actividad antioxidante en ensayos químicos (Adom & Liu, 2002; López-Martínez et al., 2009; Žilić et al., 2012; Blanch et al., 2023; Feregrino-Pérez et al., 2024).

El procesamiento también modifica la retención y disponibilidad de los compuestos fenólicos. La nixtamalización, la extrusión y la elaboración de masa o tortilla pueden alterar los perfiles fitoquímicos y la capacidad antioxidante medida experimentalmente (De la Parra et al., 2007; Mora-Rochín et al., 2010; López-Martínez et al., 2011; Aguayo-Rojas et al., 2012; Méndez-Lagunas et al., 2020). En maíces morados, azules y rojos se han descrito perfiles de antocianinas, ácidos fenólicos y flavonoides relacionados con estas propiedades (Cevallos-Casals & Cisneros-Zevallos, 2003; Pedreschi & Cisneros-Zevallos, 2007; Lao et al., 2017; Urias-Lugo et al., 2015; Hernández et al., 2018; Loarca-Piña et al., 2019; Zhu, 2018).

La metabolómica no dirigida permite registrar numerosas señales de manera simultánea y comparar huellas químicas complejas (Fiehn, 2002; Patti et al., 2012; Johnson et al., 2016). La espectrometría de masas con resonancia ciclométrica de iones por transformada de Fourier (FT-ICR-MS) ofrece ultra alta resolución y elevada exactitud de masa para estudiar mezclas vegetales complejas (Maia et al., 2023). No obstante, una coincidencia de masa no confirma por sí sola una estructura; por ello, las asignaciones deben comunicarse como anotaciones putativas cuando no se dispone de MS/MS y



estándares auténticos (Kind & Fiehn, 2006; Sumner et al., 2007; Creek et al., 2014; Schymanski et al., 2014; Blaženović et al., 2018; Schrimpe-Rutledge et al., 2016).

El objetivo de este trabajo fue comparar el rendimiento agronómico estimado de ocho poblaciones de maíz nativo mexicano e identificar, mediante espectrometría de masas de ultra alta resolución, señales putativamente anotadas como metabolitos asociados en la literatura con actividad nutracéutica que ayuden a la salud .

Materiales y Métodos

Se estudiaron 39 muestras independientes pertenecientes a las poblaciones CAE, CEE, BN, P0#U, P0#M, OPR, ZCS y ZCO (Cuadro 1).

Cuadro 1. Codificación y listado de materiales utilizados en el trabajo.

Clave	Descripción	Procedencia reportada	n
CAE	Azul Chalqueño	Estado de México	5
CEE	Cacahuazintle de Ecatzingo	Estado de México	5
BN	Pepitilla	Morelos	5
P0#U	Pepitilla	Morelos	5
P0#M	Pepitilla	Morelos	4
OPR	Olotillo de Paso Real de Sarabia	Oaxaca	5
ZCO	Zapalote Chico de El Porvenir	Oaxaca	5
ZCS	Zapalote Chico de Ixtaltepec	Oaxaca	5

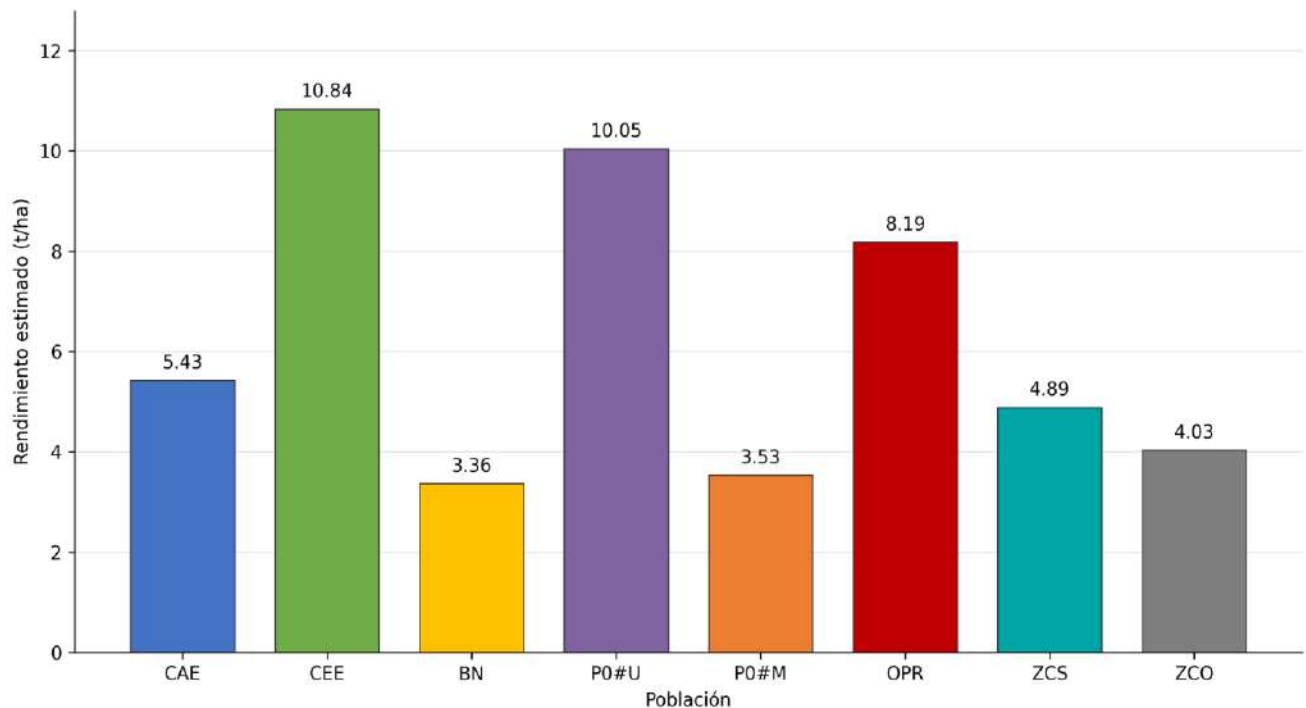
Se analizaron cinco muestras por población, excepto P0#M, con cuatro. Para cada material se registraron características de la mazorca y del grano. El rendimiento agronómico se estimó mediante la ecuación:

$$R = \frac{P \times N \times D}{1\,000\,000} \quad 1)$$

donde R es el rendimiento estimado de grano (ton/ha), P es el peso de grano por mazorca (g/mazorca), N es el número promedio de mazorcas por planta y D es la densidad de siembra (plantas/ha). El factor



Rendimiento agronómico de ocho poblaciones de maíz nativo



Estimación: (granos/mazorca x peso/grano x mazorcas/ha) ÷ 1,000,000; sin corrección por humedad.

Figura 1. Rendimiento agronómico estimado de ocho poblaciones de maíz nativo.

Fuente: Elaboración propia con base en el registro experimental.

La exploración conjunta de ambas polaridades permitió recuperar señales de diferentes clases químicas. El cuadro 2 presenta una sola fila por población y separa los compuestos observados en modo negativo y positivo. En todos los materiales se conservaron anotaciones putativas asociadas en la literatura con actividad antioxidante, aunque el número y la identidad de las señales variaron entre poblaciones.



Cuadro 2. Compuestos con anotación putativa asociados en la literatura con actividad antioxidante, integrados por población.

Variedad	Polaridad negativa	Polaridad positiva (≥ 60 %)	n (-)	n (+)
CAE	Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetyl-rhamnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; Peonidin 3-(6''-acetyl-glucoside); α,β -Dihydroxanthohumol; (7'R,8'R)-4,7'-Epoxy-3'-methoxy-4',5,9,9'-lignanetetrol 9'-glucoside; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid; Noreugenin	Chakaflavonoside A; Di-4-coumaroylputrescine; Caffeoylferuloylspermidine	6	3
CEE	Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetyl-rhamnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; α,β -Dihydroxanthohumol; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid	Chakaflavonoside A; Di-4-coumaroylputrescine; 4-coumaroylagmatine	3	3
BN	Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetyl-rhamnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; α,β -Dihydroxanthohumol; (7'R,8'R)-4,7'-Epoxy-3'-methoxy-4',5,9,9'-lignanetetrol 9'-glucoside; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid; Noreugenin	Chakaflavonoside A; Di-4-coumaroylputrescine; 3,4-Hexahydroxydiphenoylarabinose	5	3
P0#U	Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetyl-rhamnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; α,β -Dihydroxanthohumol; (7'R,8'R)-4,7'-Epoxy-3'-methoxy-4',5,9,9'-lignanetetrol 9'-glucoside; 3,4,5,6-Tetrahydroxyxanthone; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid; Noreugenin	Di-4-coumaroylputrescine; Caffeoylferuloylspermidine	6	2
P0#M	Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetyl-rhamnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; α,β -Dihydroxanthohumol; (7'R,8'R)-4,7'-Epoxy-3'-methoxy-4',5,9,9'-lignanetetrol 9'-glucoside; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid	Di-4-coumaroylputrescine; Caffeoylferuloylspermidine	4	2

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Variedad	Polaridad negativa	Polaridad positiva ($\geq 60\%$)	n (-)	n (+)
OPR	Amentoflavone; Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetylramnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; α,β -Dihydroxanthohumol; (7'R,8'R)-4,7'-Epoxy-3'-methoxy-4',5,9,9'-lignanetetrol 9'-glucoside; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid; Noreugenin	Chakaflavonoside A; Americanin B; Salvianolic acid C; Di-4-coumaroylputrescine; Caffeoylferuloylspermidine	6	5
ZCS	Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetylramnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; α,β -Dihydroxanthohumol; (7'R,8'R)-4,7'-Epoxy-3'-methoxy-4',5,9,9'-lignanetetrol 9'-glucoside; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid; Noreugenin	Americanin B; Salvianolic acid C; Di-4-coumaroylputrescine	5	3
ZCO	Kaempferol 3-rhamnosyl-(1 $\rightarrow$ 3)(4'''-acetylramnosyl)(1 $\rightarrow$ 6)-glucoside; α,β -Dihydroxanthohumol; (7'R,8'R)-4,7'-Epoxy-3'-methoxy-4',5,9,9'-lignanetetrol 9'-glucoside; 3,4,5-trihydroxy-6-({7-oxo-7H-furo[3,2-g]chromen-4-yl} oxy)oxane-2-carboxylic acid; Noreugenin	Chakaflavonoside A; Americanin B; Di-4-coumaroylputrescine; Caffeoylferuloylspermidine	5	4

Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento de los espectros. Se muestran señales detectadas en al menos 60 % de las réplicas biológicas de cada población. n (-) y n (+) indican el número de anotaciones en polaridad negativa y positiva, respectivamente.

Para complementar el número de anotaciones presentado en el Cuadro 2, se construyó un mapa de calor con las abundancias medias normalizadas de las principales señales metabólicas. Esta representación permitió identificar en qué poblaciones cada señal presentó una abundancia relativa mayor o menor respecto de su comportamiento promedio entre los ocho materiales evaluados.



Patrón relativo de abundancia de los metabolitos principales del Cuadro 2

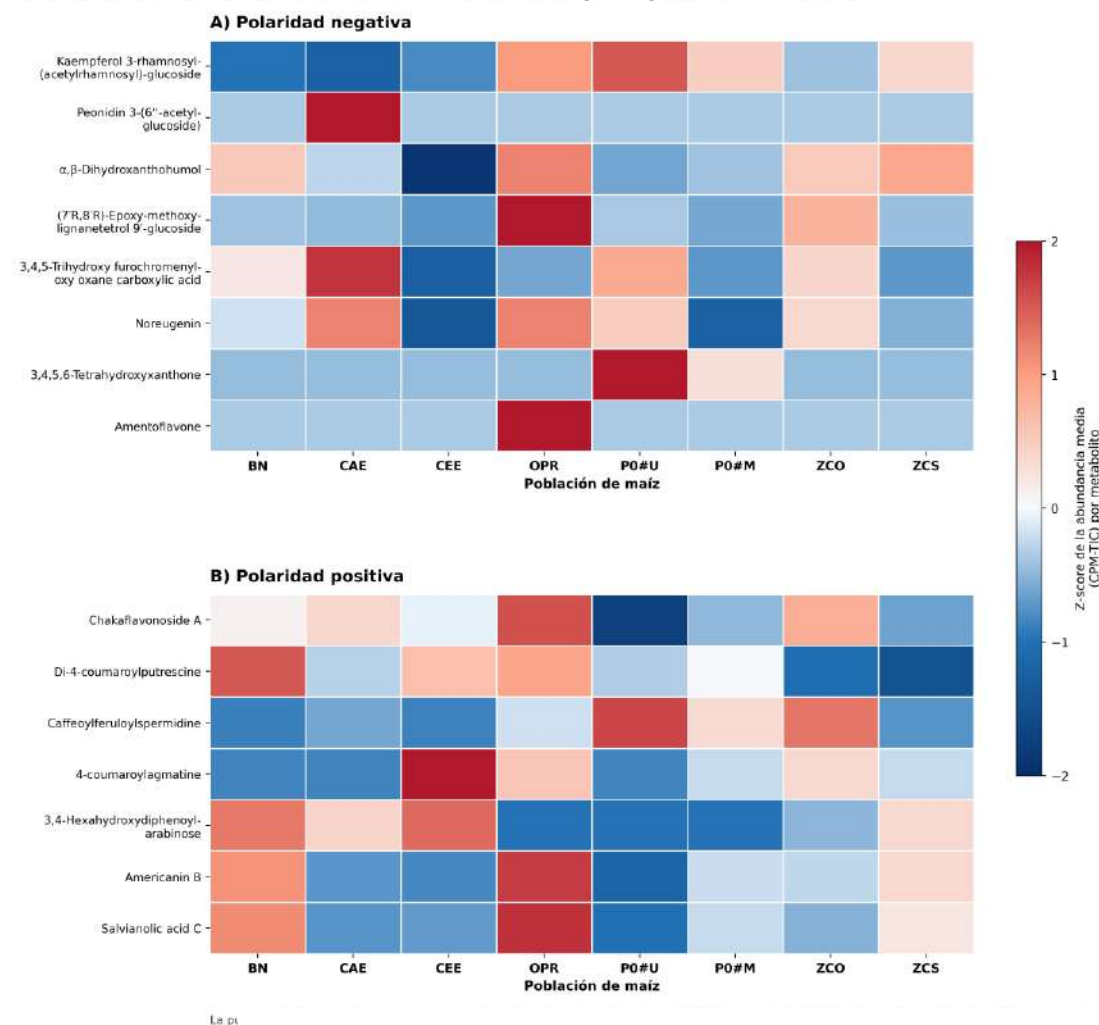


Figura 2. Patrón relativo de abundancia de las principales señales metabolómicas del Cuadro 2 en ocho poblaciones de maíz nativo: A) polaridad negativa y B) polaridad positiva.

Fuente: Elaboración propia a partir de las abundancias medias normalizadas mediante CPM-TIC.

Al integrar el criterio de consistencia, OPR reunió 11 anotaciones (seis en polaridad negativa y cinco en positiva), CAE nueve, BN y ZCO ocho, P0#U ocho, ZCS ocho, CEE seis y P0#M seis. Estos conteos no representan concentraciones, sino la amplitud del conjunto de señales priorizadas. OPR combinó un rendimiento de 8.19 ton/ha con el mayor número de anotaciones consistentes, mientras que CEE y P0#U alcanzaron los rendimientos más altos con conjuntos químicos de menor o similar



amplitud. Por tanto, el rendimiento y la composición metabolómica describieron atributos complementarios y no una relación directa de superioridad.

Entre las señales se encontraron derivados de kaempferol y peonidina, amentoflavona, xantonas, lignanos, ácido salvianólico C y fenolamidas como *di-4-coumaroylputrescine* y *caffeoylferuloylspermidine*. La relevancia potencial de estas anotaciones no se limita a una actividad antioxidante general. En estudios experimentales, compuestos fenólicos aislados del grano de maíz, entre ellos peonidina-3-glucósido, mostraron capacidad para neutralizar radicales e inhibir las enzimas α -glucosidasa y xantina oxidasa, mecanismos investigados por su posible relación con el control de la glucosa posprandial y la formación de ácido úrico, respectivamente (Nile & Park, 2014). Asimismo, extractos de maíz azul y pigmentado ricos en antocianinas y ácidos fenólicos han presentado actividad antimutagénica y efectos antiproliferativos en líneas celulares de mama, hígado, colon y próstata; además, los compuestos fenólicos del maíz morado han sido estudiados por su posible contribución frente a alteraciones como obesidad, hiperglucemia, hipertensión y enfermedades cardiovasculares (Urias-Lugo et al., 2015; Lao et al., 2017; Loarca-Piña et al., 2019). Por otra parte, la amentoflavona ha mostrado actividades antioxidantes, antiinflamatorias, neuroprotectoras y relacionadas con la regulación metabólica en estudios celulares y animales, mientras que el ácido salvianólico C ha reducido respuestas inflamatorias, estrés oxidativo y daño celular en modelos experimentales (Yu et al., 2017; Duan et al., 2019). Diversas xantonas también han mostrado actividad antiinflamatoria en modelos *in vitro* e *in vivo* (Feng et al., 2020). Estos antecedentes respaldan el interés nutracéutico de las señales detectadas; sin embargo, no demuestran que los maíces estudiados prevengan o traten enfermedades, debido a que y no se realizaron ensayos directos de actividad biológica, pero en la literatura especializada si se confirma estos efectos.

El mapa de calor mostró patrones diferenciados de abundancia relativa entre las poblaciones. En polaridad negativa, OPR destacó por amentoflavona y el lignano glucosilado; P0#U por el derivado de kaempferol y la tetrahydroxixantona; y CAE por peonidina y noreugenina. En polaridad positiva, OPR presentó valores elevados de chakafalconósido A, Americanin B y ácido salvianólico C, mientras que BN, CEE, P0#U y ZCO destacaron por diferentes fenolamidas. En conjunto, los resultados confirman que cada población presentó un perfil químico particular y que OPR reunió varias señales relativamente abundantes en ambas polaridades.

Conclusiones

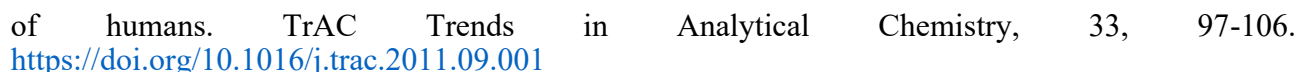
Las ocho poblaciones de maíz nativo presentaron diferencias descriptivas en rendimiento agronómico estimado y en el conjunto de metabolitos anotados putativamente. CEE y P0#U alcanzaron los mayores rendimientos, mientras que OPR reunió el mayor número de anotaciones consistentes entre ambas polaridades. El mapa de calor permitió visualizar que cada población presentó un patrón particular de abundancia relativa y que OPR destacó por varias señales en ambas polaridades. Todas las poblaciones conservaron señales asociadas en la literatura con actividad antioxidante, lo que evidencia una diversidad química distribuida entre los materiales. El rendimiento y la amplitud del



perfil metabolómico deben considerarse atributos complementarios. La confirmación de los compuestos y de su actividad requiere de cuantificación dirigida y ensayos de actividad antioxidante directa.

Literatura Citada

1. Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6182-6187. <https://doi.org/10.1021/jf0205099>
2. Aguayo-Rojas, J., Mora-Rochín, S., Cuevas-Rodríguez, E. O., Serna-Saldívar, S. O., Gutiérrez-Urbe, J. A., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2012). Phytochemicals and antioxidant capacity of tortillas obtained after lime-cooking extrusion process of whole pigmented Mexican maize. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(2), 178-185. <https://doi.org/10.1007/s11130-012-0288-y>
3. Blaženović, I., Kind, T., Ji, J., & Fiehn, O. (2018). Structure annotation of all mass spectra in untargeted metabolomics. *Analytical Chemistry*, 90(18), 10758-10764. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b01926>
4. Blanch, G. P., de Pascual-Teresa, S., & Ruiz del Castillo, M. L. (2023). Study on the phenolic composition and antioxidant properties of white-, yellow-, and black-corn foodstuffs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(13), 6263-6271. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12697>
5. Broadhurst, D., Goodacre, R., Reinke, S. N., Kuligowski, J., Wilson, I. D., Lewis, M. R., & Dunn, W. B. (2018). Guidelines and considerations for the use of system suitability and quality control samples in mass spectrometry assays applied in untargeted clinical metabolomic studies. *Metabolomics*, 14, 72. <https://doi.org/10.1007/s11306-018-1367-3>
6. Cevallos-Casals, B. A., & Cisneros-Zevallos, L. (2003). Stoichiometric and kinetic studies of phenolic antioxidants from Andean purple corn and red-fleshed sweetpotato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(11), 3313-3319. <https://doi.org/10.1021/jf034109c>
7. Creek, D. J., Dunn, W. B., Fiehn, O., Griffin, J. L., Hall, R. D., Lei, Z., Mistrik, R., Neumann, S., Schymanski, E. L., Sumner, L. W., Trengove, R., & Wolfender, J. L. (2014). Metabolite identification: Are you sure? And how do your peers gauge your confidence? *Trends in Parasitology*, 30(7), 319-321. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2014.04.009>
8. De la Parra, C., Serna-Saldívar, S. O., & Liu, R. H. (2007). Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4177-4183. <https://doi.org/10.1021/jf063487p>
9. Duan, Y., An, W., Wu, H., & Wu, Y. (2019). Salvianolic acid C attenuates LPS-induced inflammation and apoptosis in human periodontal ligament stem cells via Toll-like receptor 4/nuclear factor kappa B pathway. *Medical Science Monitor*, 25. <https://doi.org/10.12659/MSM.918940>
10. Dunn, W. B., Broadhurst, D., Begley, P., Zelena, E., Francis-McIntyre, S., Anderson, N., Brown, M., Knowles, J. D., Halsall, A., Haselden, J. N., Nicholls, A. W., Wilson, I. D., Kell, D. B., & Goodacre, R. (2011). Procedures for large-scale metabolic profiling of serum and plasma using gas chromatography and liquid chromatography coupled to mass spectrometry. *Nature Protocols*, 6(7), 1060-1083. <https://doi.org/10.1038/nprot.2011.335>
11. Dunn, W. B., Wilson, I. D., Nicholls, A. W., & Broadhurst, D. (2012). The importance of experimental design and QC samples in large-scale and MS-driven untargeted metabolomic studies



- 106



24. Maia, M., Figueiredo, A., Cordeiro, C., & Sousa Silva, M. (2023). FT-ICR-MS-based metabolomics: A deep dive into plant metabolism. *Mass Spectrometry Reviews*, 42(5), 1535-1556. <https://doi.org/10.1002/mas.21731>
25. Méndez-Lagunas, L. L., Cruz-Gracida, M., Barriada-Bernal, L. G., & Rodríguez-Méndez, L. I. (2020). Profile of phenolic acids, antioxidant activity and total phenolic compounds during blue corn tortilla processing and its bioaccessibility. *Journal of Food Science and Technology*, 57(12), 4688-4696. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04505-3>
26. Mora-Rochín, S., Gutiérrez-Urbe, J. A., Serna-Saldívar, S. O., Sánchez-Peña, P., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 502-508. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.08.010>
27. Nile, S. H., & Park, S. W. (2014). Antioxidant, alpha-glucosidase and xanthine oxidase inhibitory activity of bioactive compounds from maize. *Chemical Biology & Drug Design*, 83(1), 119-125. <https://doi.org/10.1111/cbdd.12205>
28. Patti, G. J., Yanes, O., & Siuzdak, G. (2012). Metabolomics: The apogee of the omics trilogy. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 13(4), 263-269. <https://doi.org/10.1038/nrm3314>
29. Pedreschi, R., & Cisneros-Zevallos, L. (2007). Phenolic profiles of Andean purple corn. *Food Chemistry*, 100(3), 956-963. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.004>
30. Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105-112. <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>
31. Sangster, T., Major, H., Plumb, R., Wilson, A. J., & Wilson, I. D. (2006). A pragmatic and readily implemented quality control strategy for HPLC-MS and GC-MS-based metabonomic analysis. *The Analyst*, 131(10), 1075-1078. <https://doi.org/10.1039/B604498K>
32. Schrimpe-Rutledge, A. C., Codreanu, S. G., Sherrod, S. D., & McLean, J. A. (2016). Untargeted metabolomics strategies: Challenges and emerging directions. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 27(12), 1897-1905. <https://doi.org/10.1007/s13361-016-1469-y>
33. Schymanski, E. L., Jeon, J., Gulde, R., Fenner, K., Ruff, M., Singer, H. P., & Hollender, J. (2014). Identifying small molecules via high resolution mass spectrometry: Communicating confidence. *Environmental Science & Technology*, 48(4), 2097-2098. <https://doi.org/10.1021/es5002105>
34. Sumner, L. W., Amberg, A., Barrett, D., Beale, M. H., Beger, R., Daykin, C. A., Fan, T. W. M., Fiehn, O., Goodacre, R., Griffin, J. L., Hankemeier, T., Hardy, N., Harnly, J., Higashi, R., Kopka, J., Lane, A. N., Lindon, J. C., Marriott, P., Nicholls, A. W., Reilly, M. D., Thaden, J. J., & Viant, M. R. (2007). Proposed minimum reporting standards for chemical analysis. *Metabolomics*, 3, 211-221. <https://doi.org/10.1007/s11306-007-0082-2>
35. Urias-Lugo, D. A., Heredia, J. B., Muy-Rangel, M. D., Valdez-Torres, J. B., Serna-Saldívar, S. O., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2015). Anthocyanins and phenolic acids of hybrid and native blue maize extracts and their antiproliferative activity in mammary, liver, colon and prostate cancer cells. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(2), 193-199. <https://doi.org/10.1007/s11130-015-0479-4>
36. Van den Berg, R. A., Hoefsloot, H. C. J., Westerhuis, J. A., Smilde, A. K., & van der Werf, M. J. (2006). Centering, scaling, and transformations: Improving the biological information content of metabolomics data. *BMC Genomics*, 7, 142. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-7-142>

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



37. Wehrens, R., Hageman, J. A., van Eeuwijk, F., Kooke, R., Flood, P. J., Wijnker, E., Keurentjes, J. J. B., Lommen, A., van Eekelen, H. D. L. M., Hall, R. D., Mumm, R., & de Vos, R. C. H. (2016). Improved batch correction in untargeted MS-based metabolomics. *Metabolomics*, 12, 88. <https://doi.org/10.1007/s11306-016-1015-8>
38. Yu, S., Yan, H., Zhang, L., Shan, M., Chen, P., Ding, A., & Li, S. F. (2017). A review on the phytochemistry, pharmacology, and pharmacokinetics of amentoflavone, a naturally occurring biflavonoid. *Molecules*, 22(2), 299. <https://doi.org/10.3390/molecules22020299>
39. Zhu, F. (2018). Anthocyanins in cereals: Composition and health effects. *Food Research International*, 109, 232-249. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.015>
40. Žilić, S., Serpen, A., Akıllıoğlu, G., Gökmen, V., & Vančetović, J. (2012). Phenolic compounds, carotenoids, anthocyanins, and antioxidant capacity of colored maize kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(5), 1224-1231. <https://doi.org/10.1021/jf204367z>



flavonoid content of $5.27 \pm 0.41 \text{ mg CE} \cdot \text{g}^{-1}$, confirming the presence of secondary metabolites with known antioxidant activity. Antioxidant capacity was high, with values of $21,110.44 \pm 1,482.01 \text{ } \mu\text{mol TE} \cdot \text{g}^{-1}$ in the ABTS assay and $36,066.48 \pm 2,831.23 \text{ } \mu\text{mol TE} \cdot \text{g}^{-1}$ in the FRAP assay, demonstrating a significant capacity to neutralize free radicals and reduce oxidizing agents. These results support the potential of *O. albicarpa* flowers as a source of bioactive compounds with applications in the food industry

Keywords: edible wild plants, proximal analysis, antioxidant capacity

¹Departamento de Preparatoria Agrícola, ² Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México, 56230, México.

Correos: flopezh@chapingo.mx, gsalazarc@chapingo.mx, dguerrar@chapingo.mx.

Introducción

México es considerado un país megadiverso, con más de 25 000 especies de plantas vasculares, muchas de ellas endémicas y de gran importancia ecológica, económica y sociocultural (Sarukhán & Mainero, 2008). Una proporción significativa de estas especies ha sido utilizada tradicionalmente como alimento y constituye un recurso estratégico para la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento del patrimonio biocultural. Sin embargo, su aprovechamiento sostenible depende tanto de la preservación del conocimiento tradicional como de la generación de información científica que respalde sus propiedades nutricionales y funcionales (Mateos-Maces et al., 2020).

Entre los recursos vegetales de mayor relevancia destacan las flores comestibles, utilizadas desde la época prehispánica como parte de la gastronomía mexicana (Mulík et al., 2024). En años recientes, el interés por estas ha aumentado debido a su potencial como alimentos funcionales y nutraceuticos. Además, las flores contienen diversos compuestos bioactivos, como carotenoides, compuestos fenólicos, flavonoides, antocianinas, vitaminas, minerales y aceites esenciales, asociados con una elevada capacidad antioxidante y múltiples beneficios para la salud (Fernandes et al., 2018; Stefaniak & Grzeszczuk, 2018). No obstante, la mayoría de las flores comestibles silvestres se consumen únicamente de forma estacional y local, por lo que aún existe información limitada sobre su composición química, valor nutricional y propiedades biológicas. Esta falta de conocimiento científico restringe su valorización y aprovechamiento dentro de nuevos sistemas agroalimentarios (Sotelo et al., 2007).



Dentro de este contexto, el género *Opuntia* Mill. (Cactaceae) representa uno de los recursos vegetales más importantes de las zonas áridas y semiáridas de México debido a su relevancia ecológica, económica y alimentaria. Diversos estudios han demostrado que diferentes estructuras de estas plantas contienen compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias e hipoglucemiantes, lo que ha incrementado el interés por su potencial como alimento funcional (Reda & Atspha, 2019). Sin embargo, las flores han sido menos estudiadas que los frutos y cladodios, a pesar de evidencias recientes que destacan su elevado contenido de compuestos fenólicos y flavonoides (Elouazkiti et al., 2024).

En el Valle del Mezquital, Hidalgo, las flores de *Opuntia albicarpa* Scheinvar forman parte de la alimentación tradicional; sin embargo, la información sobre su composición nutricional, contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante continúa siendo escasa. Por ello, la presente investigación tiene como objetivo evaluar estas propiedades y realizar un análisis etnobotánico que contribuya a la preservación, valorización y promoción del consumo de este recurso como parte del patrimonio alimentario de México.

Materiales y Métodos

Material vegetal

Las flores de *Opuntia albicarpa* Scheinvar (Figura 1) fueron colectadas en mayo de 2026 en Actopan, Hidalgo, Valle del Mezquital, Hidalgo, México (2066 msnm, N20° 18' 6.534" W98° 54' 31.158). Un ejemplar se identificó taxonómicamente, y se depositó en el Herbario-Hortorio "JES" de la Universidad Autónoma Chapingo (número de registro 36168). Las muestras fueron liofilizadas en un equipo Free Zone 2.5 Liter Benchtop marca LABCONCO.



Figura 7. Flores de *Opuntia albicarpa* Sheinvar



Propiedades nutricionales

El análisis proximal de las muestras, previamente liofilizadas y molidas se determinó mediante los métodos: de la AOAC (1990): cenizas totales (AOAC 923.03), proteína cruda por el método de Kjeldhal (AOAC 981.10, 1981/955.04, factor de conversión de N x 6.25); extracto etéreo, método de Goldfish y Fibra cruda por el método de Weende. Todas las pruebas se hicieron por triplicado.

Propiedades antioxidantes

Cada muestra (0.2 g), previamente liofilizada y molida (Figura 2), se mezcló con 10 mL de una disolución metanol/agua 80 %. A esta disolución se le ajustó el pH a 3.0 con HCl 5 % para posteriormente ser agitada en vortéx (1,000 rpm x 3 min), después se sonicó (8890, Cole-Parmer, Vernon Hills, Estados Unidos) (15 min) y se agitó (150 rpm, 30 min). Finalmente, se empleó una centrifugadora (Frontier 5718R, Ohaus, Persippany, Estados Unidos) para separar el sobrenadante (4000 rpm, 15 min). Este último se aforó a 10 mL con la misma solución de metanol/agua. Estos extractos se prepararon por triplicado y se almacenaron en refrigeración a 7 °C. A partir de estos extractos se hicieron las determinaciones de contenido de fenoles totales, flavonoides, y la capacidad antioxidante.



Figura 8. Liofización de las flores de *O. albicarpa* Sheinvar



La cuantificación de capacidad antioxidante y el potencial nutracéutico se llevó a cabo mediante las siguientes técnicas:

a) Cuantificación de fenoles totales

Lo anterior se llevó a cabo por el método de Folin-Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965) adaptado a microplacas. La curva patrón se preparó con ácido gálico (1.25 a 11.25 μg AG/mL). Se mezclaron 25 μL de curva, extracto o blanco, 125 μL de agua, 20 μL de Folin-Ciocalteu (1:10) y 30 μL de Na_2CO_3 al 20%. La mezcla se mantuvo en reposo durante 30 minutos en oscuridad, y posteriormente, se midió la absorbancia a 760 nm. Los resultados fueron expresados como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de base seca ($\text{mg EAG} \cdot \text{gbs}^{-1}$). La cuantificación se realizó en un lector de microplacas de 96 pozos (BioTek Systems Synergy 2), con mediciones por cuatuplicado.

b) Determinación de flavonoides

Los flavonoides totales fueron determinados de acuerdo con el procedimiento Kubola and Siriamornpun (2011) adaptado a microplacas. Se mezclaron 0.5 mL de extracto, 2.5 mL de agua destilada y 0.15 mL de solución de NaNO_2 al 5%. Después de 6 minutos, se añadieron 0.3 mL de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ al 10 %. La mezcla anterior se dejó reposar durante 5 minutos y enseguida se añadió 1 mL de NaOH al 5%. La mezcla se agitó en vórtex (3000 rpm, 3 min). Finalmente se transfirieron 200 μL de cada muestra a los pozos de la microplaca y se midió la absorbancia a 510 nm en un lector de microplacas. Las mediciones se hicieron por cuadruplicado. Los resultados fueron expresados como miligramos equivalentes de catequina por gramo de muestra en base seca ($\text{mgEC} \cdot \text{gbs}^{-1}$).

c) Capacidad antioxidante, se evaluó aplicando los ensayos FRAP y ABTS adaptados a microplacas ambos utilizando Trolox.

Para el ensayo FRAP se utilizó el método descrito por Benzie & Strain (1996) adaptado a microplacas. Se preparó la mezcla FRAP con solución 10 mM de TPTZ (2,4,6-tripiridil-s triazina), ácido clorhídrico (HCl) 40 mM y una solución 20 mM de clorato de hierro (III) hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). En cada pocillo de la microplaca se vertieron 60 μL de agua destilada, 20 μL del extracto de la muestra y 180 μL de la mezcla FRAP, se dejó reposar durante 5 minutos y se leyó la absorbancia a 595 nm. Los resultados obtenidos se expresaron en micromoles equivalente de trolox por gramo de muestra en base seca ($\mu\text{mol ET} \cdot \text{gbs}^{-1}$).

Para el ensayo ABTS se utilizó el procedimiento de Re et al. (1999) adaptado a microplacas. Con al menos 16 horas de anticipación se preparó una mezcla con solución 7.4 mM del reactivo ABTS (2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) con una dilución de



persulfato de potasio 2.6 mM ($K_2S_2O_8$). Pasado el tiempo de incubación se diluyó la mezcla para tener lista la solución ABTS. En cada pocillo de la microplaca se vertieron 180 μ L de la solución ABTS y 20 μ L del extracto de la muestra, se dejó reposar durante 10 minutos y se leyó la absorbancia a 734 nm. Para la determinación de la capacidad antioxidante en ambos casos se utilizó una curva de calibración usando Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2 carboxílico) en una solución de 0.05 mg mL⁻¹ tomando alícuotas de 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 y 600 μ L llevados a un mL con agua destilada. Los resultados obtenidos se expresaron en micromoles equivalente de Trolox por gramo de muestra en base seca (μ mol ET·gbs⁻¹).

Resultados y discusión

El análisis proximal (Cuadro 1) mostró que las flores de *Opuntia* poseen un elevado contenido de cenizas (10.35 ± 0.07 %), lo que sugiere una importante riqueza mineral. Asimismo, el contenido de fibra cruda (23.12 ± 0.6 %) destaca su potencial como fuente de fibra.

El contenido proteico (9.31 ± 0.34 %) se encontró dentro del intervalo reportado para especies de *Opuntia*, mientras que el extracto etéreo (2.85 ± 0.01 %) confirmó el carácter bajo en grasa característico de este género (Chahdoura, et al., 2024). En conjunto, estos resultados indican que la mezcla evaluada presenta una composición nutricional favorable, caracterizada por un elevado aporte mineral y de fibra, atributos que, respaldan su potencial aplicación como ingrediente funcional y nutraceutico.

**Cuadro 1. Análisis proximal y propiedades antioxidantes de las flores de
O. albicarpa Scheinvar**

Análisis proximal	Porcentaje (%) en base seca
Cenizas	10.35±0.07
Fibra cruda	23.12±0.6
Proteínas	9.30±0.34
Extracto etéreo	2.85±0.01
Propiedades antioxidantes	
Contenido fenólico total	20.59±2.41 mg EAG· gbs ⁻¹



Flavonoides totales	5.27±0.42 mgEC· gbs ⁻¹
Ensayo FRAP	36066.48±2831 μmol ET· gbs ⁻¹
Ensayo ABTS	21110.44±1482 μmol ET· gbs ⁻¹

Datos expresados como medias ± desviación estándar. n = 3

Los compuestos fenólicos constituyen uno de los grupos de metabolitos secundarios más ampliamente distribuidos en el reino vegetal y son reconocidos por su elevada capacidad antioxidante mediante diferentes mecanismos, en especies del género *Opuntia* se ha documentado una amplia diversidad de estos compuestos. (Chahdoura et al., 2024).

Como se muestra en el Cuadro 1, el contenido de fenoles totales determinado mediante el método de Folin-Ciocalteu fue de **20.59 ± 2.41 mg EAG· gbs⁻¹** (miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de base seca), mientras que el contenido total de flavonoides fue de **5.27 ± 0.42 mgEC· gbs⁻¹** (miligramos equivalentes de catequina por gramo de muestra en base seca). Estos resultados confirman la presencia de una cantidad importante de compuestos fenólicos en el extracto de *Opuntia albicarpa*. Los flavonoides representaron una fracción relevante del contenido fenólico total, lo que sugiere que este grupo de metabolitos contribuye significativamente al perfil fitoquímico del extracto. La presencia de estos compuestos es consistente con el potencial biológico atribuido a las especies de *Opuntia*, ya que los fenoles y flavonoides son ampliamente reconocidos por su capacidad para actuar como agentes reductores, donadores de electrones y captadores de radicales libres, contribuyendo así a disminuir el estrés oxidativo (Rice-Evans et al., 1997).

Considerando la estrecha relación entre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante, se evaluó la actividad antioxidante del extracto mediante los ensayos ABTS y FRAP.

El ensayo ABTS se fundamenta en la capacidad de los antioxidantes presentes en la muestra para reducir el radical catión ABTS^{•+}, provocando una disminución de su absorbancia (Re et al., 1999). El extracto de *Opuntia albicarpa* presentó una capacidad antioxidante de **21110.44 ± 1482 μmol ET· gbs⁻¹** (micromoles equivalente de trolox por gramo de muestra en base seca), valor que evidencia una elevada eficiencia para neutralizar radicales libres. Esta actividad puede atribuirse, en gran medida, a la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides detectados en el extracto, aunque otros metabolitos antioxidantes presentes en la matriz vegetal, como ácido ascórbico, betalainas o carotenoides, también podrían contribuir de manera sinérgica. En conjunto, estos resultados respaldan el potencial del extracto como fuente natural de antioxidantes con posibles aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y nutracéutica.



Por otra parte, el ensayo FRAP evalúa la capacidad reductora de una muestra mediante la conversión del complejo férrico (Fe^{3+}) a su forma ferrosa (Fe^{2+}), reflejando el poder reductor de los compuestos antioxidantes presentes (Benzie y Strain, 1996). En este estudio, el extracto presentó una capacidad antioxidante de $36066.48 \pm 2831 \mu\text{mol ET} \cdot \text{gbs}^{-1}$ (micromoles equivalente de trolox por gramo de muestra en base seca), valor superior al obtenido mediante el ensayo ABTS. Esta diferencia es esperable, ya que ambos métodos se basan en mecanismos de reacción distintos y responden de manera diferencial a la composición química del extracto. El elevado valor obtenido mediante FRAP indica una importante capacidad de transferencia electrónica, característica asociada principalmente a los compuestos fenólicos. En consecuencia, los resultados de ambos ensayos confirman que el extracto de *Opuntia albicarpa* posee un destacado potencial antioxidante, el cual guarda concordancia con su contenido de fenoles y flavonoides y refuerza el interés por esta especie como fuente de compuestos bioactivos con potencial funcional.

Conclusiones

Los extractos de flores de *Opuntia albicarpa* Scheinvar presentan un perfil nutricional y fitoquímico de interés, caracterizado por un alto contenido de fibra y compuestos fenólicos, especialmente flavonoides, asociados con una elevada capacidad antioxidante. Estos resultados respaldan su potencial como fuente de compuestos bioactivos para el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos, además de sustentar aprovechamiento y consumo tradicional de esta especie en México.

Literatura citada

- AOAC (1990). Official Methods of Analysis of AOAC. (15th Ed.) Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia, EE. UU.
- Benzie, I. F., & Strain, 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>
- Chahdoura, H., Mzoughi, Z., Ellouze, I., Mekinić, I. G., Čmiková, N., El Bok, S., ... & Káčániová, M. (2024). *Opuntia* species: A comprehensive review of chemical composition and bio-pharmacological potential with contemporary applications. *South African journal of botany*, 174, 645-6. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.09.038>
- Elouazkiti, M., Zefzoufi, M., Elyacoubi, H., Gadhi, C., Bouamama, H., & Rochdi, A. (2024). Phytochemical Analysis and Bioactive Properties of *Opuntia dillenii* Flower Extracts,



- Compound, and Essential Oil. *International Journal Of Food Science*, 2024(1), 6131664. <https://doi.org/10.1155/2024/6131664>
- Fernandes, L., Ramalhosa, E., Pereira, J. A., Saraiva, J. A., & Casal, S. (2018). The Unexplored Potential of Edible Flowers Lipids. *Agriculture*, 8(10), 146. <https://doi.org/10.3390/agriculture8100146>
- Kubola, J., & Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food Chemistry*, 127(3), 1138-1145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.115>
- Mateos-Maces, L., Chávez-Servia, J. L., Vera-Guzmán, A. M., Aquino-Bolaños, E. N., Alba-Jiménez, J. E., & Villagómez-González, B. B. (2020). Edible Leafy Plants from Mexico as Sources of Antioxidant Compounds, and Their Nutritional, Nutraceutical and Antimicrobial Potential: A Review. *Antioxidants*, 9(6), 541. <https://doi.org/10.3390/antiox9060541>
- Mulík, S., Hernández-Carrión, M., Pacheco-Pantoja, S. E., & Ozuna, C. (2024). Endemic edible flowers in the Mexican diet: Understanding people's knowledge, consumption, and experience. *Future Foods*, 9, 100374. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100374>
- 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](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(98)00315-3)
- Reda, T. H., & Atsbha, M. K. (2019). Nutritional Composition, Antinutritional Factors, Antioxidant Activities, Functional Properties, and Sensory Evaluation of Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) Seeds Grown in Tigray Region, Ethiopia. *International Journal Of Food Science*, 2019, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2019/5697052>
- Rice-Evans, C. A., Miller, N. J., & Paganga, G. (1997). Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science*, 2(4), 152–159. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01018-2)
- Sarukhan, J., & Mainero, J. S. (2008). Capital natural de México. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.118843>
- 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. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- Sotelo, A., López-García, S., & Basurto-Peña, F. (2007). Content of Nutrient and Antinutrient in Edible Flowers of Wild Plants in Mexico. *Plant Foods For Human Nutrition*, 62(3), 133-138. <https://doi.org/10.1007/s11130-007-0053-9>
- Stefaniak, A., & Grzeszczuk, M. E. (2018). Nutritional and Biological Value of Five Edible Flower Species. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(1), 128-134. <https://doi.org/10.15835/nbha47111136>



Abstract

Yam (*Dioscorea spp.*) is a promising source of flour for gluten-free products; however, its

limited physicochemical properties restrict its use in food applications. One alternative for improving these properties is heat-moisture treatment (HMT), which modifies the starch structure without the use of chemical agents. The objective of this study was to evaluate the effect of HMT, using different heat sources, on the morphological, hydrophilic, and pasting properties of yam flour starch. The flour was obtained by drying the tubers with hot air (50 °C, 15 h), hydrated to 25% moisture content, and subjected to HMT in an oven (90 °C, 6 h), an autoclave (120 °C, 20 min), and a microwave (280 W, 5 min). The starch granules retained their general morphology; however, the oven- and autoclave-treated samples exhibited more irregular surfaces and partial disintegration. Water absorption capacity and solubility showed no differences between the native flour and the oven- and autoclave-treated samples, while microwave treatment reduced them by 15,67% and

7,50%, respectively. All modified samples exhibited lower swelling capacity. The maximum, break, and re-thickening viscosities decreased, while the paste-forming temperature increased, indicating greater thermal stability and a lower tendency toward retrogradation. These results demonstrate that the heat source determines the extent of the modifications induced by HMT and suggest that modified yam flour has high potential as an ingredient in gluten-free baked goods.

Keywords: autoclave, microwave, oven, physical modification.

¹ Universidad de Córdoba, Departamento de Ingeniería de Alimentos, Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales. Carrera 6 No. 77-305 Montería-Córdoba, Colombia. Correos: aluisapaternina@correo.unicordoba.edu.co; rdandrade@correo.unicordoba.edu.co.

² Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Departamento de Ingeniería, Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales. Carrera 32 No 12 - 00 Chapinero, Vía Candelaria Palmira -Valle del Cauca, Colombia. Correo: joafigueroafl@unal.edu.co.



Introducción

El ñame es un tubérculo rico en carbohidratos complejos, como el almidón y compuestos bioactivos lo que lo convierte en un alimento clave para la seguridad alimentaria en muchos países y en una materia prima con alto potencial para la elaboración de productos sin gluten. Sin embargo, la harina de ñame presenta limitaciones funcionales, como baja solubilidad y estabilidad térmica y mecánica y alta tendencia a la retrogradación, lo que afecta la calidad del producto final (Itagi *et al.*, 2023; Sahoo *et al.*, 2023).

Para superar estas limitaciones, desde la ciencia y tecnología de alimentos se han empleado diversos métodos de modificación, entre los cuales se encuentran procesos físicos, químicos y enzimáticos. Entre los métodos físicos, los tratamientos hidrotérmicos, particularmente el tratamiento de calor-humedad (HMT), ha sido ampliamente estudiado como una alternativa de etiqueta limpia para inducir la reorganización estructural del almidón. Este tratamiento modifica los materiales amiláceos al calentarlos a temperaturas superiores al punto de gelatinización (entre 80 y 120 °C) y con bajos niveles de humedad (del 15 al 30 %) durante un periodo de tiempo variable que oscila entre 15 minutos y 16 horas. Estas condiciones de proceso determinan los cambios en las harinas, que incluyen alteraciones en la morfología, capacidad de hinchamiento, cristalinidad, gelatinización, estabilidad térmica, retrogradación, digestibilidad y propiedades de pasta, mejorando su versatilidad y utilidad en la industria alimentaria (Schafranski *et al.*, 2021).

Varios estudios han demostrado que el HMT modifica las propiedades térmicas, de hidratación y de empaste del almidón; favoreciendo el incremento de su estabilidad térmica y aumentando la proporción de almidón resistente (Paternina *et al.*, 2025; Khanh *et al.*, 2026). No obstante, la mayoría de las investigaciones se han centrado en un único método de calentamiento, mientras que existe información limitada sobre el efecto comparativo de diferentes fuentes térmicas, como horno, autoclave y microondas, sobre las propiedades funcionales de la harina de ñame (Barua *et al.*, 2021, 2022).

En consecuencia, este estudio plantea la hipótesis de que el mecanismo de transferencia de calor asociado a cada fuente térmica induce diferentes grados de reorganización estructural del almidón durante el HMT, generando cambios diferenciados en sus propiedades morfológicas, hidrofílicas y de empaste. Por lo tanto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes fuentes térmicas empleadas durante el tratamiento por calor-humedad sobre las propiedades morfológicas, hidrofílicas y de empaste del almidón de harina de ñame.



Materiales y Métodos

Obtención de harina de ñame: Los tubérculos de ñame (*Dioscòrea rotundata* cv. Espino) fueron proveídos por la Asociación Nacional de Productores y Procesadores de Yuca (ANPPY). Para la obtención de la harina, los tubérculos seleccionados se pelaron, lavaron y cortaron en tajadas de aproximadamente 2 mm de grosor, las cuales se sumergieron en una solución de ácido acético al 2,5 % p/v durante 15 min para prevenir el pardeamiento enzimático. Las muestras se secaron en un horno con convección forzada (FD115, BINDER, Germany) a una temperatura de 50 °C durante 15 h. Las muestras secas fueron molidas en un molino multiusos (Tecnal, TE-631/4, Brasil) y tamizadas en una malla Tyler No 80 (~180 µm). Las harinas obtenidas se empacaron en bolsas herméticas de polietileno (Seña *et al.*, 2025).

Modificaciones por Calor/Humedad (HMT): La harina fue modificada con calor y humedad empleando como fuentes de calor horno, autoclave y microondas siguiendo la metodología propuesta por Barua *et al.* (2022) con modificaciones en base a pre-ensayos realizados. Inicialmente, muestras de 20 g de harina se hidrataron hasta alcanzar un contenido de humedad del 25 % (p/p), posteriormente se depositaron en recipientes de vidrio (250 mL), luego se sellaron y equilibraron a 4 °C durante 24 h. Finalmente las muestras hidratadas se calentaron a 90 °C en un horno por convección forzada (FD115, BINDER, Germany) durante 6 h; a 120 °C durante 20 min en una autoclave (modelo RA-PC, Reico Equipment & Instrument Pvt. Ltd.) y a 280 W por 5 min en un microondas domestico (MGE07SEJ, GL, Sakai, Japón). Al final del proceso las muestras se secaron a 40 °C durante 16 h, se molieron, tamizaron y almacenaron en bolsas herméticas de polietileno.

Características morfológicas: Para examinar la morfología de los gránulos de almidón de las harinas, se usó un microscopio polarizado trinocular de luz polarizada y de campo claro (Optika, B-383POL, Italia). Las microfotografías fueron adquiridas bajo campos de luz clara y polarizada, con un aumento de 40X, usando una cámara de alta resolución de 10MP (Seña *et al.*, 2025).

Propiedades hidrofílicas: La capacidad de absorción de agua (CAA) se determinó por centrifugación, siguiendo la metodología reportada por Arroyo *et al.* (2023). El poder de hinchamiento (PH) se midió suspendiendo 0,5 g de muestra en 12,5 mL de agua destilada a 70°C, manteniendo la mezcla durante 30 min con agitación manual cada 10 min. Luego, la suspensión se centrifugó a 3402 × g durante 15 min. El sobrenadante se secó en un horno a 70 °C durante 16 h y se registraron los pesos tanto del precipitado como del sobrenadante seco. La solubilidad en agua fría (SAF) se determinó de acuerdo con el



método descrito por Seña *et al.* (2024). Se suspendieron 0,125 g de muestra en 12,5 mL de agua destilada, se agitaron durante 5 min a 500 rpm y se centrifugaron a $3402 \times g$ durante 15 min. El sobrenadante se secó en una placa Petri a 110 °C durante 4 h y se registró el peso final.

Propiedades de empastamiento: Los perfiles de viscosidad de las harinas, se analizaron utilizando un reómetro (Anton Paar, MCR 302, Austria) equipado con una celda de análisis de suspensión de almidón (C-ETD160/ST) y un husillo de cuchillas (Anton Paar, ST24-2D/2V/2V-30, Austria), siguiendo la metodología descrita por Arroyo *et al.* (2023). Suspensiones de harinas al 8 % p/v se calentaron gradualmente a 50 °C durante 1 min, luego la temperatura aumentó a 95 °C durante 7,5 min y se mantuvo estable durante 5 min. Luego, la temperatura disminuyó a 50 °C durante 7,5 min y se mantuvo estable durante 2 min. Se determinaron la temperatura de empaste, la viscosidad pico, viscosidad de rompimiento y viscosidad de retroceso.

Análisis estadístico: Los resultados se expresaron como la media de tres replicas $\pm$ desviación estándar. Suponiendo la normalidad de los datos, se verificó la homogeneidad de las varianzas ($p > 0,05$) mediante la prueba de Levene. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para comprobar si existían diferencias entre las muestras, y se utilizó la prueba de Tukey (con un 95 % de confianza) para comparar las medias. Los datos fueron procesados utilizando el software estadístico Statgraphics (Centurión XVI, Statgraphics Inc., versión XVI, USA).

Resultados y discusión

Morfología y birrefringencia

La morfología y birrefringencia de la harina nativa de ñame (sin tratamiento) y las modificadas se muestran en la Figura. 1. En todas las muestras se observó como los gránulos de almidón se encontraban atrapados en una estructura fibrosa, fenómeno característico de las harinas. Los gránulos de almidón presentes en la harina de ñame exhibieron una forma ovalada y poligonal, lo que concuerda con las características granulométricas reportadas para harina de ñame (Li *et al.*, 2019; Acevedo *et al.*, 2025).

En los gránulos de almidón nativo, se observaron superficies lisas y regulares. En las harinas modificadas, la mayoría de los gránulos de almidón de ñame conservaron las morfologías observadas en el estado nativo. Sin embargo, después del HMT, mediante horno y autoclave algunos gránulos presentaron superficies irregulares y desintegración parcial, probablemente debido a la lixiviación de amilosa durante el tratamiento hidrotérmico (Zhang *et al.*, 2019). Además, se evidenció que la autoclave indujo la creación de pequeñas agrupaciones de gránulos de almidón con compuestos no amiláceos. Estos



resultados también han sido reportados en gránulos de almidón de harinas de frijol (Li *et al.*, 2024), arroz morado (Chuwech *et al.*, 2023), arroz (Xiang *et al.*, 2023), mijo (Kumar *et al.*, 2023) y cebada (Lv *et al.*, 2022) tras la aplicación de HMT.

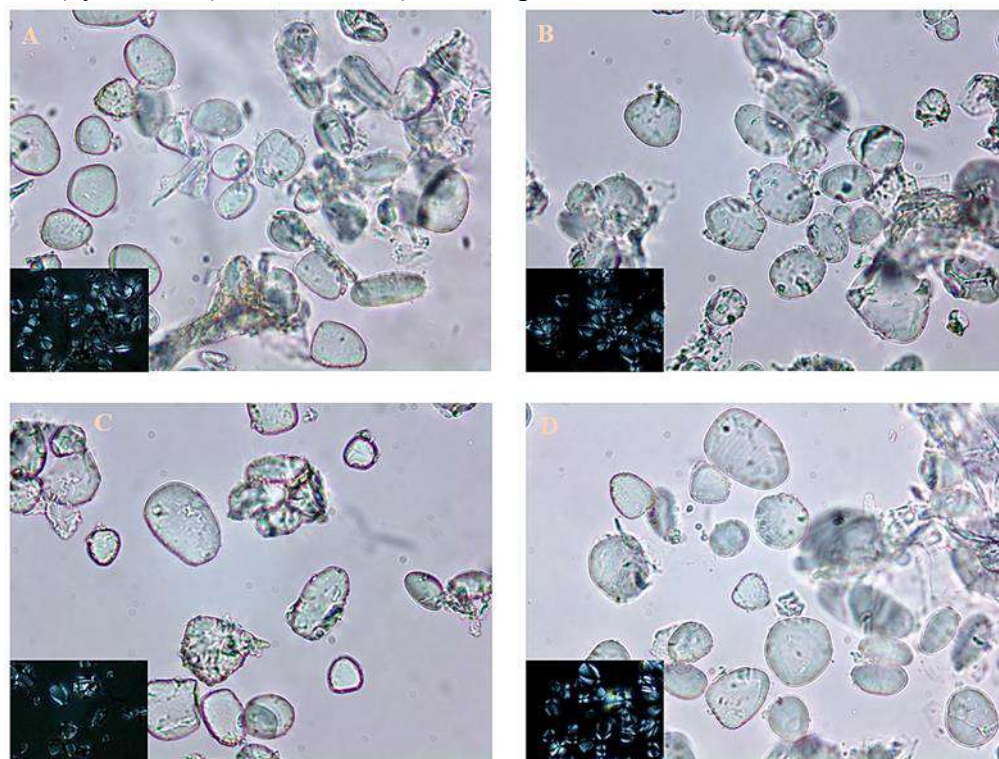


Figura 1. Microfotografías de campo claro y luz polarizada en harina de ñame, en su estado nativo y después de modificada. A, harina nativa de ñame; B, harina modificada en horno; C, harina modificada en autoclave; D, harina modificada en microondas.

Los gránulos de almidón presentes en la harina de ñame exhibieron un comportamiento semicristalino típico de los materiales amiláceos, evidenciándose bajo luz polarizada la formación de la cruz de malta, fenómeno denominado birrefringencia y es un indicador del grado de orden en los gránulos de almidón (Bertoft, 2018). Después del tratamiento en horno, la cruz de malta permaneció visible en la mayoría de los gránulos, lo que sugiere que el HMT en horno promovió principalmente una reorganización molecular sin alterar significativamente la arquitectura radial del gránulo. Las muestras tratadas mediante microondas conservaron una birrefringencia comparable a la observada en la harina nativa, lo que indica que la orientación de las dobles hélices permaneció prácticamente inalterada; mientras que en las muestras tratadas en autoclave se observó una disminución en la intensidad de la birrefringencia y una menor definición de la cruz de malta en algunos



gránulos, indicando una alteración parcial del orden interno, lo cual sugiere que la energía térmica impartida a las cadenas de almidón en el centro del gránulo aumenta su movilidad, lo que resulta en una pérdida de la orientación radial. Hallazgos similares fueron identificados en harinas de ñame, batata, mijo y *maíz* modificadas mediante tratamientos hidrotérmicos (Chung *et al.*, 2009; Kumar *et al.*, 2023; Seña *et al.*, 2024).

Propiedades hidrofílicas

Las propiedades hidrofílicas de la harina nativa de ñame y las modificadas se presentan en la Tabla 1. La CAA y la SAF de las harinas tratadas en horno y autoclave no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) con respecto a la harina nativa; mientras que el tratamiento por microondas redujo la CAA en un 15,67 % y la SAF en 7,50 % en comparación con la muestra nativa, siendo la SAF de la harina tratada por microondas significativamente inferior ($p < 0,05$) al de las harinas tratadas mediante horno y autoclave. No obstante, todos los tratamientos disminuyeron el poder de hinchamiento. Este comportamiento sugiere que el HMT favoreció una reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina, fortaleciendo las interacciones intermoleculares y restringiendo la expansión del gránulo durante la hidratación, siendo estos cambios más pronunciados al emplear como fuentes de calor el horno y la autoclave (Falade *et al.*, 2019; Barua *et al.*, 2022). En harinas de trigo y arroz, tratadas en horno y microondas también se evidenciaron disminuciones del PH y la SAF al ser comparadas con las harinas nativas (Kunyanee *et al.*, 2022; Chuwech *et al.*, 2023; Vicente *et al.*, 2023).

Tabla 1. Propiedades hidrofílicas de harina nativa y modificadas de ñame.

Tratamientos	CAA (%)	SAF (%)	PH (g/g)
Harina-Nativa	169,77 ± 0,34 ^a	5,07 ± 0,33 ^{ab}	3,38 ± 0,02 ^a
Harina-Horno	163,67 ± 5,07 ^a	6,11 ± 0,73 ^a	2,87 ± 0,02 ^c
Harina-Autoclave	164,88 ± 3,58 ^a	6,05 ± 0,24 ^a	3,08 ± 0,03 ^b
Harina-Microondas	143,16 ± 6,28 ^b	4,69 ± 0,38 ^b	2,71 ± 0,01 ^d

Las medias con letra diferente en cada columna son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Propiedades de empastamiento

El mecanismo de transferencia de calor influyó significativamente ($p < 0,05$) en los parámetros de empaste del almidón de la harina de ñame (Tabla 2). Las harinas modificadas mostraron una disminución de las viscosidades máxima, rompimiento y retroceso y un aumento en la temperatura de empastamiento respecto a la harina sin tratar.



Dichos cambios en función del HMT se han atribuido a una disminución en la hinchazón granular y la lixiviación de amilosa y un aumento en las interacciones entre las cadenas de almidón y la rigidez granular (Paternina *et al.*, 2025). Resultados similares se observaron en harinas de arroz, ñame y batata tratadas con HMT (Asranudin *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022; Chuwech *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2024).

Tabla 2. Propiedades de empastamiento de harina nativa y modificadas de ñame

Tratamientos	VM (cP)	VRO (cP)	VRE (cP)	TP (°C)
Harina-Nativa	1343,67 ± 45,61 ^a	1287,67 ± 57,52 ^a	1755,00 ± 45,30 ^a	82,72 ± 0,40 ^c
Harina-Horno	20,79 ± 0,49 ^c	-11,39 ± 0,66 ^c	43,40 ± 1,72 ^c	92,67 ± 0,10 ^a
Harina-Autoclave	17,58 ± 1,56 ^c	-2,77 ± 0,78 ^c	19,51 ± 2,79 ^c	87,57 ± 0,04 ^b
Harina-Microondas	1230,67 ± 39,12 ^b	76,33 ± 9,29 ^b	612,33 ± 39,55 ^b	82,88 ± 0,32 ^c

Las medias con letra diferente en cada columna son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

TP: temperatura de empastamiento, VM: viscosidad máxima, VR: viscosidad de rompimiento, VA: viscosidad de retroceso.

Al comparar las harinas modificadas, se evidenció que las diferencias observadas en las propiedades hidrofílicas estuvieron estrechamente relacionadas con el comportamiento de empaste. Las harinas tratadas mediante horno y autoclave presentaron una reducción drástica de la viscosidad máxima, del rompimiento y del retroceso, acompañada por un incremento significativo en la temperatura de empastamiento (Figura 1). Estos resultados indican que los gránulos adquirieron una estabilidad mejorada bajo cizallamiento y calentamiento prolongado, lo que lleva a la formación de estructuras térmicamente más estables con una menor tendencia a la retrogradación (Schafranski *et al.*, 2021).

Por el contrario, la harina tratada con microondas, bajo las condiciones empleadas, permitió que los gránulos mantuvieran gran parte de su capacidad de gelatinización. Probablemente, el corto tiempo de exposición y el calentamiento volumétrico característico de las microondas no fueron suficientes para favorecer una reorganización extensa de las cadenas de almidón como ocurre durante tratamientos hidrotérmicos más prolongados (Vicente *et al.*, 2026). Estas observaciones coinciden con las microfotografías obtenidas bajo luz polarizada, donde los gránulos conservaron una intensa birrefringencia y escasas alteraciones morfológicas, indicando que bajo las condiciones evaluadas el tratamiento por microondas no generó una reorganización estructural comparable a la obtenida mediante horno o autoclave.



starch blends. Agronomía Colombiana, 41(3).
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v41n3.110111>

Asranudin, Holilah, Syarifin, A. N. K., Purnomo, A. S., Ansharullah, & Fudholi, A. (2021). The effect of heat moisture treatment on crystallinity and physicochemical-digestibility properties of purple yam flour. Food Hydrocolloids, 120. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106889>

Barua, S., Hanewald, A., Bächle, M., Mezger, M., Srivastav, P. P., & Vilgis, T. A. (2022). Insights into the structural, thermal, crystalline and rheological behavior of various hydrothermally modified elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) starch. Food Hydrocolloids, 129. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107672>

Barua, S., Rakshit, M., & Srivastav, P. P. (2021). Optimization and digestogram modeling of hydrothermally modified elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) starch using hot air oven, autoclave, and microwave treatments. LWT, 145, 111283. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111283>

Bertoft, E. (2018). Analyzing Starch Molecular Structure. Starch in Food: Structure, Function and Applications, 97–149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00002-0>

Chung, H. J., Liu, Q., & Hoover, R. (2009). Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. Carbohydrate Polymers, 75(3), 436–447. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2008.08.006>

Chuwech, M., Rakariyatham, N., Tinoi, J., Suwitchayanon, P., & Chandet, N. (2023). Effect of Heat–Moisture Treatment on Crystallinity, Digestibility Properties, Bioactive Compounds, and Antioxidant Activity of Purple Rice (*Oryza sativa* L. indica) Flour. Processes, 11(3). <https://doi.org/10.3390/pr11030969>

Falade, K. O., Ibanga-Bamijoko, B., & Ayetigbo, O. E. (2019). Comparing properties of starch and flour of yellow-flesh cassava cultivars and effects of modifications on properties of their starch. Journal of Food Measurement and Characterization, 13(4), 2581–2593. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00178-5>

Itagi, H. B., Sartagoda, K. J. D., Gupta, N., Pratap, V., Roy, P., Tiozon, R. N., Regina, A., & Sreenivasulu, N. (2023). Enriched nutraceuticals in gluten-free whole grain rice cookies with alternative sweeteners. LWT, 186, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115245>



Khanh, P. N., Phi, N. T. L., Anh, M. N. T., Thuan, C. M., Tien, N. N. T., & Hung, P. Van. (2026). Heat–moisture treatment of rice grains affects starch digestibility and quality of low-gluten cookies made from blended wheat flour and treated rice flours. *Applied Food Research*, 6(1), 101706. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101706>

Kumar, S. R., Tangsrianugul, N., Sriprablom, J., Wongsagonsup, R., Wansuksri, R., & Supphantharika, M. (2023). Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical properties and digestibility of proso millet flour and starch. *Carbohydrate Polymers*, 307, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120630>

Kunyanee, K., & Luangsakul, N. (2022). The impact of heat moisture treatment on the physicochemical properties and in vitro glycemic index of rice flour with different amylose contents and associated effects on rice dumpling quality. *LWT*, 154, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112694>

Lee, I., & Kang, T. (2024). Heat-moisture-treated rice starches with different amylose and moisture contents as stabilizers for nonfat yogurt. *Food Chemistry*, 436, 1. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137746>

Li, L., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). Influence of drying methods on some physicochemical, functional and pasting properties of Chinese yam flour. *LWT*, 111, 182–189. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.05.034>

Li, S., Zhang, L., Sheng, Q., Li, P., Zhao, W., Zhang, A., & Liu, J. (2024). The effect of heat moisture treatment times on physicochemical and digestibility properties of adzuki bean, pea, and white kidney bean flours and starches. *Food Chemistry*, 440, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138228>

Lv, Y., Ma, S., Yan, J., Sun, B., & Wang, X. (2022). Effect of Heat–Moisture Treatment on the Physicochemical Properties, Structure, Morphology, and Starch Digestibility of Highland Barley (*Hordeum vulgare* L. var. nudum Hook. f) Flour. *Foods*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/foods11213511>

Paternina-Contreras, A. L., Andrade-Pizarro, R. D., & Figueroa-Flórez, J. A. (2025). Physical Modification of Starch in Plant-Based Flours: Structural, Physicochemical, and Pasting Property Changes and Potential Applications in Baked and Extruded Products. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 24, Number 3, pp. 1–35). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70184>

Sahoo, M., Titikshya, S., Kumar, V., & Naik, S. N. (2023). Physico-chemical compositions, nutraceutical properties, and starch-related techno-functional, thermal, and morphological



characteristics of underutilized yam flour (*Dioscorea* spp.) from Odisha. Food Bioscience, 56, 103103. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2023.103103>

Schafrański, K., Ito, V. C., & Lacerda, L. G. (2021). Impacts and potential applications: A review of the modification of starches by heat-moisture treatment (HMT). Food Hydrocolloids, 117, 106690. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.106690>

Seña-Rambauth, K., Figueroa-Flórez, J., Hernández-Ruydiaz, J., Salcedo-Mendoza, J., Ortega-Quintana, F., & Hernández-Vanegas, L. (2025). Hydrothermal modification of starch-rich flour blends derived from tubers: Physicochemical and textural impacts on muffin quality. Applied Food Research, 5(2), 101068. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2025.101068>

Seña-Rambauth, K. M., Hernández-Ruydiaz, J. E., Figueroa-Flórez, J. A., Salcedo-Mendoza, J. G., & Ortega-Quintana, F. A. (2024). Evaluation of Proximate, Structural, Morphological, Physicochemical and In Vitro Digestibility Properties of Yam and Sweet Potato Flour Blends. Ciencia Tecnología Agropecuaria, 25(2). https://doi.org/10.21930/rcta.vol25_num2_art:3478

Sun, H., Fan, J., Tian, Z., Ma, L., Meng, Y., Yang, Z., Zeng, X., Liu, X., Kang, L., & Nan, X. (2022). Effects of treatment methods on the formation of resistant starch in purple sweet potato. Food Chemistry, 367, 130580. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.130580>

Vicente, A., Caballero, P. A., Villanueva, M., & Ronda, F. (2026). Advances in microwave-induced physical modification of flours: From structural changes to product development. Food Hydrocolloids, 172, 112026. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2025.112026>

Vicente, A., Villanueva, M., Caballero, P. A., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2023). Buckwheat grains treated with microwave radiation: Impact on the techno-functional, thermal, structural, and rheological properties of flour. Food Hydrocolloids, 137, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108328>

Xiang, G., Li, J., Lin, Q., Zhang, Y., Ding, Y., Guo, X., Pan, Q., Liu, Q., Fu, X., Yang, Y., Han, W., & Fang, Y. (2023). The effect of heat-moisture treatment changed the binding of starch, protein and lipid in rice flour to affect its hierarchical structure and physicochemical properties. Food Chemistry: X, 19. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100785>



Optimización del tiempo de reposo en nixtamalización para preservar compuestos bioactivos y la calidad tecnológica de tortillas de maíz morado (*Zea mays* L.)

**Verónica Virginia Tepixtle-Colohua^{*1}; Leticia García-Cruz²; Alma Leticia Saucedo-
Yáñez³; Benito Reyes-Trejo⁴**

Mesa: Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

La nixtamalización de maíces pigmentados puede disminuir el contenido de compuestos bioactivos debido a la exposición prolongada al medio alcalino durante el reposo del nixtamal. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del tiempo de reposo sobre la conservación de compuestos bioactivos y la calidad tecnológica de tortillas elaboradas con maíz morado (*Zea mays* L.) de Ixtenco, Tlaxcala. Las poblaciones presentaron características físicas adecuadas para la nixtamalización, con índices de flotación entre 96.0 y 99.5 %. El reposo de 2 h permitió obtener tortillas con mayor contenido de fenoles solubles (326.8 mg EAF 100 g⁻¹ ms), antocianinas (46.1 mg ECy 100 g⁻¹ ms) y mayor capacidad antioxidante por FRAP (117.6 µmol ET 100 g⁻¹ ms) y ABTS (57.1 µmol ET 100 g⁻¹ ms) que el reposo de 17 h ($p \leq 0.05$). Aunque el reposo prolongado incrementó la humedad del nixtamal y la pérdida de sólidos, no se observaron diferencias en el rendimiento ni en la resistencia a la ruptura de las tortillas. La reducción del tiempo de reposo constituye una estrategia tecnológica para preservar el valor funcional del maíz morado de Ixtenco, Tlaxcala, sin comprometer la calidad tecnológica de las tortillas, contribuyendo a la valorización de este germoplasma nativo.

Palabras clave: antocianinas; capacidad antioxidante; compuestos fenólicos; nixtamalización; tortillas.

¹Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Texcoco, Edo. De México, México. Tel. 01 (55) 5133-1108 Ext 5760. veronicatepixtle8@gmail.com. ²Laboratorio de Maíz, Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km 13.5 Carretera Los Reyes-Texcoco, Coatlinchán, Estado de México; CP 56250. letygc_1189@hotmail.com. ³Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal (LANISAF), Edif. Efraim Hernández Xolocotx, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México- Texcoco. C.P. 56230. allesaya@yahoo.com. ⁴Laboratorio de Productos Naturales, Área de Química, Departamento de



Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Texcoco, Edo. De México, México. Tel. 01 (55) 5133-1108 Ext 5760. benijovi@yahoo.com.mx.

Abstract

Nixtamalization of pigmented maize may reduce the content of bioactive compounds due to prolonged exposure to the alkaline medium during the steeping stage. The objective of this study was to evaluate the effect of steeping time on the retention of bioactive compounds and the technological quality of tortillas produced from purple maize (*Zea mays* L.) landraces from Ixtenco, Tlaxcala, Mexico. The maize populations exhibited suitable physical characteristics for nixtamalization, with flotation index values ranging from 96.0 to 99.5%. A 2-h steeping time produced tortillas with higher total soluble phenolic content (326.8 mg FAE 100 g⁻¹ DM), anthocyanin content (46.1 mg C3GE 100 g⁻¹ DM), and antioxidant capacity determined by FRAP (117.6 μmol TE 100 g⁻¹ DM) and ABTS (57.1 μmol TE 100 g⁻¹ DM) than the 17-h treatment ($p \leq 0.05$). Although prolonged steeping increased nixtamal moisture and solid losses, it did not affect tortilla yield or breaking strength. Reducing steeping time represents an effective technological strategy to preserve the functional value of purple maize from Ixtenco, Tlaxcala, without compromising tortilla technological quality, thereby contributing to the valorization of this native germplasm and its use in the development of traditional foods with added value.

Keywords: anthocyanins; antioxidant capacity; nixtamalization; phenolic compounds; tortillas.

Introducción

La nixtamalización es un proceso ancestral fundamental para la elaboración de tortillas y otros alimentos derivados del maíz, ya que mejora la calidad nutricional, tecnológica y sensorial del grano mediante cambios físicos, químicos y estructurales inducidos por el tratamiento alcalino (Serna-Saldívar, 2016). Sin embargo, las condiciones del proceso, particularmente el tratamiento alcalino y el tiempo de reposo del nixtamal, pueden favorecer la degradación y pérdida de compuestos bioactivos presentes en maíces pigmentados (Hernández-Martínez et al., 2016; Salinas-Moreno et al., 2017), reduciendo su potencial funcional y antioxidante.

Entre los maíces pigmentados, el maíz morado (*Zea mays* L.) destaca por su elevado contenido de antocianinas y otros compuestos fenólicos (Mendoza-Mendoza et al., 2017; Salinas-Moreno et al., 2021), metabolitos secundarios asociados con una elevada capacidad antioxidante, así como con efectos antiinflamatorios y vasoprotectores (Bhushan et al., 2024; Feregrino-Pérez et al., 2024). Estos compuestos se localizan principalmente en el pericarpio y la capa de aleurona (Petroni et al., 2014), y su concentración depende del genotipo, las



condiciones ambientales y el manejo postcosecha (Petroni et al., 2014; Salinas-Moreno et al., 2021).

Diversos estudios han demostrado que durante la nixtamalización las antocianinas y otros compuestos fenólicos son susceptibles a degradarse por efecto del pH alcalino y la temperatura (Hernández-Martínez et al., 2016; Salinas-Moreno et al., 2017). Además, estos compuestos pueden difundirse hacia el nejayote durante el procesamiento (Salinas-Moreno et al., 2017). Aunque estas pérdidas se atribuyen principalmente a la etapa de cocción, el periodo de reposo constituye una fase crítica, ya que durante este continúa la penetración del hidróxido de calcio y la transferencia de masa desde el pericarpio hacia el medio alcalino, favoreciendo la solubilización y degradación de pigmentos (Hernández-Martínez et al., 2016). En consecuencia, la prolongación del reposo puede disminuir la concentración de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante del producto final (Gaxiola et al., 2025).

A pesar de estos avances, existe información limitada acerca del efecto específico del tiempo de reposo durante la nixtamalización sobre la conservación de compuestos bioactivos y la calidad tecnológica de tortillas elaboradas con maíces morados nativos de México. En regiones como Ixtenco, Tlaxcala, el maíz morado representa un recurso genético y cultural de gran valor; sin embargo, aún es necesario generar información que permita optimizar las condiciones de procesamiento para maximizar la conservación de sus propiedades funcionales sin afectar la calidad del producto final (Gutiérrez-Cortez et al., 2016; Salinas-Moreno et al., 2021).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue caracterizar la calidad física del grano y evaluar el efecto del tiempo de reposo durante la nixtamalización sobre la conservación de compuestos bioactivos, la capacidad antioxidante y la calidad tecnológica de tortillas elaboradas con maíz morado de Ixtenco, Tlaxcala, México.

Materiales y Métodos

Material Vegetal: Se utilizaron cuatro poblaciones de maíz morado (*Zea mays* L.) de la raza Cónico, provenientes de productores del municipio de Ixtenco, Tlaxcala, México, correspondientes a la cosecha otoño 2024. Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Maíz del Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP-CEVAMEX).

La calidad física del grano: La calidad física del grano se evaluó mediante la determinación del contenido de humedad (H), peso hectolítrico (PH), índice de flotación (IF), peso de cien granos (PCG) y composición anatómica del grano, conforme a la Norma Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2020 (Secretaría de Economía, 2022).

La nixtamalización: Se realizó con 200 g de grano utilizando 0.7 % de hidróxido de calcio (Sigma-Aldrich, USA), cocción durante 25 min y dos tiempos de reposo (2 y 17 h).



Posteriormente, el nixtamal se lavó, molió en un molino de piedras volcánicas (ME-25, Arenas, México) y la masa se procesó para elaborar tortillas en una tortilladora mecánica (V-14 CR, Villamex, México). Se determinaron el rendimiento de nixtamal, masa y tortilla, pérdida de sólidos, y humedad, de acuerdo con la metodología descrita por Salinas y Vázquez (2006). La resistencia a la ruptura y la elongación de las tortillas se evaluaron con un texturómetro CT3 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., USA), siguiendo la metodología de Vázquez-Carrillo et al. (2024).

Determinación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante: Los extractos metanólicos de grano y tortilla se obtuvieron utilizando metanol al 80 % acidificado con 1 % de ácido trifluoroacético (Sigma-Aldrich, USA). Todos los análisis se realizaron por triplicado. En los extractos se determinaron los fenoles solubles totales mediante el método de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965), expresando los resultados como mg equivalentes de ácido ferúlico por 100 g de materia seca (mg EAF 100 g⁻¹ ms). El contenido de antocianinas totales se cuantificó por espectrofotometría y se expresó como mg equivalentes de cianidina clorada por 100 g de materia seca (mg ECy 100 g⁻¹ ms). La capacidad antioxidante se evaluó mediante los ensayos ABTS (Re et al., 1999) y FRAP (Benzie y Strain, 1996), utilizando un espectrofotómetro UV-Vis DU530 (Beckman Coulter Inc., USA). Los resultados de ambos ensayos se expresaron como μmol equivalentes de Trolox por 100 g de materia seca ($\mu\text{mol ET 100 g}^{-1}$ ms).

Análisis estadístico: El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×4 , donde los factores fueron el tiempo de reposo del nixtamal (2 y 17 h) y el genotipo (cuatro poblaciones de maíz morado). Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Resultados y discusión

Características físicas del grano

Las cuatro poblaciones de maíz morado presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en sus características físicas (Cuadro 1). El contenido de humedad osciló entre 10.1 y 12.6 %, el peso hectolítrico (PH) entre 63.6 y 70.5 kg hL⁻¹, y el índice de flotación (IF) entre 96 y 99.5 %, valores que corresponden a granos de endospermo predominantemente suave y se encuentran dentro de los intervalos establecidos para maíces destinados al proceso de nixtamalización (Secretaría de Economía, 2022). Asimismo, se observaron diferencias en el peso de cien granos (PCG) y en la composición anatómica, reflejando la variabilidad genética característica de los maíces nativos. Estas propiedades influyen en la absorción de agua, la transferencia de masa y el comportamiento del grano durante la nixtamalización (Salinas-



Moreno et al., 2021). Esta variabilidad representa un recurso importante para el aprovechamiento de maíces pigmentados, ya que el genotipo es uno de los principales factores que determina el contenido de compuestos fenólicos y la calidad del producto final (Petroni et al., 2014).

Cuadro 1. Características físicas del maíz morado (*Zea mays* L.) cultivado en Ixtenco, Tlaxcala.

Muestra	H (%)	PH (kg hL ⁻¹)	PCG (g)	IF (%)
IXTM1	10.15 ^d	66.72 ^b	35.46 ^c	99.00 ^a
IXTM2	12.23 ^c	69.96 ^a	42.77 ^a	96.00 ^b
IXTM3	12.65 ^a	63.62 ^c	35.93 ^c	99.50 ^a
IXTM4	10.45 ^d	70.50 ^a	39.78 ^b	97.75 ^{ab}

H: humedad; PH: peso hectolítrico; PCG: peso de cien granos; IF: índice de flotación. Medias con distinta letra en la misma fila indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Efecto del tiempo de reposo sobre los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante

El tiempo de reposo durante la nixtamalización afectó significativamente ($p \leq 0.05$) la conservación de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante de las tortillas de maíz morado (Cuadro 2). Las tortillas elaboradas con 2 h de reposo presentaron mayores contenidos de fenoles solubles totales (326.8 mg EAF 100 g⁻¹ ms), antocianinas (46.1 mg ECy 100 g⁻¹ ms) y mayor capacidad antioxidante determinada por FRAP (117.6 μmol ET 100 g⁻¹ ms) y ABTS (57.1 μmol ET 100 g⁻¹ ms) respecto al tratamiento de 17 h.

Cuadro 2. Contenido de compuestos bioactivos en tortillas de maíz morado (*Zea mays* L.).

Factor	Fenoles solubles totales	Antocianinas totales	FRAP	ABTS
Reposo				
2h	326.8 ^a	46.1 ^a	117.6 ^a	57.1 ^a
17h	234.6 ^b	34.8 ^b	76.4 ^b	45.7 ^b
Tortilla				
IXTM1	283.1 ^c	48.9 ^a	121.5 ^a	72.2 ^a
IXTM2	202.2 ^d	35.2 ^d	60.1 ^c	40.2 ^d
IXTM3	397.3 ^a	48.4 ^b	114.0 ^b	56.2 ^b
IXTM4	295.4 ^b	38.7 ^c	114.6 ^b	48.7 ^c

Medias que no comparten la misma letra entre columnas son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).



- Bhushan, B., Kumar, S., Kaur, C., Devi, V., Chaudhary, D. P., Singh, A., Dagla, M. C., Karjagi, C. G., Saleena, L. A. K., Chandran, D., & Kumar, M. (2024). Beyond colors: The health benefits of maize anthocyanins. *Applied Food Research*, 4(1), 100399. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100399>
- Feregrino-Pérez, A. A., Mercado-Luna, A., Murillo-Cárdenas, C. A., González-Santos, R., Chávez-Servín, J. L., Vargas-Madriz, A. F., & Luna-Sánchez, E. (2024). Polyphenolic compounds and antioxidant capacity in native maize of the Sierra Gorda of Querétaro. *Agronomy*, 14(1), 142. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010142>
- Gaxiola, A. H. A., Moreno, C. R., Edeza, M. J., Rodríguez, E. O. C., & Rochín, S. M. (2025). Efecto del proceso de nixtamalización tradicional y extrusión sobre la bioaccesibilidad y actividad antioxidante de compuestos fenólicos de tortillas de maíz azul durante la fermentación *in vitro* por la microbiota colónica humana. *Biotechnia*, 27, 1–11. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v27.2520>
- Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Zambrano-Zaragoza, M. L., Espinosa-Arbeláez, D. G., Rojas, A., García, J. C., Cornejo-Villegas, M. A., & Rodríguez-García, M. E. (2016). The mass transport phenomenon through pericarp during the nixtamalization process. *Food and Bioprocess Processing*, 100, 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.09.008>
- Hernández-Martínez, V., Salinas-Moreno, Y., Ramírez-Díaz, J. L., Vázquez-Carrillo, G., Domínguez-López, A., & Ramírez-Romero, A. G. (2016). Color, phenolic composition and antioxidant activity of blue tortillas from Mexican maize races. *CyTA – Journal of Food*, 14(3), 473–481. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1136842>
- Mendoza-Mendoza, C. G., del Carmen Mendoza-Castillo, M., Delgado-Alvarado, A., Castillo-González, F., Kato-Yamakake, T. Á., & Cruz-Izquierdo, S. (2017). Antocianinas totales y parámetros de color en líneas de maíz morado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(4), 471–479. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.4.471-479>
- Petroni, K., Pili, R., & Tonelli, C. (2014). Anthocyanins in corn: A wealth of genes for human health. *Planta*, 240(5), 901–911. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2131-1>
- 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](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- RStudio Team. (2022). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (Versión 2022.12.0+353). Posit Software. <https://dailies.rstudio.com/version/2022.12.0+353/>
- Salinas, Y., & Vázquez, G. (2006). *Metodologías de análisis de la calidad nixtamalera-tortillera en maíz* (Folleto Técnico No. 23). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Salinas-Moreno, Y., Hernández-Martínez, V., Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Díaz, J. L., & Iñiguez-Gómez, O. (2017). Composición nutricional y de compuestos bioactivos en



- tortillas de poblaciones nativas de maíz con grano azul/morado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1483–1496. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.525>
- Salinas-Moreno, Y., Jaime-Fonseca, M. R., Díaz-Ramírez, J. L., & Alemán-de la Torre, I. (2017). Factors influencing anthocyanin loss during nixtamalization of blue purple maize grain. *Journal of Food Science and Technology*, 54(13), 4493–4500. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2932-x>
- Salinas-Moreno, Y., Esquivel-Esquivel, G., Ramírez-Díaz, J. L., Alemán-de la Torre, I., Bautista-Ramírez, E., & Santillán-Fernández, A. (2021). Selección de germoplasma de maíz morado (*Zea mays* L.) con potencial para extracción de pigmentos. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 44(3), 309–321. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.3.309>
- Secretaría de Economía. (2022). *NMX-FF-034/1-SCFI-2020*. Productos alimenticios para uso humano no industrializados. Cereales. Maíz. Parte 1: Granos para tortillas y productos nixtamalizados. Especificaciones y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación.
- Serna-Saldívar, S. O. (2016). *Cereal grains: Properties, processing, and nutritional attributes* (2nd ed.). CRC Press.
- 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. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Vázquez-Carrillo, M. G., Hernández-Montes, A., Palacios-Rojas, N., García-Cruz, L., Rosales-Nolasco, A., Molina, A., & Palacios-Pola, G. (2024). Comparing traditional and commercial nixtamalization of three maize landraces: Impact on pozole quality and consumer acceptance. *Journal of Ethnic Foods*, 11, Article 11. <https://doi.org/10.1186/s42779-024-00227-5>



Desarrollo de un MOF luminiscente de terbio para la detección selectiva de glifosato en agua

Helen Paola Toledo Jaldin¹, José Isaac Cerón Ramírez², Luis David Rosales Vázquez³,
Alejandro Dorazco González²

Mesa: Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

El uso extensivo de plaguicidas ha contribuido significativamente al incremento de la productividad agrícola; sin embargo, su presencia en cuerpos de agua representa un riesgo para los ecosistemas y la salud humana. Entre ellos, el glifosato destaca por su amplia utilización y su frecuente detección en matrices ambientales. En este trabajo se desarrolló una nueva red metal-orgánica basada en ácido piromelítico y terbio para la detección selectiva de glifosato en solución. El material fue sintetizado mediante el método solvotermal y caracterizado mediante difracción de rayos X de monocristal, microscopía electrónica de barrido y espectroscopía infrarroja, lo que confirmó la formación de una estructura cristalina previamente no reportada para la relación ligante-metal empleada. La capacidad de detección se evaluó mediante espectroscopía de luminiscencia en una mezcla agua-etanol (20:80), observándose una disminución progresiva de la emisión característica del terbio a 545 nm a medida que aumentaba la concentración de glifosato. El material presentó una constante de Stern-Volmer de $3.80 \times 10^4 \text{ M}^{-1}$ y un límite de detección de 0.147 mg/L, lo que evidencia una alta sensibilidad. Estudios complementarios sugieren que el glifosato interactúa directamente con el terbio, lo que favorece la desestabilización de la estructura. Los

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



resultados demuestran el potencial de este material como plataforma para el monitoreo ambiental rápido y selectivo de glifosato.

Palabras clave: Herbicida glifosato, redes metal-orgánicas, MOF luminiscente, detección de contaminantes, mecanismo de detección.

¹ Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango - La Marquesa Km. 22, Santiago Tilapa, 52650, Tianguistenco, Estado de México, helen_mecanica@test.edu.mx

² Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n Circuito de la Investigación Científica, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, 316009241@quimica.unam.mx, adg@unam.mx

³ Universidad Politécnica del Valle de Toluca, Carretera Toluca-Almoloya de Juárez Km. 5.6, Santiaguito Tlalcilcali, 50900, Almoloya de Juárez, Estado de México, ld_222@hotmail.com



Abstract

The extensive use of pesticides has significantly contributed to increasing agricultural productivity; however, their presence in water bodies poses a risk to ecosystems and human health. Among these compounds, glyphosate stands out due to its widespread use and frequent detection in environmental matrices. In this work, a novel terbium-based metal-organic framework constructed from pyromellitic acid was developed for the selective detection of glyphosate in solution. The material was synthesized using a solvothermal method and characterized by single-crystal X-ray diffraction, powder X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and infrared spectroscopy, confirming the formation of a crystalline structure that has not previously been reported for the ligand-to-metal ratio employed. The sensing performance was evaluated by luminescence spectroscopy in an ethanol-water mixture (20:80), where a progressive decrease in the characteristic terbium emission at 545 nm was observed as the glyphosate concentration increased. The material exhibited a Stern–Volmer constant of $3.80 \times 10^4 \text{ M}^{-1}$ and a detection limit of 0.147 mg/L, demonstrating high sensitivity. Complementary studies suggest that glyphosate interacts directly with terbium and promotes structural destabilization of the framework. These results highlight the potential of this material as a platform for rapid, selective environmental monitoring of glyphosate.

Keywords: Glyphosate herbicide, metal-organic frameworks, luminescent MOF, contaminant detection, detection mechanism.

Introducción

El incremento proyectado de la población mundial y la creciente demanda de alimentos han impulsado el uso intensivo de pesticidas en la agricultura (FAO, 2025). Entre estos compuestos, los organofosforados representan una de las categorías más utilizadas debido a su eficacia en el control de malezas y plagas (Kumar et al., 2021). Dentro de este grupo, el glifosato destaca como el herbicida más empleado a nivel global, especialmente en cultivos de maíz, soya y algodón (de Araujo et al., 2023). No obstante, diversos estudios han documentado su persistencia ambiental y sus posibles efectos tóxicos sobre la salud humana y los ecosistemas, incluyendo daños renales, alteraciones neurológicas y riesgos para organismos acuáticos y terrestres (Rawat et al., 2023). Debido a ello, la detección rápida y



confiable de glifosato en cuerpos de agua se ha convertido en una necesidad prioritaria para el monitoreo ambiental y la protección de la salud pública.

Las técnicas convencionales para la determinación de glifosato, como la cromatografía líquida de ultra alta resolución, la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas y la espectrofotometría UV-Vis, presentan ventajas analíticas importantes, pero también limitaciones asociadas con altos costos operativos, requerimientos de personal especializado y escasa aplicabilidad para análisis in situ (He et al., 2019; Arkan, Csámpai and Molnár-Perl, 2016; Waiman et al., 2012). En respuesta a estas limitaciones, los sensores luminiscentes basados en redes metal-orgánicas (L-MOFs) han emergido como una alternativa prometedora debido a su alta sensibilidad, rápida respuesta y facilidad de implementación (Cui et al., 2012; Manna et al., 2025).

Los L-MOFs son materiales inteligentes capaces de modificar su respuesta luminiscente ante diferentes estímulos externos. Esta respuesta puede manifestarse como un aumento de la intensidad de emisión (*turn-on*) o como su disminución o apagamiento (*turn-off*). Los estímulos pueden ser de naturaleza física, como cambios de temperatura, o química, mediante interacciones con determinadas especies o reacciones en el entorno del material. En aplicaciones de detección de plaguicidas, el analito interactúa con la estructura del MOF, sus centros metálicos o sus ligandos orgánicos (Figura 1), lo que provoca cambios en los procesos de transferencia de energía y, en consecuencia, en la intensidad de la luminiscencia. Esta variación puede emplearse como señal analítica para identificar y cuantificar el contaminante.

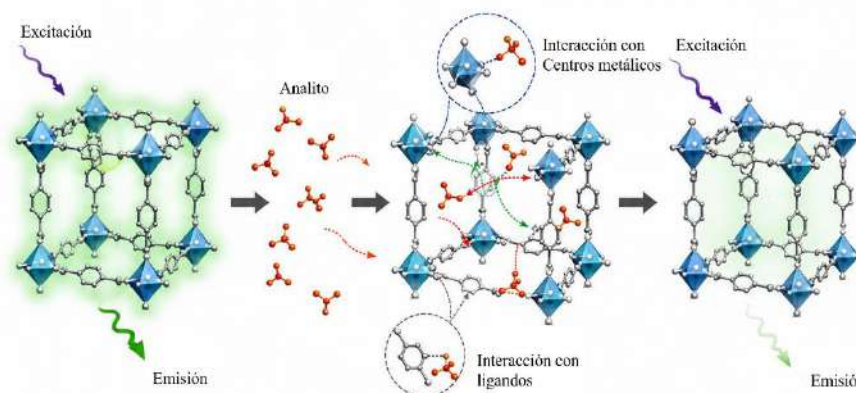


Figura 1. Representación esquemática del mecanismo de detección de plaguicidas mediante un MOF luminiscente (L-MOF)



El estado del arte reporta diversos L-MOFs empleados para la detección de glifosato. En un estudio se desarrolló el MOF $\text{NH}_2\text{-MIL-88B(Fe)}$, mediante un método hidrotermal, formado por ácido 2-aminotereftálico y centros de Fe^{3+} con baja luminiscencia debido a un proceso de transferencia electrónica fotoinducida (PET) desde el ligante hacia los iones Fe^{3+} . En presencia de glifosato, su grupo fosfato compite con los grupos carboxilato del ligante por la coordinación al hierro, debilitando la interacción ligante-metal. Como consecuencia, disminuye el PET y se recupera la emisión del ligante a 450 nm (Adusumalli et al., 2023).

En otro trabajo se desarrolló el MOF de hierro amino-funcionalizado con rodamina B incorporada ($\text{NH}_2\text{-MIL-88(Fe)@RhBun}$), enlazado con Cu^{2+} , para la detección rápida de glifosato. En presencia de Cu^{2+} , las interacciones de Lewis provocaron el apagamiento de la señal de fluorescencia. Cuando se añadió glifosato, la señal volvió a encenderse debido a la quelación con Cu^{2+} y a las interacciones por puente de hidrógeno con $\text{NH}_2\text{-MIL-88(Fe)@RhB}$ (Wan et al., 2022).

Un MOF de Cd(II) , ácido 2-amino-1,4-bencenodicarboxílico y 4,4'-azopiridina ($\text{Cd}(\text{NH}_2\text{-bdc})(\text{azp})\cdot\text{DMF}$) como sensor fluorescente en estado apagado mediante un proceso PET. La estructura cristalina presenta una red tridimensional porosa doblemente interpenetrada, con canales unidimensionales decorados con grupos amino y azo. El MOF presenta una detección fluorescente visual tipo “turn-on” selectiva y sensible para glifosato. El mecanismo de aumento de la fluorescencia se asocia con la inhibición del proceso PET, inducida por la disociación de la estructura en presencia del analito (Wiwasuku et al., 2021).

En un estudio se sintetizó un MOF fluorescente de zirconio con ligantes mixtos de ácido tetrakis(4-carboxifenil)porfirina (TCPP) y ácido 2-aminotereftálico ($\text{NH}_2\text{-BDC}$) que permitió un cambio de color visible de rosa a azul. En este caso se soportó el material en una plataforma portátil para la detección rápida de glifosato (Lu et al., 2025).

En otro trabajo se preparó una tira de prueba de fluorescencia acoplada a un MOF de bismuto funcionalizado con grupos amino ($\text{NH}_2\text{-Bi-MOF}$), enlazado con iones Cu^{2+} , para la visualización y determinación rápida de glifosato. El $\text{NH}_2\text{-Bi-MOF}$ presentó excelentes propiedades fluorescentes, mientras que el ión cobre, actuando como ácido de Lewis, se utilizó como agente apagador de la fluorescencia, constituyendo una plataforma prometedora para la detección rápida in situ de glifosato (Wan et al., 2023).

Sin embargo, muchos de estos materiales presentan limitaciones en cuanto a su estabilidad en medios acuosos o requieren etapas adicionales de funcionalización posteriores a la síntesis. En este contexto, los MOFs basados en lantánidos constituyen una alternativa atractiva debido a su luminiscencia intrínseca y potencial estabilidad en agua. De hecho, hasta



estiramiento O–H, que es muy intensa. Esto se debe a que el agua coordinada y no coordinada tiene un mayor acoplamiento vibracional. El grupo carboxilo muestra dos frecuencias de estiramiento asimétricas cerca de 1618 cm^{-1} (Ju et al., 2018). El pico en 1577 cm^{-1} se asigna a la reacción posterior con Tb^{3+} . El pico de vibración de estiramiento de $-\text{COO}-$ en el ligando se desplaza en aproximadamente $100\text{--}150\text{ cm}^{-1}$, lo que sugiere que los iones Tb^{3+} se coordinan exitosamente con el ligando. La señal en 1380 cm^{-1} indica la vibración $\text{C}=\text{C}$ (Li et al., 2022). Además, el pico de $\text{Tb}-\text{O}-\text{C}$ a 516 cm^{-1} indica la interacción entre el ligando y el ión metálico.

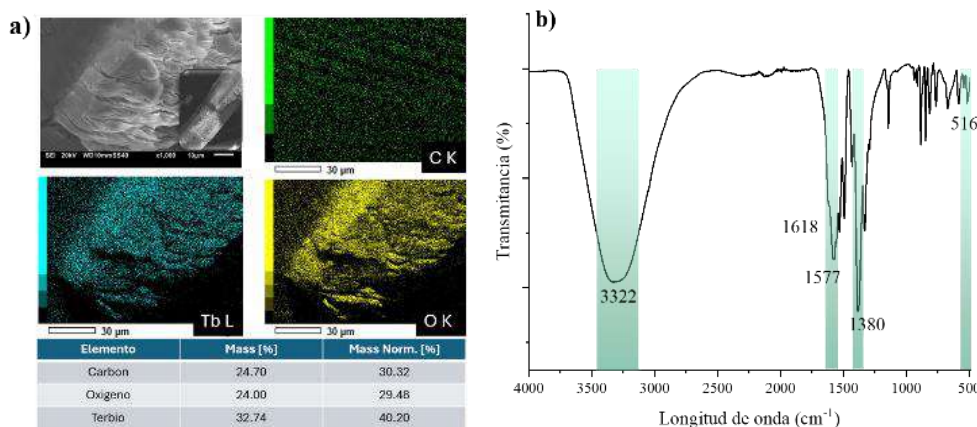


Figura 4. Microscopía MEB de cristales del TbMOF_{34} (a), intensidad de espectro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) del MOF (b)

Al determinar la sensibilidad del material TbMOF_{34} se estableció que el glifosato, que es una molécula orgánica polifuncional perteneciente a la familia de los aminofosfonatos, que contiene grupos amino, carboxilo y fosfonato, es la molécula que genera una respuesta más intensa del material TbMOF_{34} (Figura 5a). Esta respuesta genera un apagamiento de la intensidad de las señales características a medida que la concentración del glifosato se incrementa (Figura 5b)



TbMOF₃₄ Et/H₂O 0.24 -

Conclusiones

En este trabajo se sintetizó y caracterizó exitosamente el material luminiscente TbMOF₃₄, cuya estructura bidimensional basada en centros Tb(III) y ligandos btac⁴⁻ mostró una organización cristalina bien definida y una eficiente transferencia de energía hacia los centros metálicos, evidenciada por las emisiones características del ión Tb³⁺. Los resultados estructurales y espectroscópicos confirmaron la formación del marco metal-orgánico y la coordinación efectiva entre los iones de terbio y el ligando orgánico.

La evaluación de la respuesta sensora demostró que TbMOF₃₄ presenta una elevada selectividad hacia el glifosato frente a otros plaguicidas evaluados, generando un proceso de apagamiento luminiscente dependiente de la concentración del analito. El límite de detección alcanzado confirma el potencial del material para la determinación rápida de glifosato en concentraciones de interés ambiental, situándolo dentro del rango reportado para materiales luminiscentes similares.

Los cambios observados en la emisión sugieren que el mecanismo de detección está asociado a una interacción fuerte entre el glifosato y los centros metálicos, capaz de alterar la estructura del material mediante la formación de complejos más estables con el analito. Este comportamiento, aunque implica la naturaleza no regenerable del sensor, proporciona una respuesta clara y fácilmente identificable, favoreciendo su aplicación como sistema de detección de un solo uso.

Como perspectivas futuras, resulta de interés profundizar en la elucidación del mecanismo de reconocimiento mediante técnicas complementarias que permitan evaluar los cambios estructurales inducidos por el glifosato. Asimismo, la aplicación del material en muestras ambientales reales y el desarrollo de plataformas de detección portátiles podrían ampliar el alcance práctico de TbMOF₃₄ como sensor luminiscente para el monitoreo de contaminantes organofosfonados.

Literatura citada

Adusumalli, V.N.K.B., Gupta, A., Lee, S. Y., and Park, Y. I. (2023). Ligand emission-based turn-on sensing of glyphosate via competitive coordination with NH₂-MIL-88B (Fe) MOF nanocrystals. *ACS Applied Nano Materials*, 6(22), 21016–21026.



- Arkan, T., Csámpai, A., and Molnár-Perl, I. (2016). Alkylsilyl derivatization of glyphosate and aminomethylphosphonic acid followed by gas chromatography mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 125, 219–223.
- Cui, Y., Yue, Y., Qian, G., and Chen, B. (2012). Luminescent functional metal–organic frameworks. *Chemical reviews*, 112(2), 1126–1162.
- de Araujo, L.G., Zordan, D. F., Celzard, A., and Fierro, V. (2023). Glyphosate uses, adverse effects and alternatives: focus on the current scenario in Brazil. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(12), 9559–9582.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2009) *Cómo alimentar al mundo en 2050*. Roma: FAO. Disponible en: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/synthesis_papers/C%C3%B3mo_a_limantar_al_mundo_en_2050.pdf (Accedido: 14 junio 2026).
- He, S., Cao, X., Wu, H., Li, T., Zhang, M., Liang, Y., and Chen, B. (2019). Rapid determination of glyphosate, aminomethyl phosphonic acid, glufosinate, and ethephon residues in environmental water by direct injection-ultra performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry. *Se pu= Chinese Journal of Chromatography*, 37(11), 1179–1184.
- Ju, P., Zhang, E., Jiang, L., Zhang, Z., Hou, X., Zhang, Y., Yang, H., and Wang, J. (2018). A novel microporous Tb-MOF fluorescent sensor for highly selective and sensitive detection of picric acid. *RSC advances*, 8(39), 21671–21678.
- Kumar, M., Yadav, A. N., Saxena, R., Paul, D., and Tomar, R. S. (2021). Biodiversity of pesticides degrading microbial communities and their environmental impact. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 31, 101883.
- Li, Y., Wu, S., Zhang, Y., Ma, Z., Zhu, M., and Gao, E. (2021). A lanthanide metal–organic framework as ratio fluorescence probe to detect pesticides in water. *Inorganica Chimica Acta*, 528, 120632.
- Li, J., Yu, B., Fan, L., Wang, L., Zhao, Y., Sun, C., Li, W., and Chang, Z. (2022). A novel multifunctional Tb-MOF fluorescent probe displaying excellent abilities for highly selective detection of Fe^{3+} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ and acetylacetone. *Journal of Solid State Chemistry*, 306, 122782.
- Lu, Z., Liu, X., Zhu, X., Lu, H., Ma, Y., Zhang, B., Huang, S., Xi, M., Hu, G., and Yu, Y. (2025). Rational design of mixed-ligand metal–organic framework with dual emission



- signals for real-time visual detection and efficient adsorption of glyphosate in water. *Journal of Hazardous Materials*, 494, 138683.
- Manna, A. S., Ghosh, S., Ghosh, T., Karchaudhuri, N., Das, S., Roy, A., and Maiti, D. K. (2025). Smart luminescent materials for emerging sensors: Fundamentals and advances. *Chemistry–An Asian Journal*, 20(6), e202401328.
- Pinzón, C., Toledo Jaldin, H.P., Rosales, L.D., León, J.P., Blanco Flores, A., Martínez, D., Canseco, D., Dorazco, A. (2025). New Eu (III) pyromellitic metal-organic framework with intense red phosphorescence for sensing of pesticides with selectivity to methylparathion in aqueous media. Crystal structure and spectroscopic studies. *Journal of Molecular Structure*, 143940.
- Rawat, D., Bains, A., Chawla, P., Kaushik, R., Yadav, R., Kumar, A., Sridhar, K., and Sharma, M. (2023). Hazardous impacts of glyphosate on human and environment health: Occurrence and detection in food. *Chemosphere*, 329, 138676.
- Waiman, C. V., Avena, M. J., Garrido, M., Band, B. F., and Zanini, G. P. (2012) A simple and rapid spectrophotometric method to quantify the herbicide glyphosate in aqueous media. Application to adsorption isotherms on soils and goethite. *Geoderma*, 170, 154–158.
- Wan, C. Q., Pang, Y. H., Feng, Y. W., and Shen, X. F. (2022). A ratio fluorescence sensor based on rhodamine B embedded metal-organic framework for glyphosate detection in agri-food products. *Food Chemistry*, 394, 133446.
- Wan, C. Q., Pang, Y. H., Zhai, Y. S., and Shen, X. F. (2023). Ratio fluorescence test strip visualized by amino-functionalized metal-organic framework for rapid sensing of glyphosate. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 297, 122673.
- Wiwasuku, T., Boonmak, J., Burakham, R., Hadsadee, S., Jungsuttiwong, S., Bureekaew, S., Promarak, V., Youngmea, S. (2021). Turn-on fluorescent probe towards glyphosate and Cr³⁺ based on Cd(II)-metal organic framework with Lewis basic sites. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 8(4), 977–988.
- Yi, L., Wu, S., Ren, G., Zhou, Q., Li, P., Wang, Y., Tian, X., He, D., and Pan, Q. (2025). Glyphosate detection based on Eu coordination polymer through competitive coordination. *Food chemistry*, 463, 141554.

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Yu, L., Yang, Y., Wang, C., Cuiyu, H., He, X., Chen, L., and Zhang, Y. (2026). In-situ grown dual lanthanide metal-organic framework electrospinning nanofiber film for the ratiometric fluorescent sensing of glyphosate in foods. *Food chemistry*, 512, 148989.



Efecto del método de secado en la preservación y caracterización de las capacidades antioxidantes de hongos silvestres comestibles

Gabriela Salazar-Cervantes¹, Diana Guerra Ramírez¹, Fabiola A. López Huerta¹ y Salvador Valle Guadarrama²

Mesa: Nuevas perspectivas de Química: de lo molecular a lo global

Resumen

Los hongos comestibles son alimentos susceptibles de un rápido deterioro, por lo que es necesario someterlos a procedimientos de conservación. El secado por convección y el liofilizado son dos de los medios más utilizados para preservar sus características y propiedades. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de estos métodos en la conservación, extracción y caracterización de las propiedades antioxidantes de hongos silvestres comestibles de Puebla, México.

Se colectaron nueve especies de hongos. Cada especie se separó en dos grupos para su deshidratación mediante convección y liofilización. Del material seco se obtuvieron los extractos para evaluar su capacidad antioxidante mediante los ensayos in vitro de Folin Ciocalteu, FRAP y ABTS, se realizó el tratamiento estadístico de los datos para su análisis de varianza y significancia de los resultados.

Se observó que, aunque los hongos liofilizados conservaron en gran medida su apariencia original, la capacidad antioxidante de sus extractos fue menor en siete de las nueve especies estudiadas. Se reporta que el tratamiento de secado al que se sometieron los hongos afectó los resultados de la caracterización antioxidante de estas especies.

Palabras clave: hongos silvestres comestibles, convección, liofilizado, antioxidantes

¹Laboratorio de Productos Naturales, Área de Química, Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Texcoco, Edo. de México, México. gsalazarc@chapingo.mx, dguerrar@chapingo.mx

²Laboratorio de atmósferas controladas, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Texcoco, Edo. de México, México.



Abstract

Due the edible mushrooms are extremely perishable foods, preservation methods are necessary. Convection drying (HD) and freeze-drying (FD or VFD) are two of the most common techniques used to maintain their properties and characteristics. This study aimed to analyze the effect of these methods on the preservation, extraction, and characterization of the antioxidant properties of wild edible mushrooms collected in Puebla, Mexico.

Nine mushroom species were collected and divided into two groups for dehydration by convection drying and by freeze-drying. Extracts were obtained from the dried material and were subjected to in vitro assays to evaluate antioxidant capacity using Folin-Ciocalteu, FRAP, and ABTS assays; statistical analysis was done to assess variance and the significance of the results.

Although freeze-dried mushrooms largely retained their original appearance, the antioxidant capacity of their extracts was lower in seven of the nine species studied. The study concludes that the drying treatment applied to the mushrooms influences the antioxidant characterization of these species.

Keywords: wild edible mushrooms, convection drying, freeze-drying, antioxidants.

Introducción

En los últimos años, los hongos comestibles han despertado especial interés debido a múltiples propiedades beneficiosas que se han descubierto.

En el aspecto nutricional, se consideran alimentos de alto valor proteico (Elnahas et al., 2024), que contienen vitaminas y minerales que difícilmente se encuentran en vegetales o animales. El contenido de fibra, betaglucanos y aminoácidos esenciales es significativo. Se caracterizan por ser una fuente rica en antioxidantes naturales.

Se han reportado diversas actividades biológicas de los extractos de hongos, entre las que destacan las antiinflamatorias, antidepresivas, antioxidantes y anticancerígenas, así como su efecto en diversos padecimientos degenerativos. (Ec et al., 2011; Sharma et al., 2024; Suleiman et al., 2022; Xie et al., 2022; Yahia et al., 2017).

En la determinación de las propiedades nutraceuticas de los alimentos, es fundamental analizar la presencia de compuestos antioxidantes. Estos inhiben o retrasan el daño oxidativo a una molécula. El metabolismo celular produce sustancias oxidantes, como radicales libres, especies reactivas de oxígeno y/o nitrógeno. El cuerpo humano activa mecanismos antioxidantes para



de plantas medicinales y alimentos (Pinela et al., 2011), aunque requiere una elevada inversión en equipo.

En el estudio de plantas, se ha encontrado que la liofilización mantiene concentraciones significativamente más altas de antioxidantes y de diversos compuestos, como azúcares, clorofilas, vitaminas y compuestos fenólicos. Además, la sublimación del agua que ocurre durante el proceso permite obtener un producto deshidratado con baja densidad y un daño estructural mínimo (Guclu et al., 2022).

Diversas investigaciones han demostrado que el proceso de deshidratación influye en la capacidad antioxidante observada en los vegetales; en este proceso deben considerarse la temperatura, la técnica empleada y el tipo de vegetal en estudio. Los métodos a bajas temperaturas y/o rápidos, como la liofilización o el secado por microondas, retienen mejor la estructura y propiedades antioxidantes de los compuestos fenólicos. Los tratamientos prolongados y a alta temperatura (60° a 80°) provocan la pérdida progresiva de la capacidad antioxidante, como resultado de la degradación de los compuestos expuestos al calor y al oxígeno.

Hongos silvestres comestibles en México

Se estima que en la República Mexicana hay cerca de 500 especies silvestres comestibles (Bautista-Bautista et al., 2024; de la Fuente et al., 2024), aunque el número de especies identificadas y caracterizadas sistemáticamente es muy bajo.

La comercialización de hongos silvestres comestibles representa una importante fuente de ingresos para las familias, especialmente en la temporada de lluvias, en zonas boscosas y rurales, muchas de ellas de escasos recursos. Los hongos se consideran un recurso forestal no maderable que indudablemente aporta beneficios importantes a la población, por lo que es necesario implementar técnicas y metodologías de conservación del producto más allá de la temporada anual. Aunque se considera que el liofilizado es una técnica que permite conservar mejor las propiedades de los alimentos, el equipo es costoso.

Este trabajo analiza la influencia de diversos métodos de secado en el proceso de preservación y de caracterización antioxidante de los hongos silvestres comestibles que crecen en el territorio nacional y sobre los que se han realizado pocos estudios.

Materiales y métodos

Los hongos silvestres comestibles se adquirieron en el mercado de Zaragoza, Puebla (N 19° 46' 20261'', O 97°32'59.925''). Se seleccionaron nueve especies, las más abundantes y aquellas que los vendedores mencionaron como las de mayor preferencia entre los consumidores, todas fueron



colectadas en el municipio de Zaragoza. El material de estudio se trasladó al laboratorio de Productos Naturales de la Universidad Autónoma Chapingo e inmediatamente se le retiró manualmente cualquier resto de tierra u otro material vegetal. Cada especie se dividió en dos grupos (1 y 2), de 150 gramos. Los grupos 1 se llevaron a congelación.

Métodos de secado

Los grupos marcados como grupo 2 de cada especie se colocaron en un horno de convección forzada, marca SEDONA (SD-P9000, E.E.U.U), con flujo de aire a 50 °C; los grupos 2,

congelados de cada especie, se colocaron en una liofilizadora marca LABCONCO. Los materiales en procesamiento se mantuvieron bajo observación y el secado se detuvo cuando las muestras alcanzaron un peso constante. El material seco y pulverizado se etiquetó y almacenó en un lugar fresco y seco para su posterior análisis, se registraron las observaciones de cada material obtenido.

Reactivos y disolventes

Todas las sustancias fueron adquiridas con pureza de grado analítico de las marcas Sigma-Aldrich y Meyer Lab.

Obtención de los extractos

Para la obtención de extractos se siguió la metodología reportada por Hernández-Rodríguez (Guerra-Ramírez et al., 2019). 500 mg de cada especie se mezclaron con 10 mL de metanol al 80 % (metanol: agua, 80:20), la mezcla se agitó por 60 segundos y se acidificó hasta obtener un pH de 3, se agitó por tres minutos y se sometió a sonicación por 15 minutos para su posterior incubación a 32 °C por 30 minutos con agitación constante. Finalmente, se centrifugó y se separó el residuo. El sobrenadante se etiquetó como extracto metanólico y se sometió a diversas pruebas de capacidad antioxidante. De cada especie de hongo se obtuvieron tres extractos por método de secado.

Evaluación de la capacidad antioxidante y contenido fenólico

Ambas pruebas se realizaron de acuerdo con los procedimientos reportados para los ensayos de ABTS (ácido 2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) y FRAP (poder antioxidante/reductor férrico) y Folin-Ciocalteu (FC), (Khatua et al., (2021); Kozarski et al., (2015); Muñoz-Velázquez et al., (2012); Sevindik et al., (2023)), adaptadas para lector de microplaca.

El contenido fenólico total se determinó mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu, con ácido gálico como estándar. En la placa de 96 pocillos se colocaron 125 µL de agua destilada, 20 µL de la disolución de FC, 25 µL del extracto a evaluar y 30 µL de Na₂CO₃ al 20%, la placa se cubrió de



la luz y se dejó reaccionar por 30 minutos. Se leyó la absorbancia en el lector de microplacas a 760 nm. Todo el trabajo se realizó en el laboratorio de Productos Naturales de la Universidad Autónoma Chapingo.

Análisis estadístico

Cada experimento se realizó por triplicado y cada uno de los tres datos fue el promedio de cuatro mediciones. Se obtuvieron las medias, la desviación estándar y el error. Se utilizó el software R para el análisis estadístico de los datos y la varianza ($p < 0.05$), con el fin de evaluar la variabilidad y la interacción de la capacidad antioxidante entre especies y entre tratamientos de secado. Los datos se analizaron mediante ANOVA de dos vías y mediante el ajuste y el contraste de las medias marginales estimadas con *emmeans*.

Resultados y discusión

Actividad antioxidante

Los resultados de las evaluaciones in vitro de los tres ensayos se presentan en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Efecto del secado en la capacidad antioxidante de hongos silvestres comestibles

N. común	Especie	T ¹	Fenoles (FC)		FRAP		ABTS	
			mgEAG/gs	E	μmolET/gs	E	μmolET/gs	E
Tecomate	<i>Amanita cf. j.</i>	L	1.311	0.01	4.329	0.12	6.864	0.23
	<i>Amanita cf. j.</i>	C	1.544	0.05	5.850	0.14	8.770	0.7
Yopitza	<i>Armillaria m.</i>	L	1.144	0.03	3.339	0.16	4.856	0.2
	<i>Armillaria m.</i>	C	1.531	0.01	5.507	0.26	8.705	0.39
Gallitos	<i>Helvella lacunosa</i>	L	0.925	0.11	2.042	0.09	4.489	0.06
	<i>Helvella lacunosa</i>	C	1.591	0.04	2.595	0.05	9.359	0.16
Xintaske	<i>Hypomices l.</i>	L	1.580	0.12	1.748	0.14	4.131	0.5
	<i>Hypomices l.</i>	C	1.667	0.02	6.396	0.34	20.994	0.65
Cueritos	<i>Infundibilucybe cf. s.</i>	L	1.790	0.10	3.600	0.18	10.489	0.41
	<i>Infundibilucybe cf. s.</i>	C	4.407	0.07	6.112	0.15	13.566	1.07
Mantecado	<i>Lactarius cf. g</i>	L	4.746	0.49	4.586	0.40	11.662	0.64
	<i>Lactarius cf. g</i>	C	6.685	0.07	10.660	0.97	31.148	1.77
Azul	<i>Lactarius indigo</i>	L	1.564	0.06	2.528	0.11	4.051	0.17

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



	<i>Lactarius indigo</i>	C	1.508	0.05	3.091	0.02	6.199	0.09
Pechuga	<i>Pholita cf. t.</i>	L	1.628	0.07	2.689	0.13	6.217	0.35
	<i>Pholita cf. t.</i>	C	2.052	0.07	3.335	0.21	7.692	0.55
Borrego	<i>Russula cf. b.</i>	L	0.473	0.04	0.596	0.03	8.734	0.06
	<i>Russula cf. b.</i>	C	0.915	0.01	1.270	0.07	7.880	0.71

Los datos son expresados como la media de n=3 y se muestra el error estándar (E)

¹T indica el tratamiento: L= liofilizado, C=convección

En primera instancia, se observa que, en la mayoría de los casos, el método de secado por convección presenta una mayor capacidad antioxidante en las tres pruebas. En el caso de los fenoles, ocho de nueve especies mostraron mayor reactividad frente a los hongos secados por este método; en la evaluación del poder antioxidante reductor de iones férricos (FRAP), todas las especies secadas por convección mostraron mayor actividad. En el ensayo ABTS, ocurre nuevamente en ocho de las nueve especies. Es importante notar que el comportamiento entre las especies es variable, algunas especies muestran una diferencia muy grande y en otras, la diferencia es mínima. En la Figura 1 muestra los resultados de las comparaciones de medias y de las interacciones entre tratamientos que identifican diferencias significativas.

El análisis estadístico indica que no todas las diferencias observadas al inicio resultaron significativas. Esto ocurrió en los tres ensayos y se muestra en el Cuadro 1.

En la evaluación de compuestos fenólicos (FC), en cuatro especies la diferencia observada no resultó significativa. En FRAP todas las especies obtuvieron mayor capacidad para el método por convección, sin embargo, el comparativo estadístico muestra que tres de estas diferencias no son significativas. Debe notarse que las especies con diferencia no significativa son las mismas, *Pholita cf. t.* y *Russula cf. b* y que en el resto de las especies el efecto del secado puede producir resultados muy diferentes en la capacidad antioxidante. De los 27 casos analizados, solo uno, *Russula cf b* liofilizado (en ABTS) superó numéricamente a su contraparte, pero la diferencia no fue significativa.

Observaciones

El material producto del secado por convección presentó cambios de coloración respecto a su estado original; en la mayoría de las especies se observó un oscurecimiento variable, en algunas, tenue, y en otras, de fácil percepción. Además, este material fue más duro y crujiente, que los hongos sometidos a liofilización. Se observó un encogimiento del material, lo que provocó su compactación. Los hongos liofilizados resultaron muy similares a los hongos frescos. Los cambios se detectaron al tocarlos. Se obtuvo un material muy suave y ligero.

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Conclusiones

El método de secado afectó significativamente la caracterización antioxidante de los hongos silvestres y este efecto dependió de la especie. El tratamiento por convección produjo concentraciones significativamente mayores de compuestos antioxidantes equivalentes, en siete de las nueve especies evaluadas, en ninguna especie se observó el comportamiento contrario.

El deshidratado por convección produce cambios notables en el producto a la vista y al tacto que afectan el aspecto de los hongos, sin embargo, la capacidad antioxidante no se observó disminuida.

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

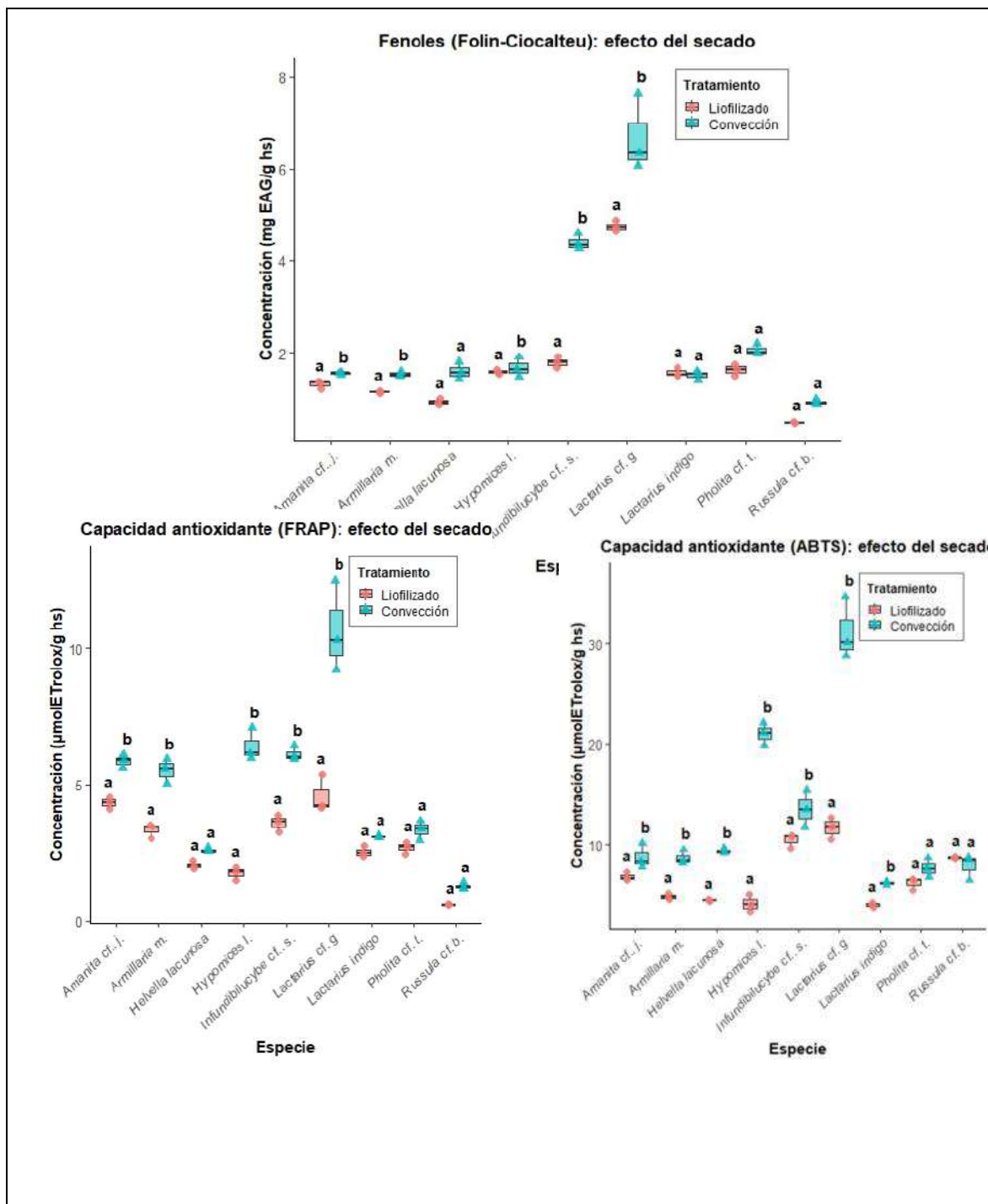
15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Figura 1. Comparación de las medias de cada especie en cada ensayo.





Dentro de cada especie, las medias con letras diferentes (a, b) muestran diferencias significativas entre tratamientos

Literatura Citada

- Abeysekera, W. P. K. M., Arachchige, S. P. G., Abeysekera, W. K. S. M., Ratnasooriya, W. D., & Medawatta, H. M. U. I. (2019). Antioxidant and Glycemic Regulatory Properties Potential of Different Maturity Stages of Leaf of Ceylon Cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum* Blume) in Vitro. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2693795>
- Bautista-Bautista, W. K., Díaz-Aguilar, I., Perez-Moreno, J., Frutis-Molina, I., & Ruan-Soto, F. (2024). Wild Edible Mushroom Lore in A Suburban Mestizo Community. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i17.2504>
- de la Fuente, J. I., Rosales-Rosales, W., Martínezgonzález, C. R., Martínez-Reyes, M., Elizondo-Salas, A. C., & Pérez-Moreno, J. (2024). Tuber itzcuinzapotl sp. nov. (Tuberaceae, Pezizomycetes), the first edible truffle reported from Mexico with traditional biocultural importance. *Phytotaxa*, 635(3), 206–216. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.635.3.2>
- Ec, E., Rc, E., & Ru, E. (2011). *AMERICAN JOURNAL OF FOOD AND NUTRITION Proximate composition, phytochemical screening and antioxidant activity of ten selected wild edible Nigerian mushrooms*. <https://doi.org/10.5251/ajfn.2011.1.2.89.94>
- Elnahas, M. O., Elkhateeb, W. A., & Daba, G. M. (2024). Nutritive profile, pharmaceutical potentials, and structural analysis of multifunctional bioactive fungal polysaccharides—A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 266). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130893>
- Guclu, G., Polat, S., Kelebek, H., Capanoglu, E., & Selli, S. (2022). Elucidation of the impact of four different drying methods on the phenolics, volatiles, and color properties of the peels of four types of citrus fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(13), 6036–6046. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11956>
- Guerra-Ramírez, D., Hernández Rodríguez, G., Espinosa- Solares, T., Perez-Lopez, A., & Salgado-Escobar, I. (2019). Antioxidant capacity of capulin (*Prunus serotina* subsp. capuli (Cav). McVaugh) fruit at different stages of ripening. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(16), 35–44. <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1947>
- Khatua, S., Sen Gupta, S., Ghosh, M., Tripathi, S., & Acharya, K. (2021). Exploration of nutritional, antioxidative, antibacterial and anticancer status of *Russula alatoretica*: towards valorization of a traditionally preferred unique myco-food. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2133–2147. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04723-9>
- Kozarski, M., Klaus, A., Jakovljevic, D., Todorovic, N., Vunduk, J., Petrović, P., Niksic, M., Vrvic, M. M., & Van Griensven, L. (2015). Antioxidants of edible mushrooms. In *Molecules* (Vol. 20, Number 10, pp. 19489–19525). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules201019489>
- Muñoz-Velázquez, E. E., Rivas-Díaz, K., Loarca-Piña, M., Flavia, G., Mendoza-Díaz, S., Reynoso-Camacho, R., & Ramos-Gómez, M. (2012). Comparación del contenido fenólico, capacidad antioxidante y actividad antiinflamatoria de infusiones herbales comerciales. *Revista Mexicana de*



Ciencias Agrícolas, 3(3), 481–495.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000300006

Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 22, Number 7). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/ijms22073380>

Pérez, M., Dominguez-López, I., & Lamuela-Raventós, R. M. (2023). The Chemistry Behind the Folin-Ciocalteu Method for the Estimation of (Poly)phenol Content in Food: Total Phenolic Intake in a Mediterranean Dietary Pattern. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 71, Number 46, pp. 17543–17553). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04022>

Pinela, J., Barros, L., Carvalho, A. M., & Ferreira, I. C. F. R. (2011). Influence of the drying method in the antioxidant potential and chemical composition of four shrubby flowering plants from the tribe Genisteae (Fabaceae). *Food and Chemical Toxicology*, 49(11), 2983–2989.

<https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.07.054>

Sevindik, M., Akata, I., Saridoğan, B. G. O., Eraslan, E. C., & Bal, C. (2023). Antioxidant, Antimicrobial, and Antiproliferative Activities of Some Edible Wild Mushrooms. *Biology Bulletin*, 50(Suppl 4), S630–S636. <https://doi.org/10.1134/S1062359023604846>

Sharma, E., Bairwa, R., Lal, P., Pattanayak, S., Chakrapani, K., Poorvasandhya, R., Kumar, A., Altaf, M. A., Tiwari, R. K., Lal, M. K., & Kumar, R. (2024). Edible mushrooms trending in food: Nutrigenomics, bibliometric, from bench to valuable applications. In *Heliyon* (Vol. 10, Number 17). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36963>

Suleiman, W. B., Shehata, R. M., & Younis, A. M. (2022). In vitro assessment of multipotential therapeutic importance of *Herichium erinaceus* mushroom extracts using different solvents. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00592-6>

Wang, H., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2014). Comparison of Three New Drying Methods for Drying Characteristics and Quality of Shiitake Mushroom (*Lentinus edodes*). *Drying Technology*, 32(15), 1791–1802. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.947426>

Xie, G., Tang, L., Xie, Y., & Xie, L. (2022). Secondary Metabolites from *Herichium erinaceus* and Their Anti-Inflammatory Activities. *Molecules*, 27(7). <https://doi.org/10.3390/molecules27072157>

Yahia, E. M., Gutiérrez-Orozco, F., & Moreno-Pérez, M. A. (2017). Identification of phenolic compounds by liquid chromatography-mass spectrometry in seventeen species of wild mushrooms in Central Mexico and determination of their antioxidant activity and bioactive compounds. *Food Chemistry*, 226, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.044>

Yanclo, L. A., Sigge, G., Belay, Z. A., Oyenih, A. B., October, F., & Caleb, O. J. (2024). Effects of Cold Plasma Pretreatment and Cultivar on the Drying Characteristics, Biochemical, and Bioactive Compounds of “Tropica” and “Keitt” Mangoes. *Journal of Biosystems Engineering*, 49(2), 135–155. <https://doi.org/10.1007/s42853-024-00222-3>



Biopesticide AI: Sistema de recuperación semántica, extracción de entidades y recomendación de biopesticidas a partir de literatura científica

Luis Germán López Valdez¹ y Holber Zuleta Prada¹

Mesa: Nuevas perspectivas de Química: de lo molecular a lo global

Resumen

Los biopesticidas —agentes microbianos, botánicos y bioquímicos empleados para el control de plagas agrícolas— representan una alternativa cada vez más relevante frente a los plaguicidas químicos convencionales, dada su menor impacto ambiental y su compatibilidad con esquemas de manejo integrado de plagas (MIP). Sin embargo, la evidencia científica sobre su eficacia se encuentra dispersa en decenas de miles de artículos y resúmenes (abstracts) publicados en distintos idiomas, lo que dificulta su consulta sistemática por parte de investigadores, técnicos agrícolas y tomadores de decisiones. Este trabajo presenta BioPesticide AI, una aplicación desarrollada en Streamlit que combina reconocimiento de entidades nombradas (NER) biomédico, un diccionario especializado de términos de control biológico, embeddings semánticos multilingües (BGE-M3) y un índice de recuperación vectorial (FAISS) para identificar, a partir de una base de 23 921 abstracts científicos, los biopesticidas con mayor evidencia bibliográfica frente a un problema fitosanitario descrito en español o en inglés. Se describe la arquitectura del sistema, el flujo de procesamiento de datos, el módulo de extracción y ranking de entidades, y se presentan los resultados de una prueba preliminar con un subconjunto de 100 abstracts, en la que el sistema identificó 1490 candidatos únicos. El análisis de los términos más frecuentes evidencia tanto el potencial del enfoque —con *Beauveria bassiana* y el descriptor genérico «biopesticide» entre los términos dominantes— como sus limitaciones actuales, principalmente la presencia de falsos positivos generados por un modelo de NER no especializado en el dominio de los biopesticidas. Se concluye que el sistema constituye una base funcional sólida para la minería de literatura científica en este dominio, y se proponen mejoras concretas —modelo de NER específico, recuperación híbrida semántica-léxica y reordenamiento (re-ranking)— para incrementar su precisión antes de un uso en contextos de decisión agronómica.



Palabras clave: Biopesticidas; procesamiento de lenguaje natural; recuperación semántica de información; embeddings multilingües; reconocimiento de entidades nombradas; FAISS; control biológico de plagas; minería de literatura científica.

Abstract

Biopesticides — microbial, botanical, and biochemical agents used for agricultural pest control — represent an increasingly relevant alternative to conventional chemical pesticides, given their lower environmental impact and compatibility with integrated pest management (IPM) schemes. However, the scientific evidence on their efficacy is scattered across tens of thousands of articles and abstracts published in different languages, making systematic consultation difficult for researchers, agricultural technicians, and decision-makers. This work presents BioPesticide AI, a Streamlit application that combines biomedical named entity recognition (NER), a specialized biocontrol dictionary, multilingual semantic embeddings (BGE-M3), and a vector retrieval index (FAISS) to identify, from a corpus of 23,921 scientific abstracts, the biopesticides with the strongest bibliographic evidence for a pest problem described in either Spanish or English. The system architecture, data-processing pipeline, and entity extraction/ranking module are described, and results from a preliminary test on a 100-abstract subset are reported, in which the system identified 1490 unique candidates. Analysis of the most frequent terms shows both the potential of the approach — with *Beauveria bassiana* and the generic descriptor "biopesticide" among the dominant terms — and its current limitations, chiefly false positives produced by a domain-general NER model. The system is concluded to be a solid functional foundation for scientific literature mining in this domain, and concrete improvements are proposed — a domain-specific NER model, hybrid semantic-lexical retrieval, and re-ranking — to increase precision prior to use in agronomic decision-making contexts.

Keywords: Biopesticides; natural language processing; semantic information retrieval; multilingual embeddings; named entity recognition; FAISS; biological pest control; scientific literature mining.

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola. Correos electrónicos: llopezv@chapingo.mx, hzuletap@chapingo.mx



Introducción

El uso intensivo de plaguicidas químicos sintéticos ha generado preocupaciones crecientes en torno a la resistencia de las plagas, la contaminación de suelos y cuerpos de agua, y los riesgos para la salud humana y los organismos benéficos. En este contexto, los biopesticidas —formulados a partir de microorganismos (bacterias, hongos, virus), extractos botánicos, feromonas o metabolitos microbianos— se han consolidado como una herramienta central del manejo integrado de plagas (MIP), al ofrecer modos de acción específicos y una menor persistencia ambiental.

No obstante, la evidencia científica que respalda el uso de un biopesticida frente a una plaga y un cultivo determinados no siempre es fácil de localizar: se encuentra dispersa en miles de artículos indexados en bases de datos bibliográficas, redactados mayoritariamente en inglés, y con una terminología científica altamente especializada (nombres binomiales de organismos, compuestos activos, mecanismos de acción). Para un investigador o técnico que consulta en español, esta barrera idiomática y de volumen de información dificulta aún más la síntesis del conocimiento disponible.

El presente trabajo aborda este problema mediante el diseño e implementación de BioPesticide AI, una aplicación de escritorio/web basada en Streamlit que permite: (i) cargar una base de abstracts científicos en formato CSV; (ii) construir automáticamente una base de conocimiento indexada semánticamente; (iii) describir en lenguaje natural —en español o en inglés— un problema de manejo de plagas; y (iv) recibir como resultado un listado de biopesticidas candidatos, ordenados según la evidencia bibliográfica disponible, junto con los estudios que los respaldan.

El objetivo de este artículo es documentar, con el rigor propio de un reporte técnico-científico, la arquitectura, la metodología y los resultados preliminares del sistema, así como discutir de manera crítica sus alcances y limitaciones actuales.

Antecedentes

El procesamiento de lenguaje natural aplicado a la literatura científica biomédica y agrícola se apoya en tres grandes familias de técnicas, cuya combinación constituye la base conceptual de este proyecto.

Modelos de lenguaje para dominios científicos

Los modelos basados en la arquitectura Transformer, preentrenados sobre corpus de texto científico, han demostrado un desempeño superior al de los modelos generalistas cuando se



aplican a tareas de clasificación, extracción de entidades o recuperación de información en dominios especializados. SciBERT, desarrollado específicamente para texto científico con un vocabulario adaptado a ese dominio, es un ejemplo representativo de esta familia y constituye una alternativa considerada para el desarrollo de un modelo de NER especializado en biopesticidas.

Embeddings semánticos multilingües

La recuperación semántica moderna representa consultas y documentos como vectores densos (embeddings) en un espacio en el que la cercanía geométrica refleja similitud de significado. Para escenarios multilingües —como el de este proyecto, en el que las consultas pueden formularse en español mientras que la mayoría de los abstracts está en inglés— resultan especialmente relevantes los modelos entrenados con objetivos de recuperación cross-lingual. BGE-M3, un modelo basado en XLM-RoBERTa que admite más de cien idiomas y secuencias de hasta 8192 tokens, fue seleccionado como modelo principal de embeddings por estar diseñado específicamente para tareas de recuperación semántica multilingüe. Se evaluó también NV-Embed-v2, un modelo de NVIDIA con resultados sobresalientes en el benchmark MTEB, pero su orientación monolingüe (inglés) lo hizo menos adecuado para el requisito de consultas en español.

Reconocimiento de entidades nombradas en el dominio biomédico

Los modelos de token classification permiten identificar dentro de un texto menciones a organismos, compuestos, enfermedades u otras categorías biomédicas. El modelo d4data/biomedical-ner-all, basado en DistilBERT y capaz de reconocer 107 tipos de entidades biomédicas, se utilizó como generador de candidatos para la identificación de biopesticidas, en combinación con un diccionario especializado y reglas léxicas, dado que este modelo no fue entrenado específicamente para la categoría «biopesticida».

Recuperación vectorial a gran escala

Para que las consultas sobre un corpus de más de veinte mil documentos se resuelvan en tiempos interactivos, es necesario indexar los embeddings en una estructura optimizada para búsquedas de similitud por vecinos cercanos. FAISS (Facebook AI Similarity Search) es la librería adoptada para este propósito, mediante un índice de producto interno (IndexFlatIP) sobre vectores normalizados, equivalente a una búsqueda por similitud coseno.

Materiales y Métodos

El sistema se estructuró como una aplicación modular en Python, organizada en un paquete src/ con módulos independientes para la carga de datos, la extracción de entidades, la



generación de embeddings, la recuperación vectorial y el cálculo de recomendaciones, orquestados desde una interfaz Streamlit (app.py).

Ingesta y limpieza de datos

El módulo data.py detecta automáticamente, mediante un conjunto de nombres de columna candidatos, cuáles corresponden al abstract, al título y al DOI dentro del CSV cargado por el usuario. El texto del abstract se normaliza (eliminación de etiquetas HTML residuales y de espacios en blanco redundantes) y se descartan los registros con un abstract de menos de 30 caracteres, a fin de excluir entradas vacías o corruptas.

Extracción de candidatos a biopesticida

La extracción combina tres fuentes de evidencia complementarias, con el fin de reducir los falsos positivos que resultarían de aplicar un único método:

Un diccionario curado de términos de control biológico (agentes microbianos, virus entomopatógenos, compuestos botánicos, feromonas, metabolitos microbianos y descriptores generales), buscado por coincidencia léxica dentro del texto del abstract.

El modelo de NER biomédico d4data/biomedical-ner-all, aplicado como pipeline de token-classification con agregación simple y un umbral mínimo de confianza de 0.55.

La deduplicación normalizada (a minúsculas) de las menciones obtenidas por ambas vías, para consolidar un listado único de candidatos por abstract.

Se documenta explícitamente en el diseño que no es correcto asumir que toda entidad detectada por el NER constituye un biopesticida; por ello se contempla, como mejora futura, el entrenamiento de un modelo de NER específico (categorías BIOPESTICIDE, BIOCONTROL_AGENT, ACTIVE_COMPOUND, MICROBIAL_AGENT, BOTANICAL_AGENT, TARGET_PEST, TARGET_PATHOGEN y CROP) mediante fine-tuning de SciBERT.

Generación de embeddings y construcción del índice

Cada abstract se codifica con el modelo BAAI/bge-m3 a través de sentence-transformers, con normalización de los vectores resultantes (normalize_embeddings=True) para permitir el uso de similitud coseno mediante producto interno. Los embeddings se almacenan en un



índice FAISS de tipo IndexFlatIP, que se persiste en disco (indexes/abstracts.faiss) junto con los metadatos del corpus procesado (indexes/metadata.parquet), evitando así recalcular la indexación en cada sesión de la aplicación. Para el corpus completo de 23 921 abstracts, con 1024 dimensiones por vector, el índice ocupa aproximadamente 98 MB, un tamaño perfectamente manejable en memoria.

Recuperación y ranking de biopesticidas

Ante una consulta del usuario, formulada libremente en español o en inglés, se calcula su embedding con el mismo modelo BGE-M3 y se recuperan los k abstracts más similares (k configurable entre 5 y 100 desde la barra lateral). A partir de los biopesticidas detectados en esos abstracts, se calcula para cada candidato un puntaje final que combina tres componentes:

$$\text{puntaje_final} = 0.65 \cdot \text{similitud_máxima} + 0.25 \cdot \text{similitud_promedio} + 0.10 \cdot \text{puntaje_de_frecuencia}$$

donde el puntaje de frecuencia se calcula como $\min(1, \log(1 + \text{frecuencia}) / 5)$, de modo que la recurrencia de un biopesticida en varios abstracts relevantes incrementa su posición en el ranking sin que ese factor domine sobre la similitud semántica. Los candidatos se ordenan de mayor a menor puntaje y se presentan junto con la evidencia bibliográfica (título, fragmento del abstract y DOI) de los tres estudios más relevantes para cada uno.

Interfaz de usuario

La interfaz, desarrollada en Streamlit, organiza el flujo en secciones: carga del CSV con vista previa de los datos; construcción de la base de conocimiento (con barra de progreso para las etapas de extracción de entidades, generación de embeddings y construcción del índice FAISS); un panel de estadísticas generales del corpus (candidatos únicos y total de abstracts, con una tabla de los 20 términos más frecuentes); un cuadro de texto para describir el problema fitosanitario; y, tras la búsqueda, un listado de tarjetas con los biopesticidas recomendados, su puntaje de relevancia, el número de estudios que los respaldan y la evidencia textual correspondiente. El índice construido se identifica mediante un hash MD5 del archivo cargado, lo que permite reutilizar automáticamente un índice ya calculado si el mismo CSV se vuelve a cargar en una sesión posterior.

Requisitos computacionales

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



La aplicación puede ejecutarse sobre CPU, aunque se recomienda una GPU NVIDIA para acelerar la codificación de embeddings en corpus grandes, junto con al menos 16 GB de RAM y 5 GB de almacenamiento disponible para los modelos y los índices generados.

Resultados y discusión

Con el fin de validar el flujo completo de la aplicación antes de procesar el corpus completo de 23 921 abstracts, se realizó una prueba funcional con un subconjunto de 100 abstracts (archivo cleaned_df.csv, 76.2 MB). La figura 1 muestra la interfaz de la aplicación tras completar la carga de datos y la construcción de la base de conocimiento.

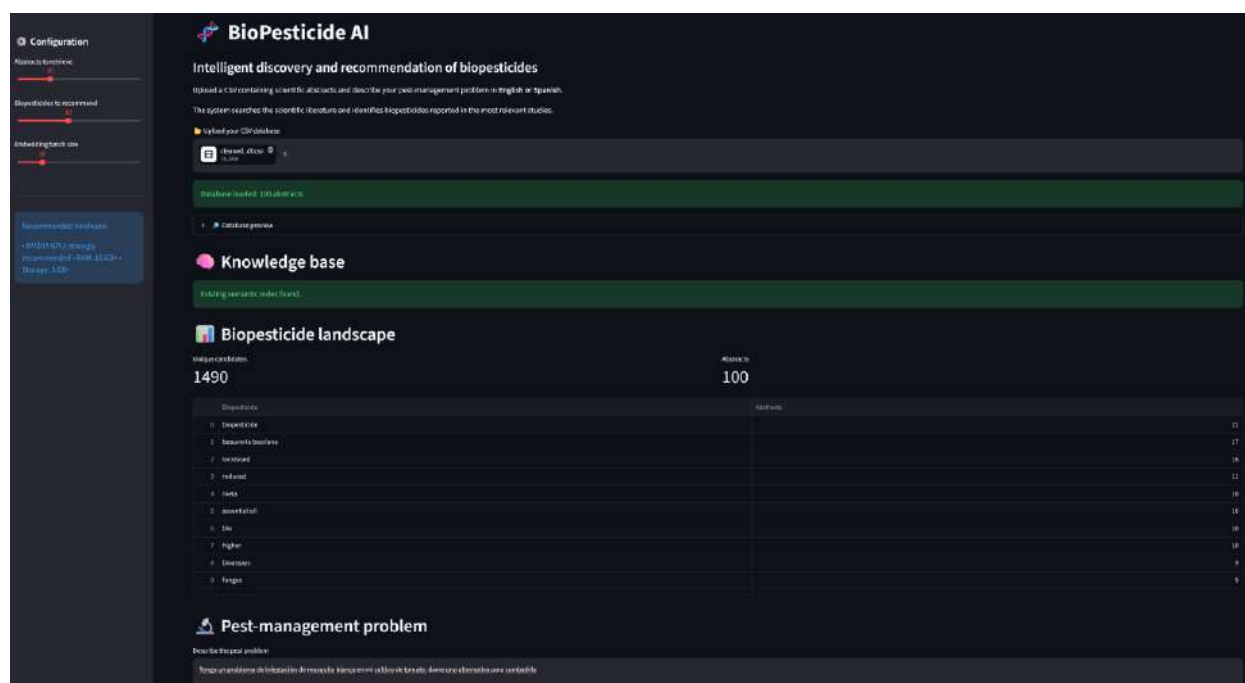


Figura 1. Interfaz de BioPesticide AI tras la carga de un subconjunto de 100 abstracts: panorama general de biopesticidas detectados y campo de descripción del problema fitosanitario (consulta de ejemplo en español sobre mosquita blanca en tomate).



fragmentos léxicos genéricos propios del lenguaje científico (comparaciones estadísticas, prefijos truncados o palabras del vocabulario metodológico de los abstracts) capturados por el modelo de NER biomédico al no estar este entrenado específicamente para la categoría de interés. Este hallazgo empírico corrobora, con datos reales, la advertencia señalada en el diseño del sistema: no conviene asumir que toda entidad detectada por un NER biomédico general corresponde a un biopesticida válido.

De ello se desprenden dos implicaciones prácticas para las siguientes iteraciones del proyecto. En primer lugar, el filtrado por diccionario y por patrones lingüísticos debe reforzarse con listas de exclusión (stopwords de dominio) y con reglas morfosintácticas que descarten adjetivos comparativos, prefijos incompletos o términos metodológicos genéricos. En segundo lugar, se confirma la pertinencia de la mejora propuesta en la metodología: entrenar un modelo de NER específico para las categorías BIOPESTICIDE, BIOCONTROL_AGENT, ACTIVE_COMPOUND, entre otras, mediante fine-tuning de SciBERT sobre un conjunto de abstracts anotados manualmente, lo que debería reducir sustancialmente la proporción de falsos positivos observada en esta prueba preliminar.

En cuanto a la capacidad de recuperación semántica multilingüe, la consulta de ejemplo ingresada durante la prueba —formulada en español y referida a una infestación de mosquita blanca en un cultivo de tomate— fue procesada correctamente por el pipeline sin necesidad de traducción explícita, lo que es consistente con el diseño cross-lingual de BGE-M3 y con el caso de uso previsto: una consulta en español debe poder recuperar abstracts redactados en inglés cuyo contenido semántico coincida con el problema planteado, aun cuando el usuario no conozca de antemano la terminología científica exacta (por ejemplo, *Bemisia tabaci*) del organismo involucrado.

Finalmente, cabe señalar que estos resultados corresponden a una muestra reducida (100 de 23 921 abstracts), utilizada como prueba de concepto del flujo completo de la aplicación. La escala real del corpus, considerablemente mayor, permitirá evaluar con mayor solidez estadística tanto la precisión del sistema de extracción como la calidad de las recomendaciones, y es la evaluación pendiente natural una vez incorporadas las mejoras de filtrado discutidas.

Conclusiones

- Se diseñó e implementó BioPesticide AI, un sistema funcional que integra extracción de entidades biomédicas, un diccionario especializado, embeddings semánticos multilingües (BGE-M3) y un índice de recuperación vectorial (FAISS) para apoyar la



identificación de biopesticidas a partir de literatura científica, con soporte de consulta tanto en español como en inglés.

- La arquitectura modular (ingesta y limpieza de datos, extracción de entidades, generación de embeddings, indexación FAISS y cálculo de recomendaciones) permite persistir el índice semántico entre sesiones, evitando recalcular embeddings en cada uso y haciendo viable su aplicación sobre el corpus completo de 23 921 abstracts.
- La prueba preliminar con 100 abstracts confirmó la capacidad del sistema para identificar candidatos relevantes, como *Beauveria bassiana*, y para procesar consultas en español sobre abstracts en inglés sin traducción explícita, validando el enfoque de recuperación semántica multilingüe.
- La misma prueba reveló una proporción no despreciable de falsos positivos entre los términos más frecuentes, originados en el uso de un modelo de NER biomédico de propósito general no especializado en biopesticidas, lo que confirma la necesidad —ya prevista en el diseño— de desarrollar un modelo de NER específico del dominio.
- Como trabajo futuro se identifican tres líneas prioritarias: (i) el entrenamiento de un modelo de NER especializado en biopesticidas mediante fine-tuning de SciBERT sobre un corpus anotado; (ii) la incorporación de recuperación híbrida (BGE-M3 combinado con BM25) y un módulo de re-ranking con cross-encoder para mejorar la precisión frente a terminología científica exacta; y (iii) la separación explícita, en el flujo de consulta, entre la extracción del problema del usuario (cultivo, plaga, ambiente, restricciones) y la recomendación de biopesticidas, junto con una capa de clasificación por categoría (microbiano, fúngico, viral, botánico, bioquímico, nematodos, enemigos naturales).
- Se reafirma, como principio de diseño responsable, que el sistema debe comunicar sus resultados como evidencia bibliográfica y no como recomendación agronómica directa, dado que esta última requeriría información adicional sobre dosis, formulación, fenología del cultivo, condiciones ambientales, compatibilidad, registro y regulación del producto en cada país.

Literatura citada

- BAAI (Beijing Academy of Artificial Intelligence). BGE-M3 [modelo de embeddings multilingüe]. Hugging Face Model Hub. Disponible en: <https://huggingface.co/BAAI/bge-m3>
- d4data. biomedical-ner-all [modelo de reconocimiento de entidades nombradas biomédicas basado en DistilBERT]. Hugging Face Model Hub. Disponible en: <https://huggingface.co/d4data/biomedical-ner-all>

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



NVIDIA. NV-Embed-v2 [modelo de embeddings para recuperación de información].
Hugging Face Model Hub. Disponible en: <https://huggingface.co/nvidia/NV-Embed-v2>

Allen Institute for AI (AllenAI). SciBERT: A BERT model for scientific text. Repositorio
GitHub. Disponible en: <https://github.com/allenai/scibert>

Johnson, J.; Douze, M.; Jégou, H. Billion-scale similarity search with GPUs (FAISS).
Facebook AI Research.

Reimers, N.; Gurevych, I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-
Networks. Proceedings of EMNLP-IJCNLP.

Devlin, J.; Chang, M.-W.; Lee, K.; Toutanova, K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional
Transformers for Language Understanding. Proceedings of NAACL-HLT.

Streamlit Inc. Streamlit documentation. Disponible en: <https://docs.streamlit.io>

Pandas Development Team. pandas: powerful Python data analysis toolkit. Disponible en:
<https://pandas.pydata.org>

Hugging Face. transformers: State-of-the-art Natural Language Processing library.
Disponible en: <https://huggingface.co/docs/transformers>



Palabras clave: Control biológico; metabolitos secundarios; biocontroladores fúngicos; procesamiento de lenguaje natural; BERT; Streamlit; minería de literatura científica; agricultura sostenible; inteligencia artificial; entomopatógenos.

Abstract

This work presents the design and implementation of a Hybrid Discovery System (HDS) for identifying fungal biocontrol agents and metabolites with pest-control potential, focused on phytosanitary problems in Mexican agriculture. The system was developed as an interactive web application in Python using the Streamlit framework, combining Natural Language Processing (NLP) techniques based on BERT-type Transformer architectures with multilingual semantic search engines. The app processes a database of 254 scientific abstracts in English (covering biological control, entomopathogens, and natural product chemistry), automatically extracts chemical entities using a fine-tuned BioBERT Named Entity Recognition (NER) model, and recommends relevant compounds and microorganisms in response to a natural-language query in either English or Spanish, returning bilingual answers. Functional testing confirms that the end-to-end pipeline (data loading, semantic indexing, querying, and recommendation) operates correctly; however, analysis of the results reveals current limitations in the precision of specific chemical-entity extraction (named metabolites), which are discussed alongside an improvement roadmap toward a production-ready version.

Keywords: Biological control; secondary metabolites; fungal biocontrol agents; natural language processing; BERT; Streamlit; literature mining; sustainable agriculture; artificial intelligence; entomopathogens.

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola. Correos electrónicos: llopezv@chapingo.mx, hzuletap@chapingo.mx



Introducción

El uso intensivo de plaguicidas sintéticos en la agricultura mexicana ha generado problemas bien documentados de resistencia en plagas, contaminación de suelos y cuerpos de agua, y riesgos para la salud humana y los polinizadores. En este contexto, el control biológico mediante hongos entomopatógenos (p. ej. *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*) y sus metabolitos secundarios (péptidos cíclicos, policétidos, terpenoides) se presenta como una alternativa sostenible, pero su adopción se ve limitada por la dispersión de la evidencia científica: miles de artículos publicados anualmente, en inglés, dificultan que técnicos y agrónomos de habla hispana identifiquen rápidamente qué biocontrolador o metabolito es pertinente para una plaga y un cultivo específicos.

Frente a esta brecha, el presente proyecto propone un sistema asistido por Inteligencia Artificial que automatiza tres tareas: (1) la lectura masiva de abstracts científicos, (2) la extracción de los metabolitos y organismos mencionados en ellos, y (3) la recomendación de los más relevantes a partir de una descripción libre del problema de plaga, redactada por el usuario en español o inglés. El resultado es una herramienta de tamizaje bibliográfico —no un sustituto de la validación experimental— que reduce el tiempo de búsqueda manual de literatura y democratiza el acceso a esta información para usuarios que no dominan el inglés técnico.

Antecedentes

El desarrollo de modelos de lenguaje basados en la arquitectura Transformer (Vaswani et al., 2017) cambió el estado del arte del PLN. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers; Devlin et al., 2019) introdujo un preentrenamiento bidireccional que mejoró sustancialmente tareas de comprensión de texto, incluyendo el reconocimiento de entidades nombradas (NER). Su adaptación al dominio biomédico, BioBERT (Lee et al., 2020), preentrenada sobre PubMed y PMC, demostró mejoras significativas frente a BERT genérico en tareas de NER biomédico y de reconocimiento de entidades químicas/enfermedades, incluyendo el corpus de referencia BC5CDR (Li et al., 2016), sobre el cual existen variantes públicas afinadas específicamente para la clase 'Chemical'.

En paralelo, los modelos de tipo Sentence-BERT (Reimers & Gurevych, 2019) permitieron obtener representaciones vectoriales (embeddings) de oraciones completas optimizadas para similitud semántica, y sus variantes multilingües extendieron esta capacidad a más de 50



idiomas mediante destilación de conocimiento entre modelos monolingües y multilingües (Reimers & Gurevych, 2020), habilitando búsquedas cruzadas entre idiomas sin traducción explícita previa. Para la traducción automática entre pares de idiomas específicos, el proyecto OPUS-MT (Tiedemann & Thottingal, 2020), basado en la arquitectura Marian NMT, ofrece modelos ligeros y de acceso abierto ampliamente utilizados en aplicaciones de bajo costo computacional.

En el dominio agrícola, diversos estudios reportan la actividad bioplaguicida de metabolitos fúngicos como la beauvericina y depsipéptidos cíclicos relacionados, producidos por especies de *Beauveria* y *Fusarium*, así como el papel de hongos entomopatógenos y micoparásitos (*Trichoderma* spp., *Paecilomyces* spp.) como agentes de control biológico contra áfidos y lepidópteros plaga. Estos antecedentes justifican la construcción de una base de datos curada de abstracts como insumo para un sistema de extracción y recomendación automatizada.

Materiales y Métodos

1. Arquitectura general del sistema

El sistema se implementó como una aplicación monolítica en Python 3, con interfaz web servida mediante Streamlit. La arquitectura se organiza en cuatro módulos: (a) ingesta y normalización de datos, (b) extracción de entidades químicas (NER), (c) indexación semántica y motor de recomendación, y (d) generación de respuesta bilingüe.

2. Base de datos

Se utilizó un archivo CSV ("cleaned...i_2026.csv", 3.7 MB) con 254 registros bibliográficos, cada uno con al menos los campos abstract, title, year y doi. Los registros corresponden a literatura en inglés sobre entomopatógenos fúngicos, parasitoides, formulaciones biocontroladoras y compuestos con actividad antifúngica o insecticida.

3. Extracción de metabolitos (NER químico)

Para cada abstract se ejecutó un pipeline de reconocimiento de entidades nombradas con el modelo alvaroaalon2/biobert_chemical_ner, una variante de BioBERT afinada sobre el corpus BC5CDR-Chemical, obtenido desde el repositorio de Hugging Face. Este modelo se complementó con: (i) un diccionario curado de compuestos frecuentes en control biológico/botánico (p. ej. azadiractina, piretrinas, terpenos) y (ii) un detector basado en patrones de sufijos químicos comunes (-ol, -ona, -eno, -ato, -oide), con el fin de aumentar la cobertura (recall) sobre nombres muy específicos de la literatura entomológica que el NER genérico podría omitir.

4. Indexación semántica y motor de recomendación

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Cada abstract se vectorizó mediante el modelo sentence-transformers/paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2, un encoder tipo BERT (MiniLM) entrenado para similitud semántica en más de 50 idiomas. La consulta del usuario (en español o inglés) se vectoriza con el mismo modelo y se compara contra el índice de abstracts mediante similitud coseno, seleccionando los k abstracts más cercanos (parámetro configurable, ver Figura 1). Los metabolitos/entidades detectados en esos abstracts se agregan y ponderan por la similitud semántica del abstract de origen y su frecuencia de mención, generando un score de relevancia por entidad.

5. Respuesta bilingüe

El idioma de la consulta se detecta automáticamente (librería langdetect, con heurística de respaldo) y se genera un resumen narrativo en inglés y en español a partir de la misma plantilla estructurada. Para la traducción bajo demanda de fragmentos de abstracts se emplean los modelos MarianMT Helsinki-NLP/opus-mt-en-es y Helsinki-NLP/opus-mt-es-en.

6. Herramientas de desarrollo

El stack tecnológico empleado se resume en la Tabla 1.

Componente	Herramienta / Modelo	Función
Interfaz web	Streamlit	Renderizado de la app interactiva
Manejo de datos	pandas / NumPy	Carga, limpieza y agregación del CSV
NER químico	alvaroaalon2/biobert_chemical_ner (BioBERT)	Extracción de entidades químicas
Embeddings semánticos	paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2	Búsqueda semántica EN↔ES
Traducción	Helsinki-NLP/opus-mt-en-es / es-en (MarianMT)	Traducción bajo demanda
Detección de idioma	langdetect	Identificar EN/ES en la consulta
Entorno	Python 3 + VSCode	Desarrollo y ejecución local

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Resultados y discusión

Configuración

Sube tu CSV de abstracts

cleaned_1_2026.csv (3.1M)

...o ruta local al CSV

data/abstracts.csv

Abstracts a considerar (top-k)

15

Metabolitos a recomendar

15

Similitud mínima

0.15

Modelos usados

- NER químico: `stvarnastevy/stvarnastevy_chemical_ner`
- Embeddings: `sentance-transformers/pytorch/nnlm-1111ngual-91111111-112-v2`
- Traducción: `metatext-nlp/opus-mt-es-es` / `metatext-nlp/opus-mt-es-es`

Metabolite Pest Advisor

Extracción de metabolitos y recomendación bilingüe (EN/ES) a partir de abstracts científicos sobre entomología, control biológico y química de productos naturales.

Base de datos cargada: 254 abstracts.

Consultar / Query | Explorar base de datos

Describe el problema de plaga

You can write in English or Spanish / Puedes escribir en inglés o español.

Descripción / Description

Saltamontes en maíz

Analizar / Analyze

Recomendación / Recommendation

English

Based on 15 abstracts most semantically related to your query ("Saltamontes en maíz"), the metabolites most frequently reported with potential relevance are: fungal, biocontrol, biological, antifungal, BEA. These compounds appear in the literature associated with biological/botanical pest control contexts similar to the one described. Review the source abstracts below before selecting a compound for testing, as efficacy is species- and dose-dependent.

Español

A partir de 15 abstracts semánticamente más relacionados con tu consulta ("Saltamontes en maíz"), los metabolitos reportados con mayor frecuencia y relevancia potencial son: **fungal, biocontrol, biological, antifungal, BEA**. Estos compuestos aparecen en la literatura asociada a contextos de control biológico o botánico similares al descrito. Revisa los abstracts fuente más abajo antes de seleccionar un compuesto para pruebas, ya que la eficacia depende de la especie plaga y la dosis.

Figura 1. Interfaz principal del sistema: carga del CSV (254 abstracts), consulta en español ("Saltamontes en maíz") y recomendación generada de forma bilingüe (inglés/español).

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO

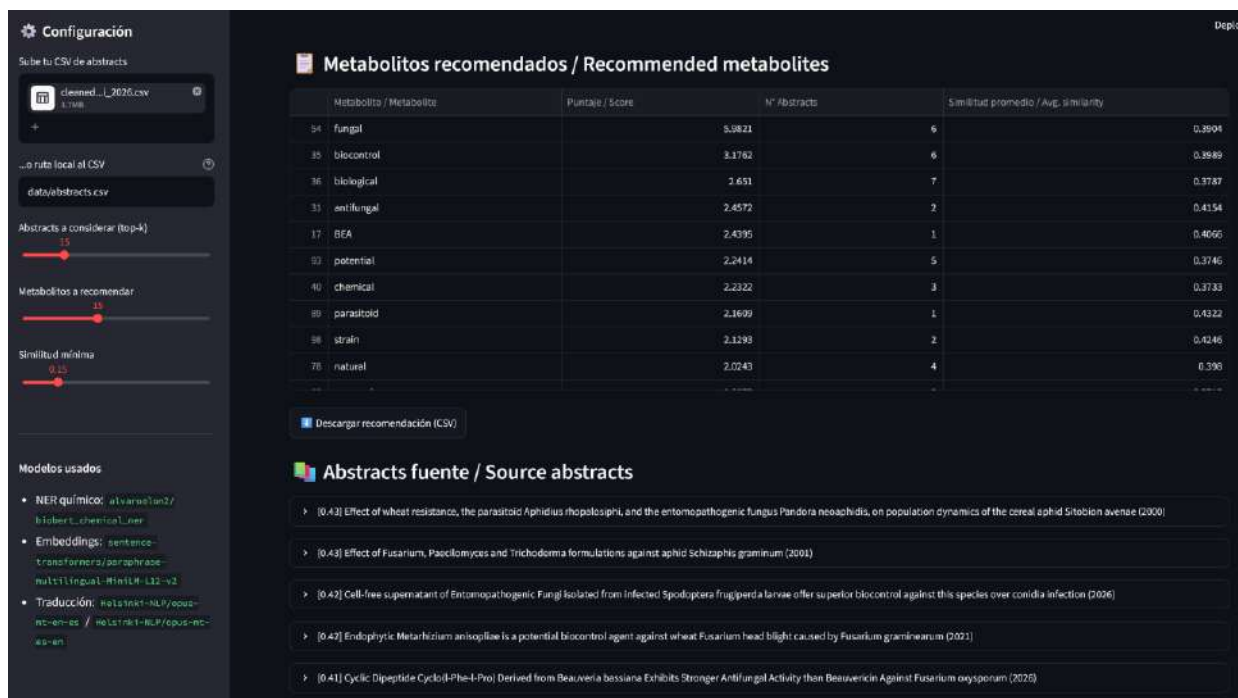


Figura 2. Tabla de metabolitos recomendados (score, N.º de abstracts, similitud promedio) y listado de abstracts fuente recuperados por similitud semántica.

La aplicación fue desplegada y probada de forma funcional en un entorno local. Tras cargar el archivo cleaned...i_2026.csv, el sistema reconoció correctamente 254 abstracts (Figura 1). Con la consulta de prueba en español "Saltamontes en maíz", el motor de búsqueda semántica identificó y ordenó abstracts relevantes sin necesidad de traducción previa por parte del usuario, generando el resumen de recomendación simultáneamente en inglés y español (Figura 1), lo que confirma el funcionamiento correcto del componente de embeddings multilingües y del pipeline de generación bilingüe.

Los abstracts fuente recuperados con mayor similitud (0.41–0.43) correspondieron a estudios pertinentes sobre parasitoides de áfidos, hongos entomopatógenos (*Pandora neoaphidis*, *Metarhizium anisopliae*) y formulaciones de *Fusarium*, *Paecilomyces* y *Trichoderma* (Figura 2), lo cual indica que el motor de recuperación semántica funciona adecuadamente para priorizar literatura contextualmente relacionada, incluso cuando la consulta original no contiene los términos técnicos exactos usados en los abstracts en inglés.



No obstante, la tabla de "Metabolitos recomendados" (Figura 2) evidencia una limitación importante en el componente de extracción de entidades: los elementos mejor puntuados incluyen términos genéricos como fungal, biocontrol, biological, antifungal, potential, chemical, parasitoid, strain y natural, que no constituyen nombres propios de metabolitos, sino vocabulario descriptivo general del dominio. Solo el término BEA (abreviatura de beauvericina) corresponde a una entidad química específica reconocible. Esto sugiere que, en la configuración actual, el patrón de sufijos químicos y/o el umbral de confianza del modelo NER está capturando sustantivos y adjetivos de alta frecuencia en el corpus biomédico en lugar de restringirse a entidades etiquetadas de forma fiable como "CHEMICAL" por el modelo BioBERT.

Desde una perspectiva de ciencia de datos, este comportamiento es consistente con tres causas técnicas probables: (1) el filtro de expresiones regulares basado en sufijos (-al, -ate, -ic, -ine, etc.) es demasiado permisivo y coincide con palabras comunes del inglés científico (p. ej. "chemical", "biological") que no son compuestos; (2) el umbral de score de confianza del pipeline de NER no se está aplicando o es demasiado bajo, permitiendo el paso de entidades con baja probabilidad; y (3) no existe una etapa de post-filtrado contra una lista de stopwords de dominio ni una validación cruzada contra una base léxica de compuestos químicos (p. ej. PubChem, ChEBI) que confirme que la cadena extraída corresponde a un metabolito real.

Estos hallazgos no invalidan la arquitectura del sistema —el pipeline de carga de datos, búsqueda semántica multilingüe y generación bilingüe funciona de extremo a extremo, como muestran las Figuras 1 y 2— pero sí delimitan con precisión la brecha entre el prototipo actual y una versión lista para uso técnico en campo: la fiabilidad de la extracción de metabolitos debe elevarse antes de que las recomendaciones puedan usarse como insumo directo para decisiones de manejo fitosanitario.

Recomendaciones técnicas de mejora

- Aplicar un umbral mínimo de score de confianza (p. ej. ≥ 0.85) a las predicciones del modelo NER y descartar entidades por debajo de ese valor.
- Restringir estrictamente el patrón de sufijos químicos a coincidencias que también aparezcan en un léxico de referencia (PubChem/ChEBI) o en el diccionario curado, en lugar de aceptarlas de forma independiente.
- Incorporar una lista de stopwords de dominio (fungal, biological, chemical, potential, natural, strain, etc.) aplicada como filtro posterior a la unión de las tres fuentes de entidades.



- Evaluar cuantitativamente el NER (precisión/recall/F1) contra un subconjunto de abstracts anotados manualmente por un experto en química de productos naturales.
- Separar en la interfaz los "organismos biocontroladores" (especies fúngicas, parasitoides) de los "metabolitos" propiamente dichos, ya que actualmente ambos tipos de entidad se muestran mezclados en la misma tabla.

Conclusiones

Se desarrolló e implementó exitosamente un prototipo funcional de sistema híbrido de descubrimiento (HDS) que integra modelos tipo BERT para NER químico y búsqueda semántica multilingüe dentro de una aplicación Streamlit de uso interactivo, capaz de recibir consultas en español o inglés y responder de forma bilingüe a partir de una base de 254 abstracts científicos. La arquitectura general —carga de datos, indexación semántica, recuperación por similitud y generación de respuesta— quedó validada de forma funcional, confirmando la viabilidad técnica del enfoque propuesto para apoyar la toma de decisiones fitosanitarias basadas en evidencia científica en el contexto de la agricultura mexicana.

Al mismo tiempo, la evaluación de resultados identificó que el módulo de extracción de metabolitos requiere un ajuste de precisión antes de constituir una fuente confiable de recomendaciones técnicas, ya que actualmente prioriza términos genéricos del dominio por encima de nombres específicos de compuestos. Se recomienda una siguiente iteración centrada en el refinamiento del filtrado de entidades y en su validación cuantitativa, manteniendo la fortaleza ya demostrada del sistema en la búsqueda semántica bilingüe y en la usabilidad de la interfaz para personal técnico agrícola no angloparlante.

Literatura citada

- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2018). BERT: Pre-training of deep bidirectional Transformers for language understanding. En *arXiv [cs.CL]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>
- Lee, J., Yoon, W., Kim, S., Kim, D., Kim, S., So, C. H., & Kang, J. (2020). BioBERT: a pre-trained biomedical language representation model for biomedical text mining. *Bioinformatics* (Oxford, England), 36(4), 1234–1240. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz682>
- Li, J., Sun, Y., Johnson, R. J., Sciaky, D., Wei, C.-H., Leaman, R., Davis, A. P., Mattingly, C. J., Wiegers, T. C., & Lu, Z. (2016). BioCreative V CDR task corpus: a resource for



chemical disease relation extraction. *Database: The Journal of Biological Databases and Curation*, 2016, baw068. <https://doi.org/10.1093/database/baw068>

Reimers, N., & Gurevych, I. (2019). Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks. En *arXiv [cs.CL]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10084>

Tiedemann, J., & Thottingal, S. (2020). OPUS-MT – Building open translation services for the World. *European Association for Machine Translation Conferences/Workshops*, 479–480. <https://aclanthology.org/2020.eamt-1.61.pdf>

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. En *arXiv [cs.CL]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>

Streamlit Inc. (2024). Streamlit Documentation. <https://docs.streamlit.io>

Hugging Face. (2024). Transformers Documentation. <https://huggingface.co/docs/transformers>

Wolf, T., Debut, L., Sanh, V., Chaumond, J., Delangue, C., Moi, A., Cistac, P., Rault, T., Louf, R., Funtowicz, M., Davison, J., Shleifer, S., von Platen, P., Ma, C., Jernite, Y., Plu, J., Xu, C., Le Scao, T., Gugger, S., ... Rush, A. M. (2019). HuggingFace's transformers: State-of-the-art natural language processing. En *arXiv [cs.CL]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.03771>



Explorando las fronteras de las plantas medicinales mexicanas impulsado por IA: exploración in silico de metabolitos secundarios y bioactividad reportada a partir de literatura científica

Luis Germán López Valdez¹ y Holber Zuleta Prada¹

Mesa: Nuevas perspectivas de Química: de lo molecular a lo global

Resumen

Las plantas medicinales mexicanas constituyen una fuente extraordinariamente rica de metabolitos secundarios con actividad biológica documentada, pero la información permanece dispersa en miles de artículos científicos publicados en inglés, lo que dificulta su consulta sistemática por parte de investigadores hispanohablantes. En este trabajo se presenta el desarrollo y la validación preliminar de "Natural Products & Bioactivity Analyzer", una aplicación web construida sobre el framework Streamlit que integra un modelo Transformer de reconocimiento de entidades nombradas biomédicas (NER), reglas léxicas y químicas complementarias, y un módulo de clasificación semántica de bioactividad basado en contexto, con salida bilingüe (inglés/español). El sistema se alimentó con una base de 1,016 abstracts recuperados de Scopus (1,511 columnas de metadatos bibliográficos) correspondientes a estudios sobre plantas medicinales del centro de México. En una prueba piloto sobre los primeros 100 registros, la aplicación detectó 399 menciones de metabolitos, identificó al menos un metabolito en el 93% de los abstracts y asoció una bioactividad reportada en el 75% de los casos, siendo la actividad antioxidante, antibacteriana, anticancerígena y antiinflamatoria las más frecuentes. Los resultados demuestran que una arquitectura híbrida —Transformer biomédico más reglas de dominio— constituye una estrategia computacionalmente accesible y reproducible para la extracción in silico de conocimiento fitoquímico a partir de literatura no estructurada, sentando las bases para una segunda versión con extracción de relaciones compuesto-actividad, clasificación de familias fitoquímicas y parámetros cuantitativos de bioactividad (IC50, MIC, EC50).

Palabras clave: Plantas medicinales; productos naturales; metabolitos secundarios; minería de texto biomédico; procesamiento de lenguaje natural; reconocimiento de entidades nombradas; bioactividad; Streamlit; inteligencia artificial; México.



Abstract

Mexican medicinal plants represent an exceptionally rich source of secondary metabolites with documented biological activity, yet this knowledge remains scattered across thousands of English-language scientific articles, hindering systematic retrieval by Spanish-speaking researchers. This work presents the development and preliminary validation of the "Natural Products & Bioactivity Analyzer", a Streamlit-based web application that integrates a biomedical Named Entity Recognition (NER) Transformer, complementary lexical and chemical rules, and a context-based semantic bioactivity classification module, with bilingual (English/Spanish) output. The system was fed with a database of 1,016 Scopus-retrieved abstracts (1,511 bibliographic metadata columns) related to medicinal plant studies from central Mexico. In a pilot run over the first 100 records, the application detected 399 metabolite mentions, identified at least one metabolite in 93% of abstracts, and associated a reported bioactivity in 75% of cases, with antioxidant, antibacterial, anticancer and anti-inflammatory activities being the most frequent. The results show that a hybrid architecture — biomedical Transformer plus domain rules — is a computationally accessible and reproducible strategy for the *in silico* extraction of phytochemical knowledge from unstructured literature, laying the groundwork for a second version incorporating compound-activity relation extraction, phytochemical class classification, and quantitative bioactivity parameters (IC50, MIC, EC50).

Keywords: Medicinal plants; natural products; secondary metabolites; biomedical text mining; natural language processing; named entity recognition; bioactivity; Streamlit; artificial intelligence; Mexico.

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola. Correos electrónicos: llopezv@chapingo.mx, hzuletap@chapingo.mx

Introducción

México es reconocido como uno de los países megadiversos del planeta y posee una de las tradiciones etnobotánicas más extensas de América, con miles de especies vegetales empleadas históricamente con fines terapéuticos. Esta riqueza biológica y cultural se refleja



en un volumen creciente de publicaciones científicas que reportan la composición fitoquímica y la actividad biológica de extractos y metabolitos aislados de plantas mexicanas. Sin embargo, dicho conocimiento se encuentra fragmentado en cientos de revistas indexadas, redactado predominantemente en inglés y organizado en forma de texto libre, lo que dificulta su recuperación sistemática, comparación y síntesis.

El procesamiento de lenguaje natural (PLN) y, en particular, los modelos de tipo Transformer entrenados para reconocimiento de entidades nombradas (Named Entity Recognition, NER) en dominios biomédicos, ofrecen hoy una vía computacionalmente accesible para automatizar la lectura y extracción de información estructurada a partir de abstracts científicos. A diferencia de los enfoques puramente basados en expresiones regulares o diccionarios cerrados, estos modelos generalizan mejor ante variaciones morfológicas y sintácticas del lenguaje científico, aunque su precisión aumenta considerablemente cuando se combinan con reglas de dominio específicas para la disciplina de interés, en este caso la química de productos naturales.

En este contexto se desarrolló el presente proyecto: una aplicación web interactiva, construida con Streamlit, que permite a un investigador cargar una base de datos de abstracts (por ejemplo, exportada desde Scopus), y obtener de manera automática los metabolitos y productos naturales mencionados, la bioactividad biológica reportada para cada uno, y el fragmento textual de contexto que sustenta dicha asociación, todo ello con salida bilingüe español/inglés y posibilidad de exploración interactiva y descarga en formato CSV.

Antecedentes

La extracción automatizada de conocimiento fitoquímico a partir de literatura científica se apoya en dos líneas de trabajo previas que convergen en este proyecto: por un lado, el desarrollo de bases de datos curadas de productos naturales, y por otro, el avance de los modelos de lenguaje aplicados a la minería de texto biomédico.

Respecto al primer eje, iniciativas como COCONUT (COLleCtion of Open Natural prodUcTs) han demostrado el valor de agregar y curar información dispersa sobre metabolitos secundarios provenientes de decenas de colecciones abiertas, incluyendo su estructura química, organismo de origen y referencias bibliográficas asociadas. Estos esfuerzos evidencian la necesidad —y la viabilidad— de sistematizar el conocimiento fitoquímico disperso en la literatura, aunque suelen depender en gran medida de la curación manual o semiautomática de la información.



Respecto al segundo eje, el desarrollo de modelos de lenguaje preentrenados de tipo Transformer, y en particular de arquitecturas comprimidas como DistilBERT, ha permitido entrenar modelos de reconocimiento de entidades biomédicas que pueden ejecutarse en hardware modesto sin sacrificar de forma importante su desempeño frente a modelos de mayor tamaño. El modelo d4data/biomedical-ner-all, utilizado en este proyecto, es un ejemplo de esta línea: fue entrenado sobre el corpus MACCROBAT para reconocer entidades biomédicas de reportes clínicos, y constituye una base reutilizable para tareas afines, como la identificación de compuestos químicos mencionados en abstracts de productos naturales, aun cuando no fue entrenado específicamente para fitoquímica.

La combinación de ambos enfoques —bases curadas y modelos NER biomédicos de propósito general, complementados con reglas específicas del dominio— es la estrategia que se adopta en el presente trabajo, priorizando la reproducibilidad y el bajo costo computacional sobre la exhaustividad de un pipeline completamente supervisado y entrenado ex profeso, lo cual queda planteado como trabajo futuro.

Materiales y Métodos

Fuente y preparación de los datos

Se utilizó una base de datos bibliográfica exportada desde Scopus (raw_med..._2026.csv) correspondiente a estudios sobre plantas medicinales, compuesta por 1,016 registros y 1,511 columnas de metadatos (autores, afiliaciones, identificadores, título, resumen, entre otros). La aplicación detecta de manera automática la columna que contiene el texto del abstract (columna "Abstract"), sin requerir que el usuario modifique la estructura original del archivo CSV, lo que permite reutilizar exportaciones estándar de bases bibliográficas sin preprocesamiento manual previo.

Arquitectura del sistema

La aplicación se organiza en un pipeline híbrido de cuatro etapas: (1) un modelo Transformer de reconocimiento de entidades biomédicas (NER) aplicado a cada abstract; (2) un conjunto de reglas químicas y léxicas que recuperan metabolitos y productos naturales no capturados correctamente por el NER (por ejemplo, sufijos característicos de flavonoides, terpenoides o alcaloides); (3) un módulo de clasificación semántica de bioactividad basado en patrones léxicos y en el contexto oracional del abstract, que asocia cada metabolito o el estudio en general con una o más actividades biológicas (antioxidante, antibacteriana, anticancerígena, antifúngica, antiinflamatoria, antidiabética, antiparasitaria, antihipertensiva, neuroprotectora,



insecticida, antiviral, inmunomoduladora, herbicida, entre otras); y (4) un módulo de normalización y presentación bilingüe (inglés/español) de resultados.

Como motor de NER se seleccionó el modelo preentrenado d4data/biomedical-ner-all, una arquitectura de clasificación de tokens basada en distilbert-base-uncased y entrenada sobre el corpus MACCROBAT para el reconocimiento de 107 tipos de entidades biomédicas. Se optó por este modelo, y no por arquitecturas orientadas a secuencias proteicas como ESM-2 (familia BioNeMo de NVIDIA), dado que estas últimas están diseñadas para el análisis de secuencias de aminoácidos y no constituyen la opción natural para la extracción de nombres de metabolitos a partir de texto libre en abstracts. El modelo elegido tiene aproximadamente 66 millones de parámetros y un archivo de pesos de alrededor de 266 MB, lo que permite su ejecución local en equipos de cómputo estándar mediante la librería transformers, sin requerir infraestructura especializada.

Implementación técnica

La aplicación fue desarrollada en Python, empleando Streamlit como framework de interfaz web interactiva, y la librería transformers (Hugging Face) para la carga e inferencia del modelo NER, sobre PyTorch como backend de cómputo. El procesamiento de datos tabulares se realizó con pandas y numpy, y la visualización de resultados —incluyendo el histograma de distribución de bioactividades— con Plotly. El entorno de desarrollo se configuró en Windows mediante Visual Studio Code, la consola CMD y un ambiente virtual gestionado con Conda (Python 3.11), documentado en un archivo requirements.txt para garantizar la reproducibilidad de la instalación.

- app.py — interfaz Streamlit, carga de datos, controles de usuario y presentación de resultados.
- analyzer.py — motor de análisis: inferencia NER, reglas químicas, clasificación de bioactividad y normalización.
- requirements.txt — dependencias (streamlit, pandas, numpy, transformers, torch, accelerate, sentencepiece, scikit-learn, openpyxl, plotly).
- cleaned_df.csv — base de abstracts de entrada.

Estrategia de validación piloto

Dado el tamaño de la base completa (1,016 abstracts) y el costo computacional de la inferencia con un modelo Transformer, se adoptó una estrategia de validación incremental: la interfaz permite seleccionar el número de abstracts a analizar (100, 200, 500 o 1,000) mediante un control numérico, en lugar de fijar dicho valor en el código. Para esta primera fase de prueba se procesaron los primeros 100 registros de la base, reconociendo explícitamente que dicha submuestra no es necesariamente representativa del conjunto



completo; se documenta como trabajo futuro la selección de una muestra aleatoria con semilla fija (random_state = 42) para garantizar la reproducibilidad estadística de las validaciones posteriores.

Para cada abstract, el resultado final incluye: los metabolitos detectados, el conteo de metabolitos, las bioactividades asociadas en inglés y en español, el conteo de bioactividades, y el fragmento de contexto original del abstract que sustenta la asociación metabolito-actividad, evitando así afirmaciones descontextualizadas del tipo "compuesto X = actividad Y" cuando en realidad el reporte original se refiere, por ejemplo, a un extracto crudo y no al compuesto aislado.

Resultados y discusión

Carga y reconocimiento automático de la base de datos

Al cargar el archivo CSV, la aplicación reconoció correctamente los 1,016 registros y las 1,511 columnas originales de la exportación de Scopus, e identificó de forma automática la columna "Abstract" como fuente de texto para el análisis (Figura 1), sin necesidad de intervención manual del usuario. El modelo Transformer se cargó exitosamente en el entorno local, confirmando la viabilidad de ejecutar el pipeline de NER biomédico en un equipo de cómputo estándar.

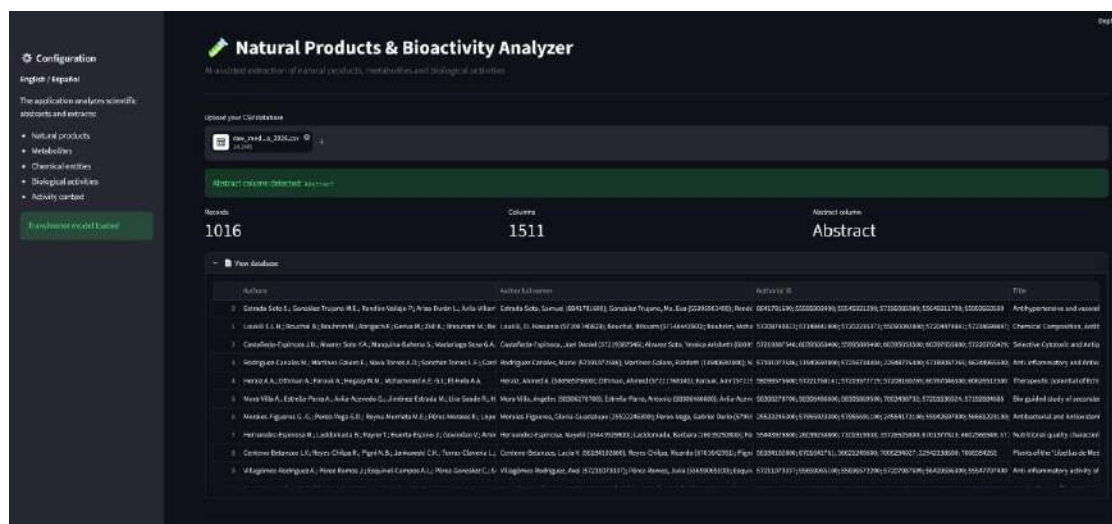


Figura 1. Panel de configuración de la aplicación: carga del CSV, detección automática de la columna de abstracts (1,016 registros, 1,511 columnas) y confirmación de carga del modelo Transformer.

Resultados de la prueba piloto (n = 100)

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Sobre la submuestra de 100 abstracts, el sistema detectó 399 menciones de metabolitos, con al menos un metabolito identificado en 93 de los 100 abstracts analizados (93%) y al menos una bioactividad asociada en 75 casos (75%) (Cuadro 1, Figura 2). Estos resultados sugieren que la combinación de NER Transformer y reglas léxicas complementarias logra una cobertura elevada de menciones fitoquímicas en abstracts de este dominio, aunque —como se discute más adelante— la calidad y precisión de cada mención individual requiere validación experta adicional antes de su uso en publicaciones científicas.

Cuadro 1. Indicadores globales obtenidos en la prueba piloto sobre los primeros 100 abstracts de la base.

Indicador	Valor	Observación
Abstracts totales en la base	1,016	Columna 'Abstract' detectada automáticamente
Columnas originales del CSV	1,511	Metadatos Scopus sin modificar
Abstracts analizados (prueba piloto)	100	Submuestra inicial de validación
Menciones de metabolitos detectadas	399	Entidades NER + reglas léxicas
Abstracts con al menos un metabolito	93 (93%)	Sobre los 100 analizados
Abstracts con bioactividad asociada	75 (75%)	Clasificación contextual

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO

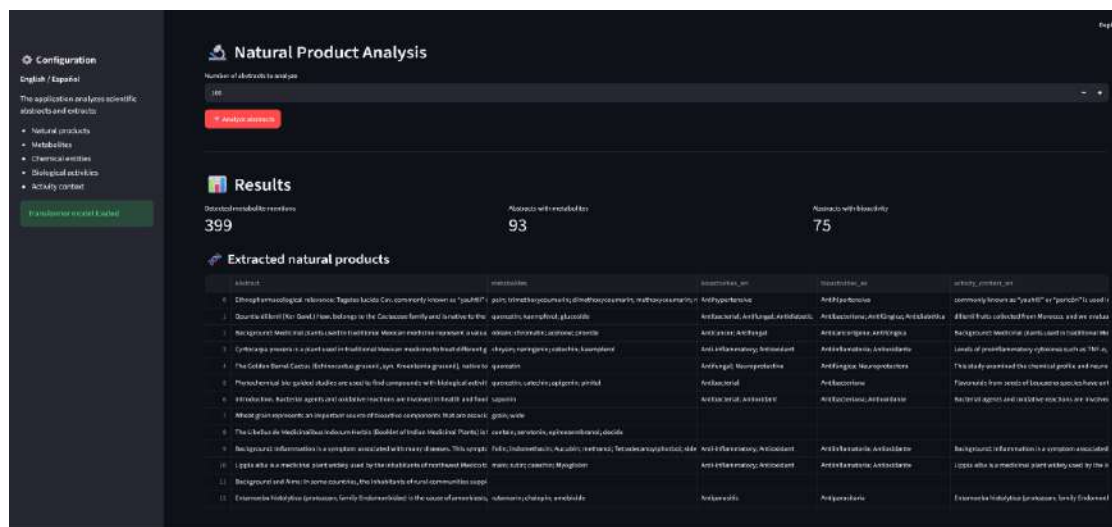


Figura 2. Panel de resultados: conteo de menciones de metabolitos, abstracts con metabolitos, abstracts con bioactividad, y tabla interactiva con metabolitos, bioactividades (EN/ES) y contexto extraído por registro.

Un ejemplo representativo de la salida del sistema es el registro correspondiente a *Opuntia dillenii*, en el que la aplicación identificó los metabolitos quercetina, kaempferol y glucósido, asociados a las bioactividades antibacteriana, antifúngica y antidiabética, conservando además el fragmento textual original que menciona la especie y el país de recolección. Este tipo de trazabilidad —metabolito, actividad y evidencia textual— es, precisamente, el elemento que distingue a este enfoque de una simple extracción de nombres, y responde a la necesidad señalada en los antecedentes de no perder el contexto que sustenta cada afirmación biológica.

Distribución de bioactividades reportadas

El análisis de la distribución de bioactividades (Figura 3) mostró que la actividad antioxidante fue la más frecuentemente reportada, seguida de la actividad antibacteriana, y en menor proporción por las actividades anticancerígena, antiinflamatoria y antifúngica. Actividades como la antidiabética, antiparasitaria, antihipertensiva, neuroprotectora, insecticida, antiviral, inmunomoduladora y herbicida se presentaron con una frecuencia considerablemente menor en esta submuestra inicial (Cuadro 2).

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO

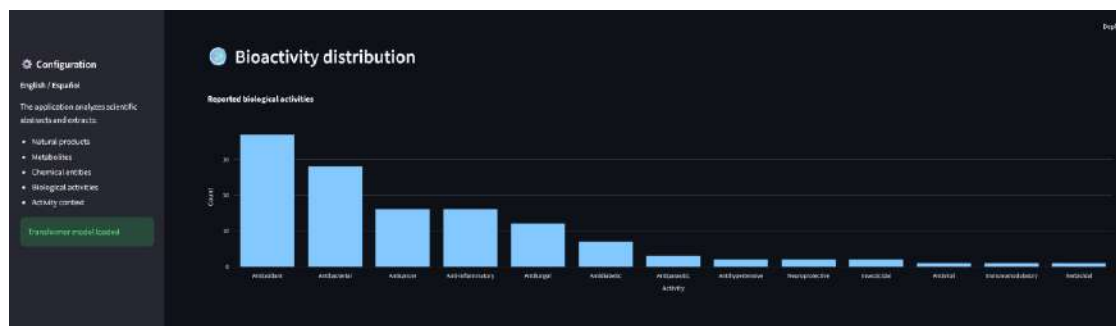


Figura 3. Distribución de bioactividades reportadas detectadas por el sistema en la submuestra de 100 abstracts.

Tabla 2. Frecuencia relativa aproximada de bioactividades detectadas, ordenadas de mayor a menor.

Bioactividad	Frecuencia relativa	Bioactividad	Frecuencia relativa
Antioxidante	~37	Antibacteriana	~28
Anticancerígena	~16	Antiinflamatoria	~16
Antifúngica	~12	Antidiabética	~8
Antiparasitaria	~4	Antihipertensiva	~3
Neuroprotectora	~3	Insecticida	~2
Antiviral	~2	Inmunomoduladora	~1
Herbicida	~1		

Este predominio de la actividad antioxidante y antibacteriana es consistente con lo reportado de forma amplia en la literatura fitoquímica de plantas mexicanas, en la que los compuestos fenólicos y flavonoides —frecuentemente asociados a estas actividades— constituyen una de las clases de metabolitos secundarios más estudiadas. La menor frecuencia relativa de



actividades como la antiviral o la inmunomoduladora podría reflejar tanto una menor prevalencia real de este tipo de estudios en la submuestra analizada, como una menor sensibilidad del módulo de clasificación semántica ante formulaciones textuales menos estandarizadas para dichas actividades; distinguir entre ambas explicaciones requiere ampliar el análisis a la totalidad de los 1,016 abstracts.

Exploración interactiva y descarga de resultados

La interfaz incluye un módulo de filtrado interactivo por tipo de bioactividad (Figura 4), que permite al usuario seleccionar una actividad biológica de interés (por ejemplo, "Anti-inflammatory") y visualizar de forma inmediata el subconjunto de registros correspondiente, junto con los metabolitos, bioactividades en ambos idiomas y el contexto textual asociado. Para el caso de la actividad antiinflamatoria, el sistema recuperó 16 registros dentro de la submuestra de 100 abstracts. Finalmente, la totalidad de los resultados —incluyendo las columnas originales del CSV más las columnas generadas por el análisis— puede descargarse en formato CSV mediante un botón dedicado, lo que facilita su incorporación a flujos de trabajo posteriores de análisis estadístico o cheminformático.

	metabolites	bioactivities_en	bioactivities_es	activity_context_en
01	acetylcholinesterase, norepinephrine, acetylcholinesterase, histamine, histamine	Anticancer, Antiviral, Antibacterial, Anti-inflammatory	Anticancerígena, Antiviral, Antibacteriana, Antiinflamatoria	Biological evaluation of seven isolated compounds evidenced a modest
02	as a "main" is a: main, this, procombining, quercetin, containing, control	Anti-inflammatory, Antioxidant	Antiinflamatoria, Antioxidante	The Cado-Cao-Badano, from 1950, described it as the main ingredient
03	DC, (NED), core, pain, norepinephrine, histamine, histamine, histamine	Anticancer, Anti-inflammatory, Immunomodulatory	Anticancerígena, Antiinflamatoria, Inmunomoduladora	In traditional medicine, particularly in Mexico and other parts of Central
04	of anthocyanins, obtain, anthocyanins, main, delphinidin, pelargonidin, malvidin, protein, glucoside	Anti-inflammatory	Antiinflamatoria	This study aimed to obtain purified anthocyanin fractions from native B
05	M.H. Shale is a Med. disclosed hydrofluorocarbon, isobutane, n-butane, isobutane, isobutane	Anti-inflammatory, Anticancer, Antidiabetic, Antihypertensive	Antiinflamatoria, Anticancerígena, Antidiabética, Antihipertensiva	Shale is a Mexican extract used in traditional medicine by some indigenous
06	a novel source of: coumarin	Anticancer, Anti-inflammatory, Antioxidant, Antidiabetic	Anticancerígena, Antiinflamatoria, Antioxidante, Antidiabética	In SH-SY5Y neuroblastoma cells, it exhibited strong antioxidant effects
07	control of diverse: pain, formula, isobutane, isobutane, isobutane, isobutane, isobutane	Anti-inflammatory	Antiinflamatoria	Aim of the study: To give practical evidence about the pharmacological
08	anti-inflammatory, anti-inflammatory, anti-inflammatory, anti-inflammatory	Anticancer, Antibacterial, Anti-inflammatory, Antioxidant	Anticancerígena, Antibacteriana, Antiinflamatoria, Antioxidante	The current research focused on the chemical characterization of the pl
09	damage and type: vitamin, vitamin, vitamin, vitamin, vitamin, vitamin, vitamin	Anticancer, Anti-inflammatory	Anticancerígena, Antiinflamatoria	The inflammatory process, although beneficial, can produce tissue dan
10	need, a weed, the: isobutane, protein, albumin, globulin, isobutane, isobutane, isobutane	Anticancer, Anti-inflammatory, Antioxidant	Anticancerígena, Antiinflamatoria, Antioxidante	In India, it has been used traditionally to treat vesicular calculus, inflam

Figura 4. Módulo de exploración por bioactividad: filtrado interactivo (ejemplo: actividad antiinflamatoria, 16 registros) y botón de descarga de resultados completos en CSV.

Limitaciones



Los resultados aquí presentados corresponden a una prueba piloto sobre el 10% de la base total (100 de 1,016 abstracts) y no necesariamente representativa, por lo que deben interpretarse como una prueba de concepto y no como una caracterización fitoquímica definitiva del corpus completo. Asimismo, el sistema actual no distingue de manera robusta entre una actividad biológica evaluada experimentalmente en el propio estudio, una actividad reportada previamente en la literatura y citada por el autor, y un compuesto aislado sin evaluación biológica asociada, lo que puede introducir falsos positivos en la asociación metabolito-bioactividad. Tampoco se realiza todavía una clasificación de los metabolitos en clases fitoquímicas (flavonoides, alcaloides, terpenoides, etc.) ni una extracción estructurada de parámetros cuantitativos de bioactividad (IC50, MIC, EC50) o del organismo diana, elementos que se abordan como líneas de mejora en la sección de conclusiones.

Conclusiones

Se desarrolló y validó preliminarmente una aplicación web bilingüe basada en un modelo Transformer biomédico (d4data/biomedical-ner-all) combinado con reglas químicas y léxicas, capaz de extraer de forma automática metabolitos secundarios y su bioactividad reportada a partir de abstracts científicos sobre plantas medicinales mexicanas, sin requerir modificación de la estructura original de la base bibliográfica de entrada.

En la prueba piloto sobre 100 abstracts, el sistema identificó 399 menciones de metabolitos, con cobertura en el 93% de los registros y asociación de bioactividad en el 75% de los casos, siendo las actividades antioxidante, antibacteriana, anticancerígena y antiinflamatoria las más frecuentemente reportadas. Estos resultados confirman la viabilidad técnica del enfoque híbrido NER + reglas de dominio como herramienta de apoyo a la revisión sistemática de literatura fitoquímica, especialmente para investigadores hispanohablantes que requieren consultar resultados en su idioma.

Como trabajo futuro se identifican cuatro líneas prioritarias de mejora: (1) extender el análisis a la totalidad de los 1,016 abstracts, idealmente sobre una muestra aleatoria con semilla fija para garantizar reproducibilidad estadística; (2) incorporar clasificación automática de los metabolitos en clases fitoquímicas (flavonoides, terpenoides, alcaloides, esteroides, cumarinas, entre otras); (3) desarrollar un módulo de extracción de relaciones (compuesto→actividad, compuesto→organismo diana, compuesto→mecanismo, compuesto→IC50/MIC/EC50) que distinga explícitamente entre evidencia experimental propia, evidencia citada de trabajos previos y compuestos sin evaluación biológica; y (4) incorporar un módulo de consulta bilingüe en lenguaje natural que permita a los usuarios



formular preguntas en español sobre una base de literatura en inglés. En conjunto, estas mejoras permitirían transitar de un prototipo funcional de extracción de entidades hacia una herramienta de inteligencia fitoquímica con mayor rigor científico, adecuada para apoyar la publicación de resultados de investigación.

Literatura citada

- d4data. (2023). biomedical-ner-all [Modelo de reconocimiento de entidades nombradas biomédicas basado en DistilBERT, entrenado sobre el corpus MACCROBAT]. Hugging Face. <https://huggingface.co/d4data/biomedical-ner-all>
- Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J., & Wolf, T. (2019). DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. En *arXiv [cs.CL]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.01108>
- Wolf, T., Debut, L., Sanh, V., Chaumond, J., Delangue, C., Moi, A., Cistac, P., Rault, T., Louf, R., Funtowicz, M., Davison, J., Shleifer, S., von Platen, P., Ma, C., Jernite, Y., Plu, J., Xu, C., Le Scao, T., Gugger, S., ... Rush, A. M. (2020). Transformers: State-of-the-Art Natural Language Processing. Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations, 38–45. Association for Computational Linguistics.
- MACCROBAT2018 [Conjunto de datos de reportes clínicos anotados con entidades biomédicas]. (2020). Figshare. <https://figshare.com/articles/dataset/MACCROBAT2018/9764942>
- Sorokina, M., Merseburger, P., Rajan, K., Yirik, M. A., & Steinbeck, C. (2021). COCONUT online: Collection of Open Natural Products database. Journal of Cheminformatics, 13, 2. <https://doi.org/10.1186/s13321-020-00478-9>
- Chandrasekhar, V., Rajan, K., Kanakam, S. R. S., Sharma, N., Weißenborn, V., Schaub, J., & Steinbeck, C. (2025). COCONUT 2.0: A comprehensive overhaul and curation of the collection of open natural products database. Nucleic Acids Research, 53(D1), D634–D643. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae1063>
- Streamlit Inc. (2024). Streamlit documentation. <https://docs.streamlit.io>
- Pandas Development Team. (2024). pandas: powerful Python data analysis toolkit. <https://pandas.pydata.org>

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Plotly Technologies Inc. (2024). Plotly Python graphing library. <https://plotly.com/python/>

Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T., Lin, Z., Gimelshein, N., Antiga, L., Desmaison, A., Köpf, A., Yang, E., DeVito, Z., Raison, M., Tejani, A., Chilamkurthy, S., Steiner, B., Fang, L., ... Chintala, S. (2019). PyTorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.

Elsevier B.V. (2024). Scopus [Base de datos bibliográfica]. <https://www.scopus.com>



Callogénesis *in vitro* de tomate híbrido 2305 F1 a partir de explantes de tallo

Imelda Rueda-López¹, María Cristina Guadalupe López-Peralta^{1,2}, Fernando Carlos Gómez-Merino¹, Manuel Sandoval-Villa^{1,3}

Mesa 4. Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) representa un recurso hortícola fundamental en la economía y la seguridad alimentaria global, es considerado una de las especies hortícolas más relevantes. El cultivo de tejidos vegetales constituye una herramienta de interés para el establecimiento de sistemas de regeneración y propagación *in vitro* de especies de importancia agrícola. El objetivo de este estudio fue evaluar la proliferación de callos de tomate híbrido 2305 F1 a partir de explantes de tallo bajo diferentes combinaciones de fitorreguladores. La inducción de callos se hizo a partir de explantes de tallo obtenidos de plántulas cultivadas *in vitro* de 30 días de edad, utilizando el medio Murashige y Skoog (1962) suplementado con 8.88 μM 6-benciladenina (BA) y 0.57 μM ácido indol-3-acético (AIA). Posteriormente, para la etapa de proliferación, se estableció un diseño completamente al azar con dos tratamientos y 10 repeticiones. Los tratamientos consistieron en 8.88 μM BA + 0.57 μM AIA y 0.88 μM BA + 4.52 μM 2,4-D. Después de 30 días de cultivo se determinó la proliferación neta y el índice de crecimiento del callo. El tratamiento con 8.88 μM BA + 0.57 μM AIA presentó la mayor proliferación neta, con **3.13 g**, y un índice de crecimiento de **626.29%**, mientras que el tratamiento con 0.88 μM BA + 4.52 μM 2,4-D alcanzó **2.20 g** y **440.24%**, respectivamente. Estos resultados indican que, bajo las condiciones *in vitro* evaluadas, la combinación de BA y AIA favoreció una mayor acumulación de biomasa callosa en el tomate híbrido 2305 F1.

Palabras clave: biotecnología, callo, auxinas, citocininas, *in vitro*

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Fisiología Vegetal, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264. rueda.imelda@colpos.mx; fernandg@colpos.mx

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Genética, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264. cristy@colpos.mx



³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Edafología, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264. smanuel@colpos.mx

Abstract

The tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a fundamental horticultural resource for the global economy and food security, and is considered one of the most important horticultural species. Plant tissue culture is a valuable tool for establishing *in vitro* regeneration and propagation systems for agriculturally important species. The objective of this study was to evaluate callus proliferation in the hybrid tomato 2305 F1 using stem explants under various combinations of plant growth regulators. Callus induction was initiated using stem explants from 30-day-old *in vitro* seedlings, cultured on Murashige and Skoog (1962) medium supplemented with 8.88 μM 6-benzyladenine (BA) and 0.57 μM indole-3-acetic acid (IAA). Subsequently, a completely randomized design with two treatments and 10 replicates was established for the proliferation stage. The treatments consisted of 8.88 μM BA + 0.57 μM IAA and 0.88 μM BA + 4.52 μM 2,4-D. After 30 days of culture, net proliferation and the callus growth index were determined. Significant differences were observed between treatments. The treatment with 8.88 μM BA + 0.57 μM IAA showed the highest net proliferation (3.13 g) and a growth index of 626.29%, whereas the treatment with 0.88 μM BA + 4.52 μM 2,4-D reached 2.20 g and 440.24%, respectively. These results indicate that, under the *in vitro* conditions evaluated, the combination of BA and IAA favored greater callus biomass accumulation in the 2305 F1 hybrid tomato.

Keywords: biotechnology, callus, auxins, cytokinins, *in vitro*

Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las especies hortícolas de mayor importancia económica y alimentaria a nivel mundial. Perteneció a la familia Solanaceae y se caracteriza por una amplia diversidad de formas de crecimiento, características de fruto y adaptación a diferentes sistemas de producción. El fruto presenta variación en tamaño, forma, color, firmeza, sabor y composición química, atributos que han sido modificados mediante procesos de domesticación y mejoramiento genético para satisfacer diferentes requerimientos productivos y de consumo (Pelletier y Causse, 2024). Entre sus atributos de interés destaca la presencia de diversos compuestos bioactivos como carotenoides (licopeno, β -caroteno y luteína), tocoferoles, flavonoides, antocianinas y vitamina C, los cuales contribuyen a su valor nutricional y funcional (Bajon *et al.*, 2026).

El tomate además de constituir un cultivo de interés para estudios de mejoramiento y biotecnología vegetal. Su relevancia como especie cultivada y modelo experimental ha impulsado el desarrollo de herramientas de cultivo de tejidos vegetales *in vitro* orientadas a la obtención de materiales con características agronómicas y de calidad mejoradas. En este



contexto, la regeneración eficiente de plantas *in vitro* constituye un componente fundamental para diversas estrategias de mejoramiento biotecnológico (Yaroshko *et al.*, 2023).

Las auxinas y las citocininas constituyen dos de los principales grupos de reguladores del crecimiento vegetal o fitorreguladores que desempeñan funciones esenciales en diversos procesos del desarrollo de las plantas. La interacción entre ambas está determinada por sus patrones de síntesis, transporte y distribución a lo largo del organismo vegetal, generando gradientes hormonales que regulan el comportamiento y destino de las células. En términos generales, las auxinas se producen principalmente en tejidos jóvenes de la parte aérea, mientras que las citocininas se sintetizan predominantemente en las raíces y son transportadas hacia la parte aérea. La interacción entre ambas hormonas constituye un mecanismo fundamental para la regulación del crecimiento y desarrollo vegetal. Aunque pueden actuar de manera sinérgica en procesos como la división celular, también presentan efectos antagónicos en procesos como la ramificación de tallos y raíces. Por ello, el equilibrio entre auxinas y citocininas tiene un papel determinante en la respuesta morfogénica de los tejidos vegetales y, particularmente, en procesos como la formación y proliferación de callos *in vitro* (Romanov, 2022).

Mediante el uso de fitorreguladores, la callogénesis permite inducir la formación de callo a partir de un explante bajo condiciones de cultivo *in vitro*. El establecimiento del callo implica cambios en el estado de diferenciación de las células del explante, seguidos de su inducción y proliferación bajo condiciones favorables de cultivo. Aunque tradicionalmente el callo se ha descrito como una masa de células vegetales sin diferenciar, actualmente se reconoce que su formación implica procesos de reprogramación celular y que los tejidos callogénicos pueden presentar diferentes grados de organización y potencial morfogénico (Ikeuchi *et al.*, 2013; Fehér, 2019).

La importancia de la callogénesis radica en que constituye una etapa fundamental para el establecimiento de sistemas de regeneración vegetal, ya que el tejido callogénico puede dar lugar a brotes y plantas completas mediante procesos de organogénesis o embriogénesis somática. Asimismo, los cultivos de callo tienen aplicaciones en biotecnología vegetal, entre ellas la propagación y regeneración de genotipos de interés, así como el establecimiento de sistemas para la producción de metabolitos secundarios (Fehér, 2019; Yaroshko *et al.*, 2023). Con base en lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo inducir la callogénesis *in vitro* en explantes de tallo del tomate híbrido 2305 F1 mediante el uso de diferentes combinaciones de fitorreguladores (BA, AIA y 2,4-D).

Materiales y Métodos

Ubicación

La presente investigación se estableció en el Laboratorio de Biotecnología Agrícola del Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad - Genética ubicado en el edificio José D.



y citocininas (Cuadro 1). Los cultivos se incubaron durante 30 días bajo las condiciones ambientales previamente descritas.

Cuadro 1. Concentraciones de 6-benciladenina (BA), y ácidos indol-3-acético (AIA) y 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) evaluadas (os) en la proliferación *in vitro* de callos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.).

Tratamiento (Número)	Citocinina (BA, μM)	Auxinas (AIA/2,4-D, μM)
1	8.8	0.57
2	0.88	4.52

Variables evaluadas

Después de 30 días de incubación, los callos se retiraron cuidadosamente del medio de cultivo y se determinó su peso de biomasa fresca final. A partir del peso de la biomasa fresca inicial y final se calculó la proliferación (crecimiento) neta del callo (ΔW) y el índice de crecimiento (IG).

La proliferación (crecimiento) neta del callo se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta W(g) = W_f - W_i$$

Donde:

ΔW = Proliferación (crecimiento) neta del callo (g)

W_i = Peso de biomasa fresca inicial del callo (g)

W_f = Peso de biomasa fresca final del callo (g)

El índice de crecimiento se calculó mediante:

$$IG(\%) = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100$$

Donde:

IG = Índice de crecimiento (%)

W_i = Peso de biomasa fresca inicial del callo (g)

W_f = Peso de biomasa fresca final del callo (g)

Diseño experimental

El experimento se estableció mediante un diseño completamente al azar (DCA), con dos tratamientos (1 y 2) y 10 repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue un frasco de cultivo de vidrio de 45 mL de capacidad conteniendo 10 mL de medio de cultivo MS y un callo con un peso de biomasa fresca inicial de 0.5 g.



Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el software Statistical Analysis System (SAS Institute, 2009), versión 9.4.

Resultados y discusión

La proliferación (crecimiento) neta de los callos presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento 1 alcanzó un crecimiento de aproximadamente 3.13 g, mientras que el tratamiento 2 registró un valor de 2.2 g, lo que representa un incremento de 42.27% en el tratamiento 1 respecto al tratamiento 2 (Figura 1). Esta diferencia también se observó visualmente en el desarrollo de los callos al finalizar el periodo de cultivo (Figura 2).

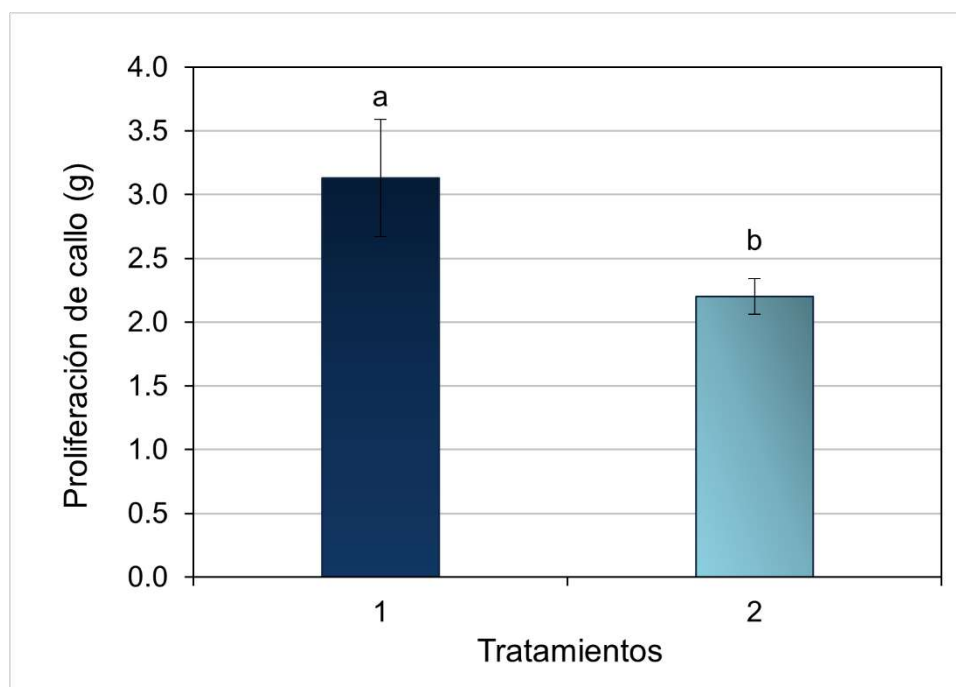


Figura 1. Proliferación neta de callos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido 2305 F1 después de 30 días de cultivo *in vitro* bajo los tratamientos 1 (8.88 μ M BA + 0.57 μ M AIA) y 2 (0.88 μ M BA + 4.52 μ M 2,4-D). Las medias $\pm$ DE con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

La respuesta observada en el crecimiento neto de callo fue consistente con el comportamiento del índice de crecimiento. El tratamiento 1 (8.88 μ M BA + 0.57 μ M AIA) presentó un índice



de 626.29%, mientras que en el tratamiento 2 (0.88 μ M BA + 4.52 μ M 2,4-D) fue de 440.24%, evidenciando una mayor acumulación relativa de biomasa en el primer tratamiento con BA+AIA (Figura 3).

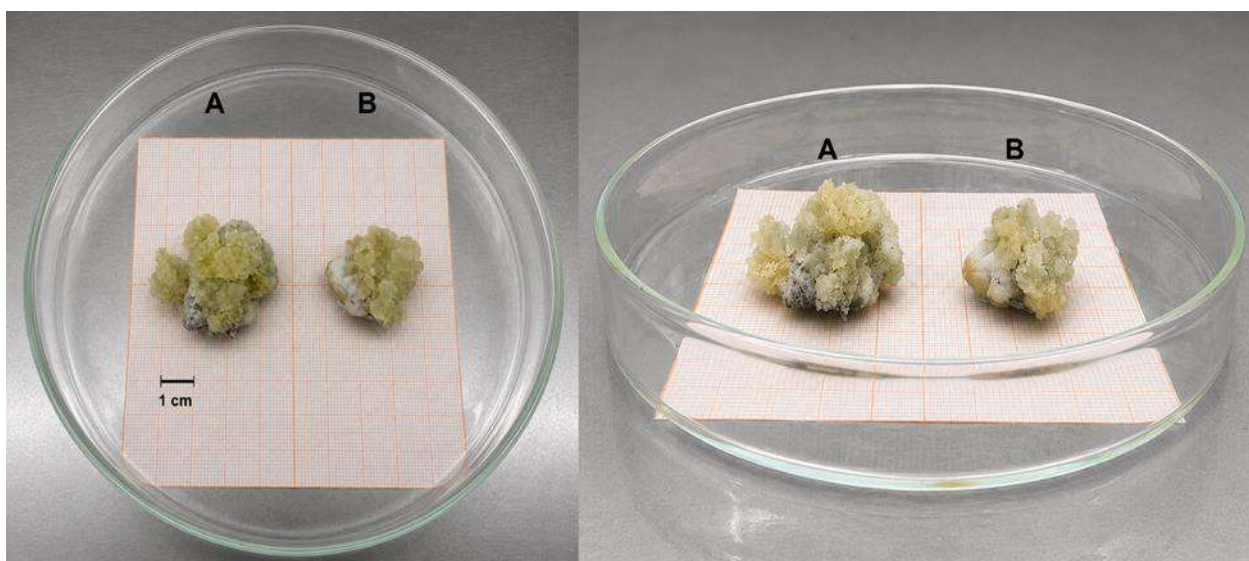


Figura 2. Morfología de callos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido 2305 F1 a los 30 días de cultivo *in vitro*. Tratamientos: (A) 8.88 μ M BA + 0.57 μ M AIA; (B) 0.88 μ M BA + 4.52 μ M 2,4-D. Se muestran en Izquierda: vista superior; derecha: vista lateral. Barra de escala: 1 cm.

La mayor acumulación de biomasa observada en el tratamiento 1 está relacionada con la combinación de reguladores del crecimiento utilizada (BA + AIA), en comparación con el tratamiento 2, que contenía BA + 2,4-D. La respuesta morfogénica de los callos *in vitro* está influenciada por diversos factores, entre ellos el tipo de explante, la concentración y combinación de fitoreguladores, la fuente de carbono y las condiciones de cultivo *in vitro* (Sidik *et al.*, 2024). En este sentido, la interacción entre auxinas y citocininas desempeña un papel importante en la regulación de la división y proliferación celular, por lo que la proporción entre ambos grupos de fitoreguladores puede modificar la respuesta del tejido cultivado.

En tomate, se ha documentado que diferentes combinaciones y concentraciones de BA, AIA y 2,4-D generan respuestas diferenciales durante la inducción y proliferación del tejido calloso (Mammadova *et al.*, 2022). En tomate cultivares M82 y Micro-Tom, Yaroshko *et al.* (2023) observaron que las condiciones de fitoreguladores utilizados durante el cultivo *in vitro* influyeron en la formación de callo y en la posterior regeneración de brotes, además de evidenciar diferencias en la respuesta entre genotipos. Estos resultados respaldan la



importancia de establecer combinaciones específicas de fitoreguladores para cada material vegetal.

Por otra parte, el 2,4-D es uno de los fitoreguladores más utilizados para la inducción de callo, particularmente por su capacidad para promover procesos de proliferación celular y reprogramación de tejidos vegetales. Sin embargo, su utilización no implica necesariamente que produzca la mayor acumulación de biomasa en todas las condiciones de cultivo. Un estudio realizado en tomate Cherry cv. 'Kesar' de Punjab, evaluó diferentes combinaciones de BA y 2,4-D en explantes foliares, nodales e internodales. Los autores observaron que 0.25 mg L⁻¹ de 2,4-D produjo la mayor inducción de callo en segmentos nodales (83.33%), mientras que la respuesta varió de acuerdo con el tipo de explante y la concentración empleada (Kumari *et al.*, 2024). Estos resultados muestran que la respuesta al 2,4-D depende de las condiciones específicas del sistema de cultivo *in vitro* y que una mayor inducción de callo no necesariamente se traduce en una mayor acumulación de biomasa.

Bajo las condiciones evaluadas en este estudio, la combinación de 8.88 µM BA + 0.57 µM AIA favoreció una mayor acumulación de biomasa callosa en el híbrido de tomate 2305 F1 en comparación con 0.88 µM BA + 4.52 µM 2,4-D. La mayor respuesta del tratamiento 1 sugiere que esta combinación proporcionó un balance hormonal más favorable para la proliferación del tejido calloso. Sin embargo, este resultado no permite atribuir el efecto exclusivamente al AIA o al 2,4-D, debido a que los tratamientos también difirieron en la concentración de BA. Por lo tanto, la respuesta observada debe interpretarse como el efecto de las combinaciones de los fitoreguladores evaluados.

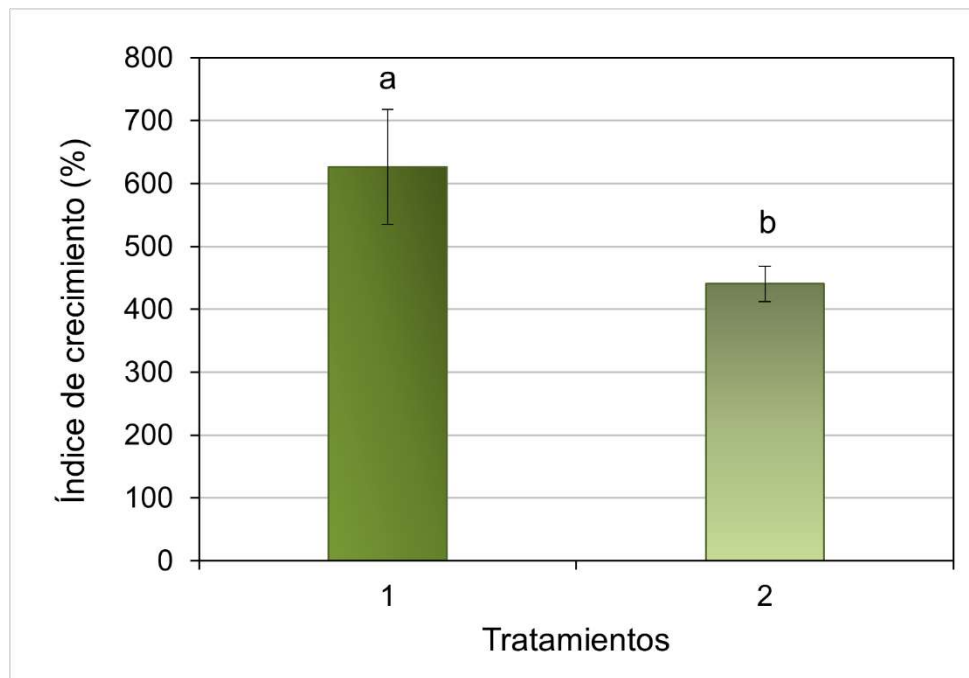




Figura 3. Índice de crecimiento de callos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido 2305 F1 después de 30 días de cultivo *in vitro* bajo los tratamientos 1 (8.88 μ M BA + 0.57 μ M AIA) y 2 (0.88 μ M BA + 4.52 μ M 2,4-D). Las medias $\pm$ DE con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Conclusiones

El tratamiento 1 (8.88 μ M BA + 0.57 μ M AIA) favoreció una mayor acumulación de biomasa callosa del tomate híbrido 2305 F1 en comparación con el tratamiento 2 (0.88 μ M BA + 4.52 μ M 2,4-D), bajo las condiciones *in vitro* evaluadas.

Debido a que los tratamientos difirieron simultáneamente en la concentración de BA y en el tipo y concentración de auxina, la diferencia observada no puede atribuirse a un fitorregulador individual. Se requieren evaluaciones adicionales de diferentes concentraciones y combinaciones de estos fitorreguladores para determinar su contribución específica y establecer condiciones óptimas para la proliferación del callo en el tomate híbrido 2305 F1.

Literatura citada

- Bajon, A., Kidoñ, M., & Kobus-Cisowska, J. (2026). Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) as a Source of Bioactive Compounds: Functional Properties and Technological Aspects—A Review. *Nutrients*. 18(13): 2084. <https://doi.org/10.3390/nu18132084>
- Fehér, A. (2019). Callus, dedifferentiation, totipotency, somatic embryogenesis: what these terms mean in the era of molecular plant biology?. *Frontiers in Plant Science*. 10, 536. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00536>
- Ikeuchi, M., Sugimoto, K., & Iwase, A. (2013). Plant callus: Mechanisms of induction and repression. *The Plant Cell*. 25(9): 3159–3173. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.116053>
- Kumari, A., Nagpal, A. K., & Katnoria, J. K. (2024). Potential of some explants for callus induction and plantlet regeneration in *Solanum lycopersicum* L. under treatment of different plant growth regulators. *Biotechnologia*. 105(3): 227–247. <https://doi.org/10.5114/bta.2024.141803>
- Mammadova, M. H., Hasanova, H. K., & Ismailova, G. I. (2022). Influence of different concentrations and combinations of cytokinins and auxins on the proliferation of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) callus tissue. *Transactions of the Institute of Molecular Biology & Biotechnologies*. 6(2): 33–37. <https://doi.org/10.30546/2709-0752.6.2.2022.33>
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 15(3): 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Pelletier, G., & Causse, M. (2024). Tomato domestication and breeding. In: G. Pelletier (ed.). *Genetics of Domestications*. Wiley: New York. <https://doi.org/10.1002/9781394332519.ch12>

15^o CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- Romanov, G. A. (2022). Perception, transduction and crosstalk of auxin and cytokinin signals. *International Journal of Molecular Sciences*. 23(21): 13150. <https://doi.org/10.3390/ijms232113150>
- SAS. (2009). Base SAS® 9.4 Procedures Guide: Statistical Procedures, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Sidik, N. J., Agha, H. M., Alkamil, A. A., Alsayadi, M. M. S., & Mohammed, A. A. (2024). A Mini review of plant tissue culture: The role of media optimization, growth regulators in modern agriculture, callus induction and the applications. *AUIQ Complementary Biological System*. 1(2): 96-109. <https://doi.org/10.70176/3007-973X.1019>
- Yaroshko, O., Pasternak, T., Larriba, E., & Pérez-Pérez, J. M. (2023). Optimization of callus induction and shoot regeneration from tomato cotyledon explants. *Plants*. 12(16): 2942. <https://doi.org/10.3390/plants12162942>



estándar consiste en la resección quirúrgica máxima seguida de radioterapia concomitante con temozolomida y quimioterapia adyuvante. Sin embargo, el pronóstico de los pacientes continúa siendo desfavorable, con una supervivencia media de aproximadamente 15 meses (Alifieris & Trafalis, 2015). La alta capacidad infiltrativa del tumor, su marcada heterogeneidad molecular y la rápida adquisición de resistencia a la temozolomida favorecen la supervivencia de las células tumorales y contribuyen a la recurrencia de la enfermedad. Entre los mecanismos asociados con esta resistencia se encuentran la sobreexpresión de la enzima O6-metilguanina-ADN

metiltransferasa (MGMT), la activación de mecanismos de reparación del ADN, la presencia de células madre tumorales y la adaptación metabólica de las células cancerosas, lo que resalta la necesidad de desarrollar nuevas alternativas terapéuticas (Brandner et al., 2021).

En este contexto, los productos naturales han adquirido gran relevancia como fuente de moléculas bioactivas para el desarrollo de nuevos fármacos. Las plantas medicinales mexicanas han sido utilizadas tradicionalmente para el tratamiento de diversas enfermedades y numerosos estudios han demostrado que poseen propiedades antiinflamatorias, antibacterianas, hipoglucemiantes, antioxidantes, antiproliferativas y antitumorales. Además, diversos compuestos de origen vegetal, como la vinblastina, la vincristina, el paclitaxel y la camptotecina, han sido incorporados exitosamente al tratamiento de distintos tipos de cáncer, demostrando el potencial terapéutico de los metabolitos vegetales (Gezici & Şekeroğlu, 2019).

Entre las especies de interés destacan las cactáceas, plantas adaptadas a condiciones ambientales extremas que favorecen la síntesis y acumulación de una amplia diversidad de compuestos bioactivos, entre ellos alcaloides, flavonoides, terpenos y taninos (Harlev et al., 2013). Estos compuestos han mostrado diversas actividades biológicas, incluyendo efectos antioxidantes, antiinflamatorios, antimicrobianos y antitumorales. En particular, especies del género *Echinocereus* han mostrado resultados prometedores debido a la presencia de compuestos con potencial actividad biológica. Sin embargo, la evidencia sobre su actividad antitumoral frente a tumores del sistema nervioso aún es limitada. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la actividad citotóxica de extractos metanólicos de *Echinocereus engelmannii* y *Echinocereus pectinatus* en líneas celulares de tumores del sistema nervioso, con el fin de identificar especies con potencial para el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas.

Materiales y Métodos

Material vegetal.

Las cactáceas se obtuvieron del “Vivero Ortiz” ubicada en la ciudad de Chihuahua, Chih. México el 21 de agosto del 2021. Estas fueron taxonómicamente identificadas por el herbario de la Facultad de Ciencias Biológicas en la Universidad Autónoma de Nuevo León con el número de váucher 25608 para *E. pectinatus* y 25607 para *E. engelmannii*.



Extractos metanólicos de *E. engelmannii* y *E. pectinatus*.

Después de lavar el material vegetal, se realizaron cortes al tallo, los cuales se sometieron a un protocolo de desinfección que consistió en inmersión en hipoclorito de sodio al 12% por tres minutos, seguido por agua estéril por 1 min, etanol al 70% por 3 min, agua estéril por 1 min y PBS 1× por 1 min. Posteriormente se secó y se maceró para obtener un polvo.

Para la obtención de los extractos, se colocaron 200 g de la planta en frascos de vidrio, a los cuales se les agregó metanol absoluto. Posteriormente los extractos se filtraron utilizando papel Whatman #1. Los filtrados se concentraron en un rotavapor (Buchi R-3000; Brinkman Instruments, Inc., USA).

El rendimiento de extracción para cada uno de los extractos se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{(\text{Peso del extracto seco})}{(\text{Peso del material vegetal})} \times 100$$

Todos los extractos concentrados fueron esterilizados mediante filtración, utilizando membranas de nitrocelulosa con un tamaño de poro de 0.2 µm, y se almacenaron a 4 °C hasta su posterior uso.

Líneas y cultivos celulares

Se utilizaron las células de glioblastoma U87 (ATCC HTB-14), células de neuroblastoma SH-SY5Y (ATCC CRL-2266) y como control sano células neuronales tipo Schwann (ATCC CRL-3392). Se mantuvieron en medio de cultivo DMEM (medio Eagle modificado de Dulbecco; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), suplementado con 10 % de suero fetal bovino (SFB; Life Technologies) que fue previamente inactivado con calor y 1% de solución antibiótica-antimicótica (Sigma Aldrich). Las condiciones de crecimiento fueron de 37 °C y 5% de CO₂ en una atmósfera con humedad.

Evaluación de la inhibición del crecimiento

Se incubaron en microplacas de 96 pozos con fondo plano (Corning Incorporated, Corning, NY, USA) 190 µL de suspensiones celulares de las líneas U87, SH-SY5Y y células de Schwann a una concentración de 1 × 10⁴ células/pozo en medio DMEM. Después del tiempo de incubación de 24 h se adicionaron los extractos metanólicos a manera de tratamiento a concentraciones de 31.25 y 250 µg/mL para una selección inicial y posteriormente se realizó una curva de concentraciones de 15.625 hasta 250 µg/mL para el extracto de *E. engelmannii*. Se utilizó como control positivo paclitaxel a 0.1 µM y como control negativo medio de cultivo sin tratamiento. Las placas se incubaron durante 48 h a 37 °C y 5% de CO₂ en una atmósfera húmeda. La viabilidad celular se determinó mediante el método de 3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5-diphenyltetrazoliumbromide (MTT; Affymetrix, Cleveland, OH,



USA); se adicionaron 15 μ L de MTT a cada pozo a una concentración final de 0.5 mg/mL y se incubó durante 3 h a las condiciones ya mencionadas, pasado este tiempo las placas se decantaron y se agregaron 150 μ L de DMSO para la disolución de cristales de formazan, la densidad óptica (DO) se midió a 570 nm en un lector de microplacas (MULTISKAN GO; Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, US). El porcentaje de inhibición se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ inhibición del crecimiento} = 100 - \left(\frac{DO_{570} \text{ células tratadas}}{DO_{570} \text{ células sin tratar}} \right) \times 100$$

Una vez obtenido el porcentaje de inhibición se realizaron los cálculos correspondientes para la obtención de la concentración inhibitoria media (IC_{50}) en el programa GraphPad Prism 8y el índice de selectividad (IS) utilizando la siguiente fórmula:

$$IS = \frac{IC_{50} \text{ células no tumorales (Schwann)}}{IC_{50} \text{ tumorales (U87 o SH - S5Y5)}}$$

Actividad antioxidante por ensayo de DPPH

Se incubaron 100 μ L de los extractos obtenidos en una placa de 96 pozos de fondo plano a concentraciones de 15.625 a 250 μ g/mL y se agregó 100 μ L de una solución metanólica de 2,2-diphenyl-1-picrilhidrazil 0.1 mM (DPPH). Como control negativo se utilizó DMSO y como control positivo ácido ascórbico a concentraciones de 10 a 100 μ g/mL. Se incubó en oscuridad a temperatura ambiente durante 30 min para después medir la DO a 517 nm (cita). El porcentaje de inhibición de DPPH se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ inhibición DPPH} = \frac{DO_{517} \text{ control negativo} - DO_{517} \text{ tratamiento}}{DO_{517} \text{ control negativo}} \times 100$$

Actividad hemolítica

Se obtuvieron 20 mL de sangre de un voluntario sano en tubos con anticoagulante ácido etilendiaminotetraacético (EDTA; BD, Vacutainer®). Los eritrocitos fueron recuperados de la sangre y se realizó un lavado con Buffer Salino de Fosfatos (PBS) a un pH de 7.2 en 3 ocasiones para después preparar una suspensión de eritrocitos al 5% en PBS. En tubos de 2 mL se agregaron las concentraciones a evaluar (200 a 1000 μ g/mL) y se adicionó la suspensión de eritrocitos previamente preparada. Como control positivo se utilizó agua destilada y como control negativo PBS. Las muestras se incubaron por 30 min a 37 °C, transcurrido este tiempo se centrifugaron durante 5 min a 13,000 rpm a 4 °C. Se tomaron 200 μ L de sobrenadante de cada tubo y se pasaron a una placa de 96 pozos de fondo plano para medir la DO de la hemoglobina liberada a 540 nm en un lector de microplacas (cita). El porcentaje de hemólisis se calculó mediante la siguiente fórmula:



$$\% \text{ hemolisis} = \frac{DO_{540} \text{ tratamiento} - DO_{540} \text{ control negativo}}{DO_{540} \text{ control positivo} - DO_{540} \text{ control negativo}} \times 100$$

Resultados y discusión

El glioblastoma es el tumor maligno primario del sistema nervioso central más frecuente y agresivo en adultos. A pesar de que el tratamiento estándar basado en cirugía, radioterapia y quimioterapia con temozolomida ha permitido mejorar el manejo clínico de la enfermedad, la elevada heterogeneidad tumoral, la resistencia farmacológica y los efectos adversos asociados continúan limitando la supervivencia de los pacientes. Por ello, la búsqueda de nuevas alternativas terapéuticas ha adquirido gran relevancia, incluyendo el estudio de compuestos derivados de fuentes naturales. Diversas cactáceas han sido investigadas debido a la presencia de compuestos bioactivos con potencial farmacológico, como el opuntiol y el peniocerol.

De ambas cactáceas se obtuvieron extractos metanólicos a partir de 500 g de tejido vegetal pulverizado. Para *E. engelmannii* se obtuvieron 48 g de extracto seco, correspondiente a un rendimiento de extracción del 9.6 %. Por otro lado, *E. pectinatus* presentó un rendimiento de extracción del 17.2 %, con la obtención de 86 g de extracto seco a partir de la misma cantidad de material vegetal.

En el presente estudio se obtuvieron extractos metanólicos de *Echinocereus engelmannii* y *Echinocereus pectinatus*, observándose diferencias en el rendimiento de extracción entre ambas especies. Aunque *E. pectinatus* presentó un mayor rendimiento de extracción, este parámetro no se relacionó directamente con una mayor actividad biológica, ya que *E. engelmannii* mostró un mayor efecto citotóxico en las líneas celulares evaluadas. Esto sugiere que la cantidad de extracto obtenido no necesariamente determina la presencia o concentración de compuestos responsables de la actividad biológica.

Posteriormente, se evaluó el efecto de los extractos metanólicos sobre la viabilidad celular de las líneas U87, SH-SY5Y y células de Schwann mediante el ensayo MTT. Como evaluación preliminar de la actividad citotóxica, se analizaron dos concentraciones de ambos extractos (31.25 y 250 µg/mL) (Figuras 1 y 2). Bajo estas condiciones, el extracto de *E. engelmannii* presentó el mayor efecto citotóxico, principalmente sobre la línea celular SH-SY5Y. En contraste, *E. pectinatus* mostró una menor actividad citotóxica, con porcentajes de inhibición aproximados de 15 % y 40 % a las concentraciones de 31.25 y 250 µg/mL, respectivamente.



El análisis preliminar de citotoxicidad en las líneas celulares U87, SH-SY5Y y células de Schwann mostró una mayor actividad del extracto de *E. engelmannii* en comparación con *E. pectinatus*, observándose una mayor sensibilidad en la línea celular SH-SY5Y. Un comportamiento similar ha sido reportado para compuestos naturales como el bacósido A, obtenido de *Bacopa monnieri*, el cual ha mostrado actividad citotóxica en esta línea celular, con porcentajes de inhibición cercanos al 60 % (Fatima et al., 2022). Debido al mayor potencial observado para *E. engelmannii*, se determinó su concentración inhibitoria media (IC_{50}) y su índice de selectividad (IS), considerando la línea SH-SY5Y como modelo tumoral y las células de Schwann como modelo no tumoral. El extracto presentó una IC_{50} de $58.29 \pm 1.09 \mu\text{g/mL}$ y un IS de 2.7.

Debido a la mayor sensibilidad observada para el extracto de *E. engelmannii* en la línea celular SH-SY5Y, se realizó una curva dosis-respuesta para determinar la concentración inhibitoria media (IC_{50}) y el índice de selectividad (IS). El extracto presentó una IC_{50} de $58.29 \pm 1.09 \mu\text{g/mL}$ y un índice de selectividad de 2.7. Asimismo, se evaluó la actividad antioxidante mediante el ensayo DPPH y la actividad hemolítica del extracto, cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 2. Evaluación del extracto de *E. engelmannii*

Microorganismo	<i>E. engelmannii</i>
Línea célula evaluada	SH-SY5Y
IC_{50}^*	58.29 ± 1.09
IS	2.7
DPPH*	>250
Hemolisis*	>250

* $\mu\text{g/mL}$

Un índice de selectividad superior a 2 indica que un extracto presenta potencial farmacológico para continuar con procesos de fraccionamiento y caracterización de los compuestos responsables de la actividad biológica (Indrayanto et al., 2021). Asimismo, un mayor índice de selectividad incrementa el interés biológico de un extracto debido a que sugiere un mayor efecto sobre células tumorales en comparación con células no tumorales (Mansour et al., 2022). En este sentido, los resultados obtenidos para *E. engelmannii* sugieren la presencia de compuestos con actividad citotóxica selectiva, los cuales podrían ser evaluados posteriormente mediante procesos de separación e identificación química.

Adicionalmente, el extracto de *E. engelmannii* fue evaluado mediante el ensayo DPPH para determinar su capacidad antioxidante, obteniéndose un valor de IC_{50} superior a $250 \mu\text{g/mL}$. Se ha reportado que extractos con valores de $IC_{50} \leq 50 \mu\text{g/mL}$ presentan una actividad antioxidante relevante (García-Palencia et al., 2021) ; por lo tanto, bajo las condiciones evaluadas, el extracto no mostró una capacidad antioxidante significativa. Sin embargo, la ausencia de actividad antioxidante no descarta su potencial antitumoral, ya que los



mecanismos asociados a la citotoxicidad pueden estar relacionados con diferentes vías celulares independientes de la actividad antioxidante.

Por otra parte, la evaluación hemolítica mostró un valor de IC₅₀ superior a 250 µg/mL, indicando ausencia de actividad hemolítica detectable bajo las condiciones evaluadas. Este resultado es relevante debido a que permite identificar extractos con menor interacción citotóxica hacia membranas celulares no tumorales y proporciona información preliminar sobre su biocompatibilidad (Ramírez-Villalobos et al., 2021).

En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que *Echinocereus engelmannii* representa una fuente prometedora de compuestos bioactivos con potencial citotóxico frente a modelos celulares tumorales del sistema nervioso, particularmente en la línea SH-SY5Y, además de presentar selectividad celular y ausencia de actividad hemolítica. Estudios posteriores enfocados en la identificación de los compuestos responsables y la determinación de los mecanismos moleculares involucrados permitirán establecer con mayor precisión su potencial como candidato para el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas.

Conclusiones

Los extractos metanólicos de *Echinocereus engelmannii* y *Echinocereus pectinatus* representan una fuente potencial de compuestos bioactivos con actividad citotóxica frente a modelos celulares tumorales del sistema nervioso. Particularmente, *E. engelmannii* destaca como una especie de interés para la búsqueda de nuevos agentes antitumorales derivados de cactáceas mexicanas.

Literatura citada

- Alifieris, C., & Trafalis, D. T. (2015). Glioblastoma multiforme: Pathogenesis and treatment. *Pharmacology & Therapeutics*, 152, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2015.05.005>
- Brandner, S., McAleenan, A., Kelly, C., Spiga, F., Cheng, H.-Y., Dawson, S., Schmidt, L., Faulkner, C. L., Wragg, C., Jefferies, S., Higgins, J. P. T., & Kurian, K. M. (2021). MGMT promoter methylation testing to predict overall survival in people with glioblastoma treated with temozolomide: a comprehensive meta-analysis based on a Cochrane Systematic Review. *Neuro-Oncology*, 23(9), 1457–1469. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noab105>
- Fatima, U., Roy, S., Ahmad, S., Ali, S., Elkady, W. M., Khan, I., Alsaffar, R. M., Adnan, M., Islam, A., & Hassan, M. I. (2022). Pharmacological attributes of *Bacopa monnieri* extract: Current updates and clinical manifestation. In *Frontiers in Nutrition* (Vol. 9). <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.972379>
- García-Palencia, P., Rivas-Morales, C., Oranday-Cárdenas, A., de la Garza-Ramos, M. A., Leos-Rivas, C., & López, E. T. (2021). Evaluation of the Anti-inflammatory and Cytotoxic



- Activity of Methanol Extracts of *Psacalium decompositum* and *Scopulophyla parryi* in VERO and Detroit Cell. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, 1, 51–59.
- Gezici, S., & Şekeroğlu, N. (2019). Current Perspectives in the Application of Medicinal Plants Against Cancer: Novel Therapeutic Agents. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, 19(1), 101–111. <https://doi.org/10.2174/1871520619666181224121004>
- Harlev, E., Nevo, E., Solowey, E., & Bishayee, A. (2013). Cancer Preventive and Curative Attributes of Plants of the Cactaceae Family: A Review. *Planta Medica*, 79(09), 713–722. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1328632>
- Indrayanto, G., Putra, G. S., & Suhud, F. (2021). *Validation of in-vitro bioassay methods: Application in herbal drug research* (pp. 273–307). <https://doi.org/10.1016/bs.podrm.2020.07.005>
- INEGI, 2024, Estadísticas de defunciones registradas (EDR), *Sitio web*, disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/EDR/EDR2023_Dtivas.pdf
- International Agency Research on Cancer, WHO. Global Cancer Observatory (GLOBOCAN), 2026, *Sitio web* disponible en: https://gco.iarc.who.int/tomorrow/en/dataviz/isotype?single_unit=10000&years=2025&cancers=31&types=1
- Mansour, K. A., El-Neketi, M., Lahloub, M.-F., & Elbermawi, A. (2022). Nanoemulsions of *Jasminum humile* L. and *Jasminum grandiflorum* L. Essential Oils: An Approach to Enhance Their Cytotoxic and Antiviral Effects. *Molecules*, 27(11), 3639. <https://doi.org/10.3390/molecules27113639>
- Ramírez-Villalobos, J. M., Romo-Sáenz, C. I., Morán-Santibañez, K. S., Tamez-Guerra, P., Quintanilla-Licea, R., Orozco-Flores, A. A., Romero-Arguelles, R., Tamez-Guerra, R., Rodríguez-Padilla, C., & Gomez-Flores, R. (2021). In Vitro Tumor Cell Growth Inhibition Induced by *Lophocereus marginatus* (DC.) S. Arias and Terrazas Endophytic Fungi Extracts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9917. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189917>
- Wirsching, H.-G., Galanis, E., & Weller, M. (2016). *Glioblastoma* (pp. 381–397). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802997-8.00023-2>



Evaluación de la capacidad antioxidante de extractos de semilla de guayaba (*Psidium guajava* L.)

Sara Suárez Torres¹, Lino Joel Reyes Trejo ¹, Benito Reyes Trejo², Yunuhe Abigail
Velázquez Pérez¹

Mesa: 4 Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

Se realizaron pruebas de actividad antioxidante por el método FRAP y ABTS y cuantificación de compuestos fenólicos totales por el método de Folin-Ciocalteu a extractos obtenidos a partir de semillas de guayaba (*Psidium guajava* L.) mediante extracción asistida por ultrasonido de forma continua (baño ultrasónico) y por pulsos (sonda ultrasónica) con cuatro disolventes diferentes. Se mostró la mayor concentración de fenoles totales (5.37 mg de EAG/g) con etanol y ultrasonido por sonda ultrasónica y un tiempo de 75 minutos. El valor mayor de la actividad antioxidante (342.01 μ MET/g) fue con metanol mediante sonda ultrasónica y un tiempo de 60 minutos. Así como una mayor capacidad antioxidante (Mediante ABTS 0.46 μ mol ET/g) con etanol y sonda ultrasónica con un tiempo de 75 minutos. Esto representa una capacidad antioxidante que puede ser empleada como aditivo antioxidante en alimentos.

Palabras clave: Guayaba, antioxidantes, ultrasonido.

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de. Química, miztisuarez@gmail.mx, linoj23@quimica.unam.mx;

²Universidad Autónoma de Chapingo, benijovi@yahoo.com.mx



El uso de las semillas de guayaba para extraer antioxidantes naturales es una estrategia eficaz. Esto permite aprovechar los residuos agroindustriales y crear ingredientes funcionales de alto valor para la industria alimentaria (Mia et al., 2025).

El objetivo de esta investigación fue extraer y cuantificar los polifenoles de las semillas de guayaba para evaluar su capacidad antioxidante al incorporarlos en un aceite comercial, comparando su eficacia contra el deterioro oxidativo frente a un antioxidante sintético.

Valoración de residuos de guayaba (*Psidium guajava* L)

Los subproductos de la industria de la guayaba, como cáscaras, semillas y hojas; contienen antioxidantes, fenoles, péptidos y fibras de gran valor. Mediante técnicas innovadoras, estos residuos pueden transformarse en alimentos funcionales que benefician la salud, la economía y el medio ambiente (Kapoor, Wats & Rani, 2020).

El fruto se aprovecha como jugo, polvo y puré; no obstante, cerca del 30 % se desecha tras el procesamiento. Entre los subproductos destacan las semillas, cuyo desecho continuo genera un impacto ambiental negativo.

Durante el procesamiento de la guayaba, las semillas constituyen un subproducto de hasta el 30 % (p/p) del fruto (Narváez Cuenca et al., 2020). Este residuo posee un alto potencial funcional debido a su contenido de compuestos bioactivos, como fenoles, flavonoides, carotenoides, tocoferoles, fitoesteroles y ácidos grasos esenciales, con gran capacidad antioxidante. Por ello, sus aceites son fuentes alternativas de valor funcional, cuyo aprovechamiento ayuda a disminuir el desperdicio, mitigar la contaminación y mejorar la comercialización (Silva et al., 2022).

Antioxidantes en semillas de guayaba (*Psidium guajava*)

Las semillas de guayaba poseen una compleja composición química rica en bioactivos de interés nutricional y funcional. Entre sus metabolitos secundarios destacan los compuestos fenólicos, reconocidos por su alta capacidad antioxidante (Gayathri et al., 2025).

Del mismo modo, se detectaron flavonoides destacados antioxidantes de origen vegetal y una fracción proteica compuesta por aminoácidos esenciales y no esenciales, sobresaliendo la lisina, la metionina, la leucina y el ácido glutámico (Khan et al., 2025).

Asimismo, el estudio identifica acilgliceroles, mono, di y tri, esteroides y fosfolípidos como fosfatidilcolina, fosfatidiletanolamina y fosfatidilinositol. A esto se suman ácidos grasos saturados e insaturados, destacando los ácidos palmítico, esteárico, oleico, linoleico y linolénico (Khan et al., 2025; Butt et al., 2025; Silva et al., 2022).

Material y Métodos



Rendimientos obtenidos de extracción de compuestos antioxidantes asistida por baño ultrasónico.

Al evaluar el rendimiento de la extracción de polifenoles asistida por ultrasonido, se observó el porcentaje más alto (6.9 %) al utilizar etanol al 96 % durante 45 minutos en baño ultrasónico. Por el contrario, el valor más bajo (1.99 %) se obtuvo con agua como disolvente en un tiempo de 60 minutos. En la mayoría de los tiempos analizados, el etanol y el metanol mostraron un rendimiento similar como los mejores disolventes de extracción (Figura 1).

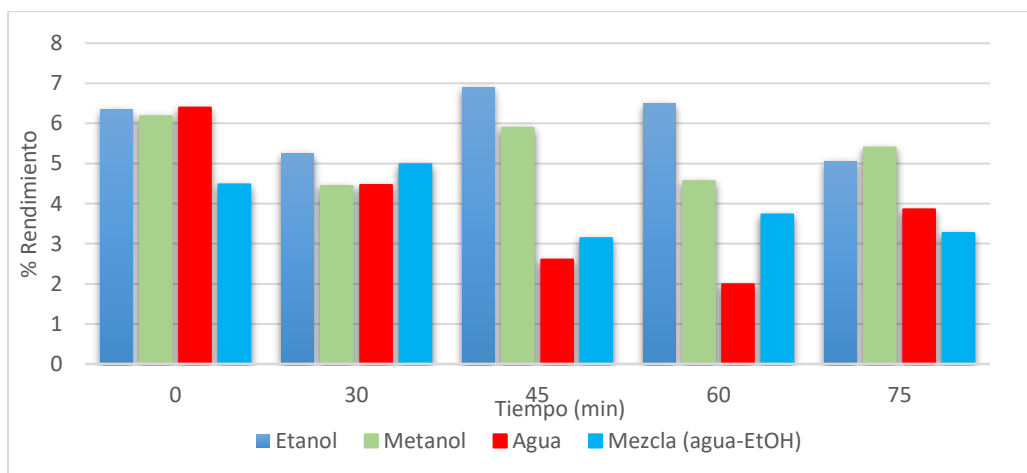


Figura 1. Porcentaje de rendimiento mediante el método asistido por ultrasonido de forma continua (baño ultrasónico).

Rendimientos obtenidos de extracción de compuestos antioxidantes asistida por ultrasonido mediante sonda.

El rendimiento máximo de polifenoles (11.5%) se obtuvo con etanol al 96% durante 60 minutos mediante extracción por ultrasonido con sonda. En contraste, el menor rendimiento se registró al usar agua por 30 minutos.

El metanol y la mezcla agua-etanol (1:1) mostraron rendimientos similares y superiores a los del agua sola, aunque este comportamiento cambió al usar un baño de ultrasonido. Esto demuestra que el tipo de equipo y las condiciones de operación afectan la eficiencia del proceso (ver Figura 2).



Literatura citada

Gayathri, S., Shanmugasundaram, K. A., Auxcilia, J., Shanthi, A., Karthikeyan, M., & Muthuvel, I. (2025). Exploring the nutritional value and therapeutic potential of Guava (*Psidium guajava* L.) seeds and leaves: Bioactive compounds and their industrial applications. *Annals of Phytomedicine an International Journal*, 14(1). <https://doi.org/10.54085/ap.2025.14.1.20>

Kapoor, S., Gandhi, N., Tyagi, S. K., Kaur, A., & Mahajan, B. V. C. (2020). Extraction and characterization of guava seed oil: A novel industrial byproduct. *LWT*, 132, 109882. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109882>

Khan, F. I., Akhtar, S., Qamar, M., Ismail, T., Saeed, W., Esatbeyoglu, T., & Jafari, S. M. (2024). A comprehensive review on guava: Nutritional profile, bioactive potential, and health-promoting properties of its pulp, peel, seeds, pomace and leaves. *Trends in Food Science & Technology*, 156, 104822. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104822>

Narváez-Cuenca, C.-E., Inampues-Charfuelan, M.-L., Hurtado-Benavides, A.-M., Parada-Alfonso, F., & Vincken, J.-P. (2020). The phenolic compounds, tocopherols, and phytosterols in the edible oil of guava (*Psidium guava*) seeds obtained by supercritical CO₂ extraction. *Journal of Food Composition and Analysis*, 89, 103467. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103467>

Silva, L. M. R. da, Figueiredo, E. A. T. de, Ricardo, N. M. P. S., Vieira, I. G. P., Figueiredo, R. W. de, Brasil, I. M., & Gomes, C. L. (2014). Quantification of bioactive compounds in pulps and by-products of tropical fruits from Brazil. *Food Chemistry*, 143, 398–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.001>



Variación de compuestos bioactivos en productos fermentados a partir de residuos vegetales

Natalia Rodríguez Salazar², Salvador Valle Guadarrama³, Ma. Ángeles Romero Rodríguez⁴,
Ofelia Sandoval Castilla⁵, Guillermina Hernández Rodríguez⁶

Mesa: Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global

Resumen

El interés en la recuperación de compuestos bioactivos a partir de residuos vegetales se ha incrementado en los últimos años debido a la necesidad de reducir el impacto ambiental, económico y social que estos causan. Estos residuos son fuentes prometedoras de ingredientes bioactivos, incluyendo compuestos fenólicos, péptidos, terpenos, celulosa y hemicelulosa. La explotación de estos subproductos puede ofrecer oportunidades de valor agregado en las industrias alimentaria, farmacéutica y de biocombustibles. En este estudio se evaluaron las variaciones de compuestos bioactivos en la fermentación de residuos vegetales. Con la fermentación se favoreció la transferencia de compuestos fenólicos de la matriz vegetal a la fase acuosa del sistema (106.12 μg EAG/mL al día 10 de fermentación), así como la producción de etanol (7 %).

Palabras Clave: Compuestos fenólicos, residuos vegetales, subproductos, fermentación alcohólica

¹ Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México C.P. 56230, México.

¹ Laboratorio de atmósferas controladas y modificadas. Departamento de ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México C.P. 56230, México.

¹ Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología. Universidad de Santiago de Compostela, España.

¹ Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo.



¹ Área de Química, Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo.
Correos: al25610172@chapingo.mx, svalleg@chapingo.mx

Abstract

Interest in recovering bioactive compounds from fruit and vegetables waste has increased in recent years due to the need to reduce the environmental, economic, and social impact of such waste. This waste is a promising source of bioactive ingredients, including phenolic compounds, peptides, terpenes, cellulose, and hemicellulose. Exploiting these byproducts can offer value-added

opportunities in the food, pharmaceutical, and biofuel industries. This study evaluated the variations in bioactive compounds during the fermentation of plant waste. Fermentation favored the transfer of phenolic compounds from the plant matrix to the aqueous phase of the system (106.12 μg EAG/mL on day 10 of fermentation), as well as the production of ethanol (7%).

Keywords: Phenolic compounds, plant residues, by-products, alcoholic fermentation

Introducción

La producción a gran escala de materias primas agrícolas, junto con su transformación en diversos productos finales, da lugar a una generación excesiva de residuos agrícolas e industriales. Los efectos negativos que representa el desperdicio de alimentos se ven reflejados a nivel económico, ambiental y social. Se estima que, al año, en el mundo, se generan alrededor de 931 millones de toneladas de desperdicio de alimentos (United Nations Environment Programme, 2021). Además, el desperdicio en conjunto con las pérdidas de alimentos, son los causantes del 8 al 10% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.

La mayor parte de los residuos de frutas y verduras se desechan, a pesar de que existe evidencia científica de que es material rico en compuestos bioactivos como fibra dietética, proteínas, vitaminas, colorantes, minerales esenciales, antioxidantes, ácidos grasos, entre otros. (Taheri and Hosseini, 2025), por lo que pueden utilizarse en la industria alimentaria, en la producción de fertilizantes orgánicos, cosméticos y productos farmacéuticos (Gonçalves et al., 2025). Valorizar las cáscaras de fruta ofrece una solución ecológica al desperdicio de alimentos, a la vez que permite la producción de alimentos funcionales, nutraceuticos y agentes terapéuticos (Habiba et al., 2025).

Por lo tanto, es importante generar sistemas ambiciosos enfocados en la recuperación de estos compuestos químicos desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental. En este trabajo se aborda la fermentación a partir de una mezcla de residuos vegetales integrada con cáscara de



plátano, cáscara de papaya, manzana y jitomate y se analiza el comportamiento de los compuestos fenólicos al largo del proceso, esto con miras a integrar un sistema de extracción de compuestos bioactivos constituido con un pretratamiento fermentativo como el que aquí se presenta. En este trabajo se establecen las condiciones del proceso de fermentación para la mezcla y se conoce su potencial para producir etanol.

Material y Métodos

Material vegetal

Se trabajó con cáscara de plátano, cáscara de papaya, manzana y jitomate, las cuales fueron adquiridas en un supermercado. Para fines del trabajo se procuró que el material estuviera libre daño físico y microbiológico. El material fue sometido a un proceso de secado a 50 °C, durante 24 h y posteriormente, el material fue molido hasta obtener un polvo

Análisis de extractos

Se analizaron cada uno de los materiales vegetales; se realizaron extractos de cada uno de ellos (Hernández-Rodríguez et al., 2019) para conocer su actividad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos. Brevemente, 1 g de cada muestra (peso seco) se diluyó en 10 mL de metanol:agua (80:20), se acidificó a pH 3 con HCl y NaOH 1 molar. Las muestras líquidas y acidificadas fueron sonicadas en un sonicador *Bransonic* a 40 kHz durante 15 min, posteriormente fueron incubadas a 30 °C durante 30 min, finalmente fueron centrifugadas y se analizaron los sobrenadantes.

Fermentación

Para la fermentación se empleó levadura comercial *RED STAR premier cassique*; se siguieron las instrucciones especificadas por el fabricante para la activación de la levadura, así como la cantidad necesaria a utilizar. De material vegetal se trabajó con una proporción de 1/10 p/v en agua destilada; se emplearon las cantidades reportadas en la Cuadro 1. La mezcla se ajustó a 21 °Brix con sacarosa.

Cuadro 3. Cantidad de material vegetal (peso seco) empleado en la fermentación

Material vegetal	Peso seco (g)
Cáscara de papaya	10
Cáscara de plátano	20
Manzana	30
Jitomate	5

El proceso de fermentación se realizó en condiciones anaerobias, a temperatura ambiente 20 °C, durante 10 días. Se utilizaron trampas de aire para permitir la liberación del dióxido de carbono producido e impedir el ingreso de oxígeno; el reactor también se equipó con una válvula para permitir la toma de muestras diarias. Diariamente se realizó también la mezcla



del contenido del reactor para favorecer el proceso de fermentación y la posible liberación de compuestos fenólicos. Transcurridos 10 días se estabilizó el contenido de °Brix, así como una notable disminución de la actividad en la trampa de aire.

Análisis fisicoquímicos

La medición de pH (con potenciómetro) y °Brix (con refractómetro) se realizaron el mismo día del muestreo. Se congelaron las muestras a -20 °C hasta su análisis. Las muestras descongeladas fueron centrifugadas a 1500 rpm durante 3 min en una centrifuga *Labnet Spectrafuge*, se retiró el pellet y se trabajó con el sobrenadante. A partir del sobrenadante se cuantificaron los azúcares etanol por el método de Sayyad et al. (2015), compuestos fenólicos (Singleton & Rossi, 1965) y la actividad antioxidante mediante ABTS (Re et al., 1999). Todos los análisis se realizaron por triplicado. Al reactor control sólo se midieron los °Brix en cada muestreo.

Resultados y Discusión

Análisis de extractos

En las Figuras 1 y 2 se observa consistencia en la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos en los extractos vegetales. La cáscara de plátano presentó mayor capacidad y contenido de ambas variables, mientras que la manzana fue la muestra con valores menores en ambos casos, esta diferencia entre el contenido de las muestras es consistente con lo reportado por Islam et al. (2023) y da Silva et al. (2021).

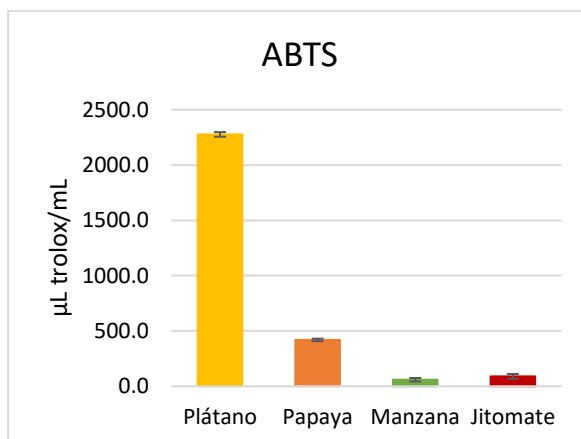


Figura 1. Comparación de la capacidad antioxidante en extractos vegetales. Cada valor es el promedio ($\pm$ DE, desviación estándar) de tres replicas.

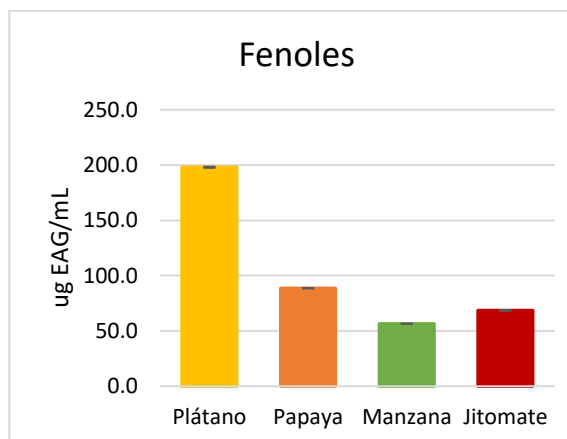


Figura 2. Comparación del contenido de compuestos fenólicos en extractos vegetales. Cada valor es el promedio ($\pm$ DE) de tres replicas.

Consumo de azúcares de producción de etanol

La mezcla de residuos de fruta utilizados para el proceso de fermentación presentó un contenido de sólidos solubles de 6.3 °Brix y pH de 4.5. Sin embargo, para obtener un contenido de etanol relevante, es necesario un contenido de sólidos disponibles más elevado para las levaduras; con la adición de sacarosa se alcanzaron 21°Brix. El pH de la mezcla se mantuvo ligeramente ácido, ideal para mantener estables los compuestos fenólicos, además de prevenir crecimiento de otros microorganismos que no son de interés, como bacterias.

En la Figura 3 muestra el consumo de azúcar y la producción de etanol durante el proceso de fermentación. La cantidad máxima de producción de etanol se alcanzó al día 10 con una producción máxima de 7 % y los °Brix se mantuvieron constantes. Lo cual ocurre porque el microorganismo *Saccharomyces cerevisiae* ha consumido el carbono fermentable presente en el medio (Olivares-Marin et al., 2018).

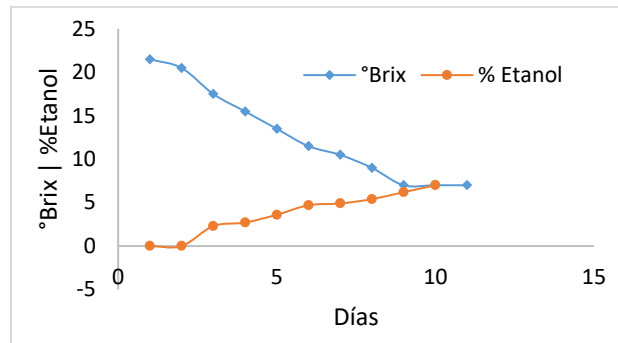


Figura 3. Producción de etanol y consumo de sólidos en el proceso de fermentación de residuos vegetales.

Actividad antioxidante durante el proceso de fermentación

Como se observa en la Figura 4, la actividad antioxidante presentó un aumento a lo largo de los días del proceso de fermentación, de igual manera la concentración de compuestos fenólicos aumentó durante el proceso de fermentación (Figura 5). La producción de etanol durante la fermentación favorece la extracción de los compuestos fenólicos desde la matriz vegetal (Borges et al., 2024).

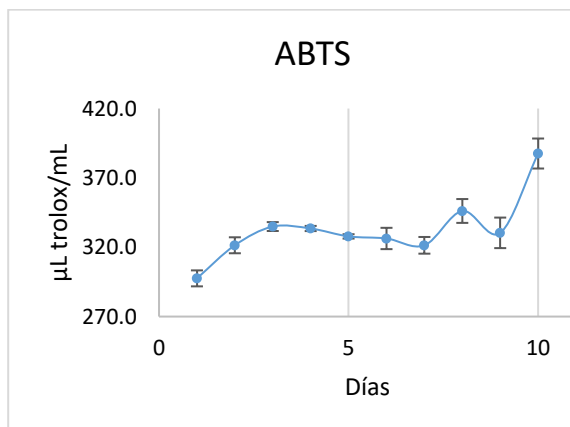


Figura 4. Comportamiento de la actividad antioxidante durante el proceso de fermentación de residuos vegetales. Cada valor es el promedio ($\pm$ DE) de tres replicas.

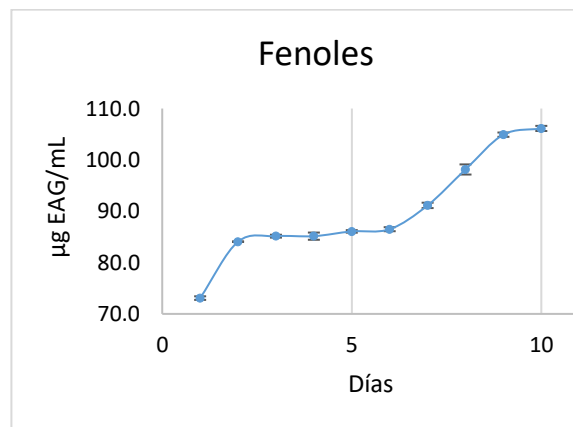


Figura 5. Comportamiento del contenido de compuestos fenólicos durante el proceso de fermentación de residuos vegetales. Cada valor es el promedio ($\pm$ DE) de tres replicas.

Conclusiones

Los resultados del proceso de fermentación, bajo las condiciones trabajadas, confirman que es posible emplear la fermentación alcohólica como pretratamiento en un sistema de



extracción de compuestos fenólicos que favorece la transferencia de los compuestos de interés desde la matriz vegetal hacia la fase acuosa del sistema. A su vez, se obtuvo un 7% de etanol en el proceso de fermentación. En este sentido, el etanol obtenido puede ser utilizado como recurso en una posterior etapa para la constitución de un sistema de extracción acuosa, donde una de las fases para constituir el sistema sea etanol, lo cual representaría una disminución en la necesidad de adquisición del disolvente mencionado.

Literatura citada

- Borges, L. L. R., Freitas, V. V., Nascimento, A. L. A. A., Fernandes, J. G., Kobi, H. de B., Eller, M. R., Barros, F. A. R. de, de Souza, L. Â., Castro, G. A. D., de Carvalho, A. F., Bezerra, J. de A., Fernandes, S. A., Bressan, G. C., Martins, E., Campelo, P. H., & Stringheta, P. C. (2024). Enhancement of phenolic compounds bioaccessibility in jabuticaba wine through fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Food and Bioproducts Processing*, 148, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.09.009>
- da Silva, L. C., Viganó, J., de Souza Mesquita, L. M., Dias, A. L. B., de Souza, M. C., Sanches, V. L., Chaves, J. O., Pizani, R. S., Contieri, L. S., & Rostagno, M. A. (2021). Recent advances and trends in extraction techniques to recover polyphenols compounds from apple by-products. *Food Chemistry: X*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100133>
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Gonçalves, J., Anjos, O., & Guiné, R. P. F. (2025). A Revisit of Plant Food Waste Along Food Supply Chains: Impacts and Perspectives. *Foods*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/foods14081364>
- Habiba, U., Singh, R., Pathare, P. B., Dar, A. H., Manzoor, M., Sidiqi, U. S., & Majeed, T. (2025). Exploring the bioactive potential of fruit peels: A comprehensive Review. In *Food Chemistry Advances* (Vol. 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101136>
- Hernández Rodríguez, G., Guerra-Ramírez, D., Hernández Rodríguez, G., Espinosa- Solares, T., Perez-Lopez, A., & Salgado-Escobar, I. (2019). Antioxidant capacity of capulin (*Prunus serotina* subsp. *capuli* (Cav). McVaugh) fruit at different stages of ripening. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(16), 35–44. <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1947>
- Islam, M. R., Kamal, M. M., Kabir, M. R., Hasan, M. M., Haque, A. R., & Hasan, S. M. K. (2023). Phenolic compounds and antioxidants activity of banana peel extracts: Testing and optimization of enzyme-assisted conditions. *Measurement: Food*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2023.100085>
- Olivares-Marin, I. K., González-Hernández, J. C., Regalado-Gonzalez, C., & Madrigal-Perez, L. A. (2018). *Saccharomyces cerevisiae* exponential growth kinetics in batch culture to analyze respiratory and fermentative metabolism. *Journal of Visualized Experiments*, 2018(139). <https://doi.org/10.3791/58192>

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Original Contribution ANTIOXIDANT ACTIVITY APPLYING AN IMPROVED ABTS RADICAL CATION DECOLORIZATION ASSAY. *Free Radical Biology & Medicine*, 26, 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Sayyad, S. F., Chaudhari, S. R., Panda, B. P., Ali Sayyad, S. F., & Professor, A. (2015). Quantitative determination of ethanol in arishta by using UV-visible spectrophotometer. 204 *PHARMACEUTICAL AND BIOLOGICAL EVALUATIONS* October, 2(5).
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3). <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Taheri, S., & Hosseini, S. S. (2025). Waste not, want not: Comprehensive valorization of fruit and vegetable waste from single-product recovery to zero-waste strategies. In *Cleaner Waste Systems* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100300>
- United Nations Environment Programme. (2021). *FOOD WASTE INDEX REPORT 2021*.



³Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México–Texcoco km 38.5, Chapingo, 56230, Texcoco de Mora, Estado de México. benijovi@yahoo.com.mx

Abstract

For organic chemistry students, understanding reaction mechanisms is often difficult because they must visualize invisible, abstract processes in three dimensions, combining electron movement, thermodynamics, and reaction kinetics. Many simultaneously influencing variables must be memorized, such as steric effects, electronegativity, intermediate stability, and solvents. Molecular modeling helps overcome this by transforming theoretical concepts into tangible visual representations or dynamic simulations, describing potential energy profiles, and visually identifying the transition state or the rate-determining step of the reaction. Considering the above, the present work proposes the use of [Gaussian 16](#) and [GaussView 6](#) to calculate and visualize in 3D the pathway of several common reactions in organic chemistry, employing the animation of the imaginary frequency of the transition state and the intrinsic reaction coordinate (IRC).

Keywords: Computational chemistry, Experimental chemistry, Active learning

Introducción

La enseñanza de la Química Orgánica presenta desafíos didácticos complejos, ya que exige al estudiante vincular los fenómenos macroscópicos con el entorno submicroscópico de átomos y moléculas (Arias, et al, 2011). Ante esto, la química computacional (QC) ofrece recursos fundamentales para modelar y predecir geometrías moleculares, energías relativas y propiedades electrónicas, lo que facilita la comprensión de la reactividad molecular (Esselman y Hill, 2016). En la actualidad, el uso de software con interfaces gráficas avanzadas como GaussView, Avogadro y Spartan, facilita la visualización de estas reacciones. En la Facultad de Química de la UNAM, donde la Química Orgánica es un pilar en diversos planes de estudio, la QC puede enriquecer significativamente la formación académica de los estudiantes, su integración permite modelar estados de transición, analizar la reactividad y selectividad e interpretar con mayor precisión los datos experimentales del laboratorio. Asimismo, esta disciplina faculta el cálculo de descriptores moleculares para predecir tendencias físicas y la simulación de espectros de IR y RMN como soporte analítico.

Con respecto al aprendizaje de los mecanismos de las reacciones orgánicas, se han observado dificultades en su comprensión debido a la exigencia de visualizar procesos tridimensionales submicroscópicos a nivel molecular y combinar conceptos abstractos de energía y densidad electrónica. Por lo tanto, se vuelve necesario sustituir el aprendizaje memorístico de reacciones individuales por el análisis lógico de los mecanismos de reacción basados en el flujo de electrones (Shen et al, 2023).

Existen sitios en internet que permiten visualizar en 3D y en tiempo real las trayectorias de reacciones orgánicas como Chem Tube3D para dar una idea rápida del paso de reactivos a productos al mostrar el movimiento de los átomos involucrados. Sin embargo, solo observar una animación no basta para obtener un aprendizaje profundo de una reacción. Modelar la reacción con química computacional



mejora mucho su comprensión porque permite calcular los perfiles de energía exactos de la reacción y hace posible buscar y comprobar los estados de transición animando su frecuencia imaginaria. Por otro lado, el cálculo de la coordenada intrínseca de la reacción (IRC), permite dar certeza del mecanismo al conectar el estado de transición con los reactivos y productos (González y Schlegel, 1990).

Considerando lo anterior, la presente propuesta describe el uso de Gaussian 16 y Gauss View 6 para calcular y visualizar en 3D la trayectoria de varias reacciones comunes en química orgánica, basada en la animación de la frecuencia imaginaria del estado de transición y la coordenada intrínseca de reacción(IRC).

Materiales y Métodos

Recientemente se ha propuesto un manual de prácticas de química computacional para integrar esta disciplina al laboratorio de química orgánica. Las prácticas incluidas en este manual incluyen el modelado de varias reacciones que se realizan en los cursos experimentales de Química orgánica a lo largo de varios semestres. Estas prácticas son las siguientes:

- Bromación de alquenos. Obtención de su perfil de energía
- Reacción SN2, mecanismo y reactividad
- Reacción E2 mecanismo y reactividad
- Reacciones de Sustitución Electrofílica Aromática reactividad y selectividad
- Dienófilos en la reacción de Diels-Alder. Orbitales Homo y Humo
- Esterificación de ácidos carboxílicos. Mecanismo.

Las actividades realizadas en estas prácticas se efectúan empleando Gaussian 16 (cálculos mecano-cuánticos) y el visualizador GaussView 6. Previamente, se imparten talleres para capacitar a alumnos y profesores sobre el manejo de estos programas, al principio del semestre.

Para la obtención del perfil de energía de una reacción, primero se optimizan las geometrías de los reactivos involucrados y de los productos. Es importante hacer notar que estas geometrías deben tener la conformación de menor energía, para lo cual se emplea el algoritmo de búsqueda de conformeros y un campo de fuerza como el de MMFF94 incluido en el software Avogadro.

Posteriormente se busca obtener el estado de transición de una reacción, empezando con una geometría inicial que involucra la de los reactivos y productos optimizados, estirando o acortando de manera manual las longitudes de los enlaces que participan en la ruptura o formación del estado de transición, esto se realiza con GaussView 6 y posteriormente se realiza la búsqueda de este complejo activado, empleando los algoritmos y métodos de cálculo de Gaussian 16.

Como ejemplo de este procedimiento, se presenta el protocolo para obtener el estado de transición de la reacción del Cloruro de metilo con el ión bromo, como se describe a continuación:

1. Construir la siguiente estructura empleando GaussView, primer seleccionando el carbono y la opción solo el átomo, colocando sobre el átomo de C, 5 valencias.



2. Colocar un átomo de bromo en la parte derecha de la estructura, seleccionando el átomo de bromo y dando clic sobre el átomo de H de la derecha, en la parte izquierda de la estructura colocar un átomo de Cloro dando clic sobre el átomo de hidrógeno correspondiente.
3. Dar clic en el menú de Builder seleccionar Modify Bond
4. Seleccionar el átomo de C y el átomo del halógeno y en el cuadro de diálogo que aparece, seleccionar el tipo de enlace de línea punteada y mover la barra; cambiar los valores de los enlaces C-Br y C-Cl seleccionando el átomo de C y el átomo de halógeno. hasta obtener las distancias 2.5 Ao y 2.25 Ao respectivamente.
5. En menú Calculate y Gaussian Calculation Setup seleccionar la pestaña Job Type y Opt + Freq. En Optimize to a, seleccionar "TS(Bemyl)".
6. En force constants, seleccionar "Calculate at First Point".
7. La siguiente pestaña para escoger es Method
8. Method: Ground State/Hartree-Fock/Default Spin
9. Basis Set: 3-21G
10. Charge: -1 Spin: Singlet
11. Seleccionar la pestaña Title y colocar el nombre del trabajo que se va a realizar por ejemplo "SN2-Test".
12. Seleccionar la pestaña Link 0 y en Chkpoint File elegir "Don't Save". En Additional Keywords escribir "Opt=noneigen". En la pestaña General seleccionar Ignore Symmetry. Enviar el cálculo seleccionando Submit, se pedirá un nombre para el archivo, nombrarlo como SN2-Test.gjf
13. Aparecerá un cuadro de diálogo de inicio del cálculo en Gaussian, elegir Yes.
14. Al finalizar el cálculo aparecerá la siguiente pantalla y seleccionar Si
15. Abrir el archivo de salida SN2-Test.log.
16. Seleccionar en Results la opción Vibrations para animar la frecuencia imaginaria. El movimiento de los átomos confirmará que se trata del TS buscado.
17. Para realizar el cálculo de la Coordenada intrínseca de Reacción (IRC), se hace una copia del archivo de salida (*.log) dar clic con el botón derecho del mouse y seleccionar Edit y Copy. Seleccionar crear nueva molécula y pegar en el cuadro que aparece. Seleccionar calculation setup y en Job Type seleccionar IRC. En Method seleccionar: Ground State/Hartree-Fock/Default Spin, Basis Set: 3-21G, Charge 0 y Spin Singlet. Seleccionar la pestaña Title y colocar el nombre del trabajo que se va a realizar por ejemplo "IRC.SN2-TS-Test".

Resultados y discusión

La reacción S_N2 es un proceso bimolecular en el cual dos moléculas están implicadas en el estado de transición del paso limitante de la rapidez de la reacción. Este proceso se lleva a cabo mediante un mecanismo de un solo paso, en el caso de un haluro de alquilo, el nucleófilo ataca por atrás del carbono que está unido al grupo saliente. La reacción procede en la dirección que permite al nucleófilo más fuerte desplazar al más débil (Figura 1).

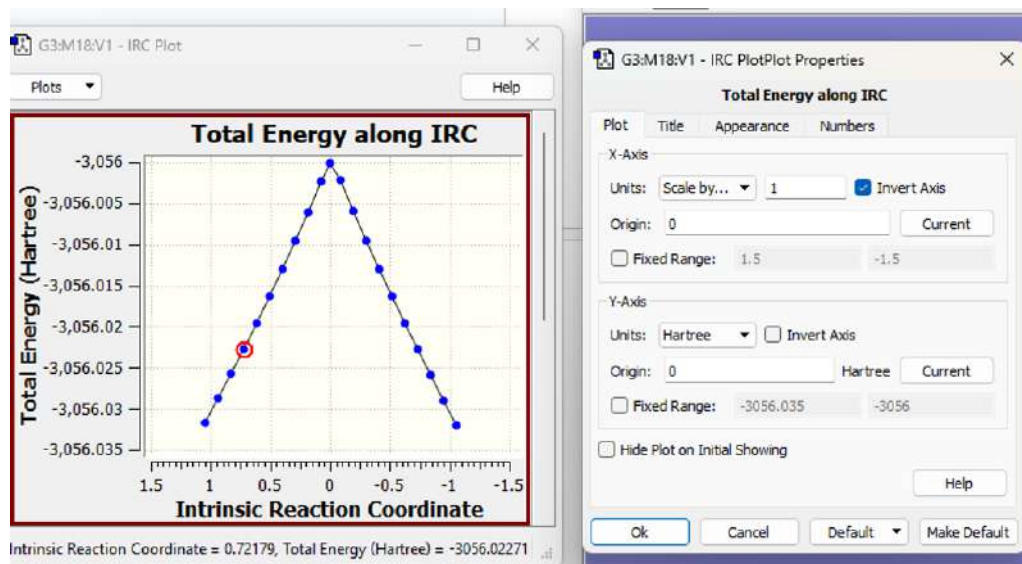


Figura 3. Coordenada intrínseca de reacción correspondiente a la reacción S_N2 entre cloruro de metilo y el ión bromuro.

Adicionalmente, para determinar la relación entre el grado de sustitución de un cloruro de alquilo y la energía de activación del correspondiente TS (relacionada con la rapidez de la reacción), se procedió a encontrar el estado de transición de las reacciones S_N2 descritas en la Figura 1, considerando el mismo procedimiento descrito para el caso del cloruro de metilo. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Energías de activación (Kcal/mol) de la reacción S_N2 entre el ión bromuro y algunos cloruros de alquilo, obtenidas con el método Hartree-Fock 3-21G

Sustrato	Energía de activación Kcal/mol)
1.-Cloruro de metilo	-12.09
2.-Cloruro de etilo	-7.18
3.-Cloruro de isopropilo	-2.55
4.-Cloruro de ter-butilo	5.88

Como puede observarse en la Tabla 1, la energía de activación aumenta al incrementarse el grado de sustitución del sustrato. Es decir, entre más estéricamente impedido es el sustrato de la reacción S_N2 , la energía de activación es mayor. Lo anterior concuerda con las características conocidas de las reacciones S_N2 . Esto constituye un ejemplo de experimentos computacionales que facilitan el aprendizaje de los mecanismos de reacción.



Recientemente en la Facultad de Química de la UNAM, se ha puesto a disposición de los estudiantes y docentes, el manual de prácticas referido anteriormente, el cual se titula: Integración de la química computacional al trabajo experimental de la química orgánica, como ya se mencionó, este manual contiene 6 prácticas computacionales enfocadas al estudio de los mecanismos de reacción. El manual se encuentra en el repositorio AMYD de la Facultad de química. Con lo anterior se pretende fomentar el estudio de los mecanismos de las reacciones orgánicas de manera activa al facilitar la visualización de los procesos químicos mediante la animación de la frecuencia imaginaria empleando GaussView 6. Es importante resaltar que también se incluyó en el reservorio mencionado los correspondientes archivos de salida (*.log) de los estados de transición de las reacciones incluidas en el mencionado manual para facilitar el aprendizaje de los mecanismos de reacción en clases de teoría.

Conclusiones

Se propuso un material didáctico con el propósito de facilitar al estudiante la comprensión de los mecanismos de las reacciones orgánicas, empleando química computacional. Se observó que este material hace posible el análisis de las reacciones orgánicas al permitir visualizar a nivel molecular los estados de transición mediante la animación de la frecuencia imaginaria de estos complejos activados. El cálculo de la coordenada intrínseca de la reacción también se encontró útil en la comprensión de los mecanismos de reacción al observar y analizar su trayectoria. Se planteó la necesidad de incorporar los conceptos de la química computacional al análisis de resultados de las prácticas experimentales donde se sintetizan una gran cantidad de compuestos para ilustrar las diferentes reacciones de la Química orgánica.

La presentación de las animaciones de las reacciones orgánicas estudiadas en clase causó buena impresión en el alumnado acostumbrado a solo escribir mecanismos en el papel. No obstante, este entusiasmo por la química computacional no se manifiesta en la mayoría del profesorado.

Agradecimientos

A la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGTIC), por permitir el acceso a los recursos de Supercómputo en el ámbito del proyecto: Estudios Teóricos de Estructura y Reactividad Molecular. CODIGO: LANCAD-UNAM-DGTIC-154

Literatura citada

- Arias, Roberto y Peralta, Helga. (2011). La enseñanza, una puerta para la complejidad y la crítica. *Estudios pedagógicos*, 37(1), 293-302.
- Esselman, B. J. & Hill, N. J. (2016). Integration of Computational Chemistry into the Undergraduate Organic Chemistry Laboratory Curriculum, *J. Chem. Educ.* 93, 932-936
- ChemTube3D <https://www.chemtube3d.com> (accessed October 1, 2022).
- Gonzalez, C.; Schlegel, H. B., (1990). Reaction Path Following in Mass-Weighted Internal Coordinates. *J. Phys. Chem.*, 94, 5523-5527.
- <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00983>



dianae.lopez.vazquez@gmail.com. * Autora de correspondencia: Consuelo Silvia Olivia Lobato-Calleros, correo electrónico: consuelobato@yahoo.com.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) y sus derivados son parte de la dieta básica en México desde tiempos precolombinos. Para el ciclo de octubre de 2025 a septiembre de 2026 se estima una producción nacional de maíz blanco de 20.63 millones de toneladas, de las cuales cerca del 88% de la demanda total corresponde a consumo humano (Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [DGSIA], 2026).

Entre los productos derivados de este grano, la tortilla de maíz representa un símbolo de la identidad cultural y gastronómica de México, además de constituir una de las principales fuentes de energía (carbohidratos), proteínas, fibra dietética y calcio en la alimentación de la población. El consumo per cápita de tortilla se estima en 65.8 kg anuales (PROFECO, 2025), y a nivel nacional se consumen aproximadamente 1,400 millones de tortillas diariamente (León et al., 2021). En términos de composición, el almidón es el principal componente de la tortilla y representa entre el 73% y el 76% de su peso en base seca (García-Valle et al., 2026).

Dada la importancia del almidón, resulta relevante considerar los cambios que experimenta durante el procesamiento del grano. Durante la nixtamalización y la cocción de la tortilla, el almidón experimenta cambios estructurales importantes, como hidratación, hinchamiento, gelatinización parcial y reorganización de sus regiones amorfas y cristalinas. La transformación de maíz a tortilla implica etapas térmicas sucesivas que modifican la estructura del almidón y pueden favorecer la formación de almidón resistente (Villada et al., 2017). Además, la clasificación nutricional del almidón en fracciones rápidamente digeribles, lentamente digeribles y resistentes permite evaluar su susceptibilidad a la hidrólisis enzimática (Yang et al., 2023).

A pesar de la importancia de la tortilla en la dieta mexicana, existe información limitada sobre cómo los tratamientos térmicos posteriores a su elaboración (fritura, tostado, horneado y calentamiento en microondas) modifican la digestibilidad *in vitro* del almidón. La evidencia reciente indica que la digestibilidad del almidón depende de su estructura multiescala, incluyendo organización molecular, cristalinidad, morfología granular y estructuras formadas durante el procesamiento térmico (Dhital et al., 2021).

Por ello, se planteó como hipótesis que los tratamientos con mayor deshidratación y calor seco, principalmente tostado y horneado, incrementarían la fracción de almidón rápidamente digerible y disminuirían el almidón resistente en comparación con la tortilla recién elaborada.



Digestibilidad in vitro de almidón

Se determinó mediante el método de Englyst et al. (1992) con modificaciones. La solución enzimática se preparó el mismo día de su uso. Se suspendió α -amilasa pancreática (0.0225 g; 10 U/mg) en 7.5 mL de agua destilada, con agitación magnética durante 30 min. Posteriormente, se centrifugó a $1500 \times g$ durante 5 min y el sobrenadante se mezcló con 0.75 mL de amiloglucosidasa (206 U/mL). Se incubaron 1.67 g de muestra (por duplicado) con la solución enzimática a 37 °C en baño de agua con agitación, tomando alícuotas a los 0, 20 y 120 min para cuantificar la glucosa liberada por el método DNS descrito por Miller (1959). Las fracciones de almidón rápidamente digerible (RDS), lentamente digerible (SDS) y resistente (RS) se calcularon a partir de la glucosa liberada en cada intervalo, conforme a las ecuaciones siguientes:

$$RDS (\%) = \frac{(G_{20}-FG)*0.9}{TS} * 100$$

(1)

$$SDS (\%) = \frac{(G_{120}-G_{20})*0.9}{TS} * 100$$

(2)

$$RS (\%) = \frac{TS-(RDS+SDS)}{TS} * 100$$

(3)

donde: FG es el contenido de glucosa libre y TS es el contenido de almidón total, G20 y G120 representan el contenido de glucosa liberada después de 20 y 120 minutos, respectivamente.

Análisis estadístico

El análisis proximal se realizó con tres tortillas independientes por tratamiento ($n = 3$), y las determinaciones de digestibilidad de almidón con dos tortillas independientes por tratamiento ($n = 2$). Los datos se expresan como media $\pm$ desviación estándar, y se analizaron mediante



ANOVA de una vía y cuando fue pertinente mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el complemento Real Statistics Using Excel (Release 9.8).

Resultados y Discusión

Contenido de humedad y composición proximal

El tipo de tratamiento térmico modificó significativamente el contenido de humedad y la composición proximal de las tortillas (Cuadro 1). La Tr presentó el mayor contenido de humedad, mientras que las tortillas sometidas a los distintos tratamientos térmicos mostraron los valores más bajos, lo cual es consistente con la evaporación de agua libre y parcialmente ligada que ocurre durante estos procesos (Ling & Tang, 2014; Zhang et al., 2017).

Cuadro 1. Humedad y composición proximal de tortillas sometidas a diferentes tratamientos térmicos.

Trat.	Humedad	Cenizas	Proteína	Lípidos	Fibra	Carbohidratos
Tr	9.11 ± 0.01^a	1.94 ± 0.22^a	7.94 ± 0.12^a	1.72 ± 0.07^c	2.09 ± 0.04^a	86.31 ± 0.36^a
Tf	3.28 ± 0.09^c	1.47 ± 0.02^b	5.67 ± 0.04^b	30.41 ± 0.36^a	1.23 ± 0.04^c	61.22 ± 0.41^b
Tm	6.28 ± 0.02^b	2.05 ± 0.00^a	8.15 ± 0.09^a	1.73 ± 0.04^c	1.49 ± 0.01^d	86.58 ± 0.13^a
Th	5.28 ± 0.01^c	2.12 ± 0.01^a	8.02 ± 0.10^a	2.73 ± 0.03^b	1.65 ± 0.06^c	85.48 ± 0.14^a
Tc	4.11 ± 0.01^d	2.03 ± 0.04^a	7.93 ± 0.10^a	2.15 ± 0.01^c	1.81 ± 0.03^b	86.08 ± 0.13^{ab}

Los componentes proximales, excepto humedad, se expresan en base seca. Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).



Fuente: elaboración propia.

El análisis proximal mostró que la fritura fue el tratamiento que produjo el cambio más marcado: el contenido de lípidos aumentó de 1.72 ± 0.07 a 30.41 ± 0.36 % con respecto a Tr, donde la absorción de aceite se asocia con la estructura porosa generada durante el freído y la pérdida de agua del producto (de la Rosa-Millan et al., 2025). Por otro lado, la proteína, las cenizas y los carbohidratos de Tf disminuyeron por un efecto de dilución composicional como se ha reportado en tortillas fritas como totopos y chips (Asokapandian et al., 2020). En contraste, los tratamientos térmicos sin aceite (Tm, Th, Tc), las cenizas y los lípidos aumentaron ligeramente por concentración de sólidos tras la pérdida de agua, mientras que el contenido de carbohidratos se mantuvo en un rango de 85.48 ± 0.14 - 86.58 ± 0.13 % en dichos tratamientos. Estos valores son consistentes con lo reportado por Rojas-Molina et al. (2020) en tortillas tradicionales.

Cambios morfológicos

Los cambios morfológicos que experimenta la matriz estructural de la tortilla bajo cada tratamiento térmico se muestran en la Figura 1. Se observó que la Tr mostró una matriz continua en la cual los gránulos de almidón se encuentran parcialmente gelatinizados lo concuerda con Rojas-Molina et al. (2024). En Tf no se observaron gránulos diferenciables, sin embargo, presentó una superficie rugosa, compacta y de mínima porosidad, lo cual se le atribuye a la interacción del almidón con los lípidos incorporados durante el proceso de fritura (Asokapandian et al., 2020). La Tm mostró estructuras predominantemente gelatinizadas, consistente con el calentamiento volumétrico rápido inducido por el campo electromagnético sobre las moléculas de agua (Yang et al., 2020). Th presentó una matriz con cavidades y poros en los gránulos de almidón, resultado de la intensa gelatinización y deshidratación asociadas al horneado a 180 °C (Martínez et al., 2026). En contraste, la Tc mostró una matriz compacta, irregular y con zonas fracturadas, posiblemente asociada con la pérdida de humedad y la reorganización del almidón durante el tratamiento de tostado en comal. Estos cambios pueden favorecer el colapso parcial de los gránulos y una mayor exposición de la matriz amilácea, lo que concuerda con estudios que reportan modificaciones estructurales del almidón durante la transformación de maíz a tortilla y en productos tostados derivados de maíz nixtamalizado (Villada et al., 2017). Estos cambios estructurales podrían influir en la accesibilidad enzimática del almidón durante la digestibilidad *in vitro*.

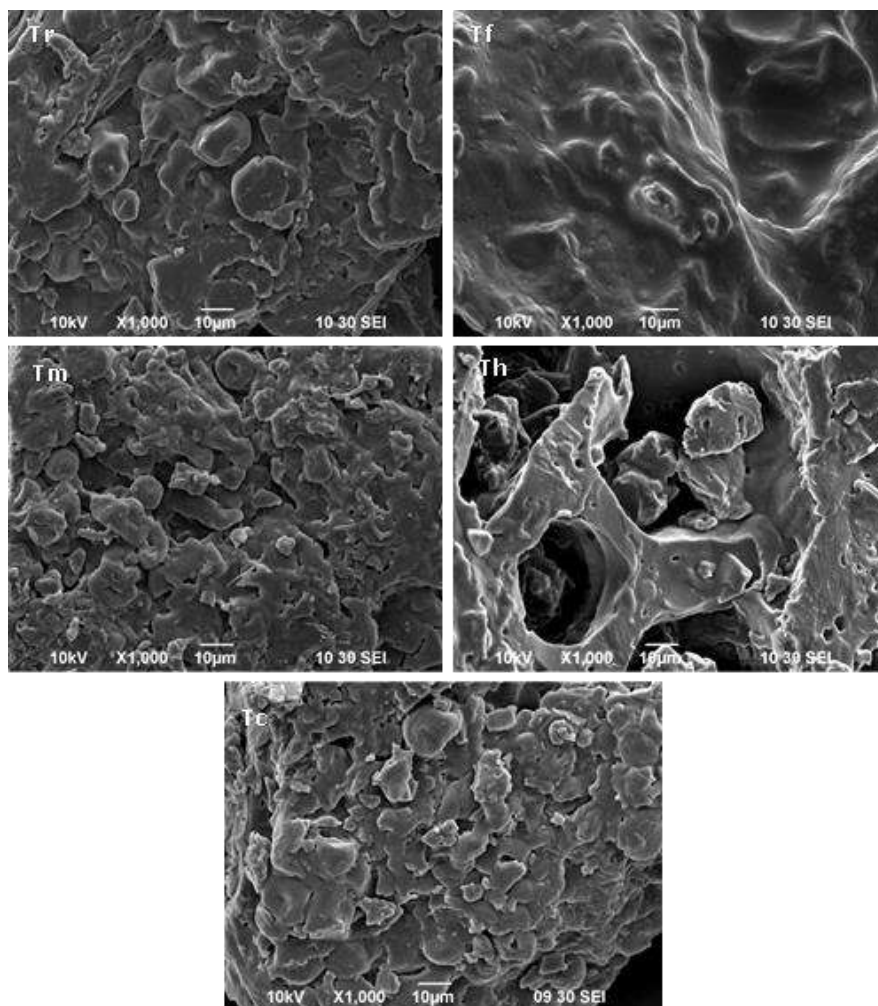


Figura 1. Micrografías de SEM correspondientes a tortilla recién hecha (Tr), tortilla frita (Tf), tortilla calentada en horno de microondas (Tm), tortilla horneada (Th) y tortilla tostada (Tc). Observadas a 1000×.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR (Figura 2) conservaron el patrón general de una matriz amilácea-proteica en todos los tratamientos, con bandas características de grupos O-H ($3700\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$), C-H ($3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$), Amida I/II ($1700\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$) y la región de huella dactilar del almidón ($1300\text{--}800\text{ cm}^{-1}$) (García et al., 2026; Escamilla et al., 2025). El cambio más evidente ocurrió en Tf, con menor intensidad de la banda O-H (asociada a la pérdida de agua por fritura) y la



aparición de una banda a 1750 cm^{-1} atribuible al grupo carbonilo de los acilglicéridos, lo que confirma la formación de complejos almidón-lípido (Hu et al., 2022; García et al., 2026).

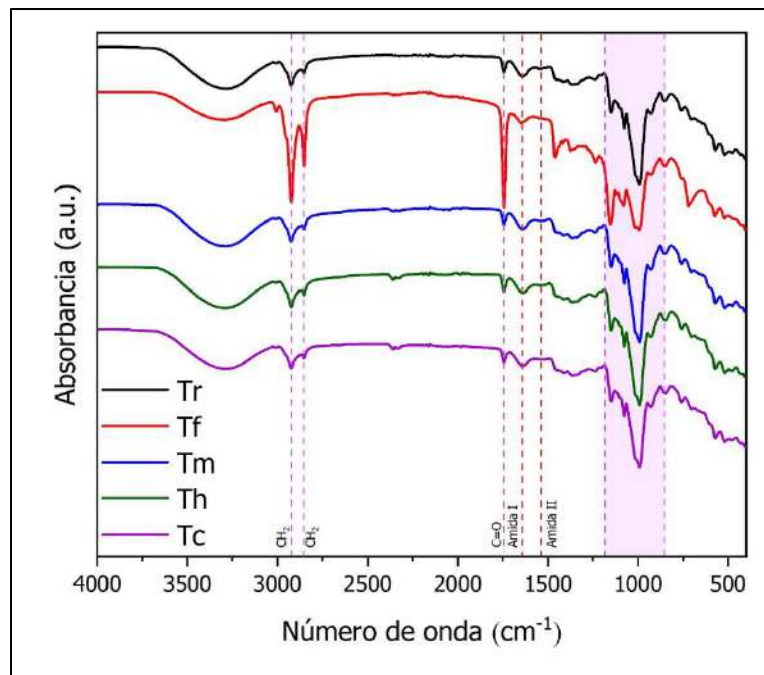


Figura 2. Espectro FTIR de tortillas sometidas a diferentes tratamientos térmicos.

Fuente: elaboración propia.

Digestibilidad in vitro de almidón

En el Cuadro 2 se muestra la digestibilidad *in vitro* del almidón en tortillas de maíz sometidas a procesamientos térmicos. La tortilla recién hecha presentó el mayor contenido de almidón resistente ($80.45 \pm 0.70\%$) y las menores fracciones de RDS (4.55%) y SDS (14.98%), lo que indica una estructura granular poco accesible a las enzimas digestivas (Dhital et al., 2021). En Tf, el RDS aumentó a $10.60 \pm 1.14\%$ y el RS disminuyó a $63.55 \pm 1.07\%$, cambio moderado atribuible a la formación de complejos amilosa-lípido que pueden limitar parcialmente el acceso enzimático, en contraste con el efecto opuesto de la mayor gelatinización inducida por el calor (Vernon et al., 2020; de la Rosa-Millan et al., 2025). Por



Los tratamientos térmicos posteriores a la elaboración modificaron la composición proximal, microestructura y digestibilidad *in vitro* del almidón en tortillas de maíz. La fritura incrementó principalmente el contenido de lípidos, mientras que el tostado favoreció la mayor proporción de almidón rápidamente digerible y la menor fracción de almidón resistente. Las observaciones por SEM y FTIR sugieren que estos cambios se relacionan con modificaciones en la matriz amilácea, como fracturas, porosidad, compactación y reorganización estructural. En conjunto, los resultados indican que el procesamiento térmico posterior puede alterar la accesibilidad enzimática del almidón y, por tanto, su funcionalidad nutricional.

Literatura Citada

- AOAC International (2000) Official methods of analysis (17th ed.). Estados Unidos. AOAC International.
- Asokapandian, S., Swamy, G. J., & Hajjul, H. (2020). Deep fat frying of foods: A critical review on process and product parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(20), 3400–3413. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1688761>
- Dhital, S., Dolan, G., Stokes, J. R., & Gidley, M. J. (2021). Controlling starch digestibility and glycaemic response in maize-based foods. *Journal of Cereal Science*, 99, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103222>
- Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [DGSIA] (2026). Balanza de disponibilidad-consumo anual de maíz grano blanco. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, [Página web], México, disponible en: <https://nube.agricultura.gob.mx/Balanza/MaizGranoBlanco/abril2026.php>
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(Suppl. 2), S33–S50.
- Escamilla-Urbina, I., Totosaus, A., Rodríguez, H. M. E., Vernon, C. E. J., Lobato, C. C., & Alvarez, R. J. (2025). Effect of calcium hydroxide and nixtamalization time on the *in vitro* starch and protein digestibility of traditional maize tortillas. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80, 61. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01245-z>



- Farooq, M. A., & Mei, Y. J. (2024). Recent advances in physical processing techniques to enhance the resistant starch content in foods: A review. *Foods*, 13(17), 2770. <https://doi.org/10.3390/foods13172770>
- García-Valle, D. E., López, S. M., Figueroa, G. J. J., Laureano, L. B., & Sánchez, M. L. M. (2026). Modulatory effect of anthocyanins on starch and protein structure during cooking of pigmented maize tortillas: Analysis by FTIR, DSC, XRD, and in vitro digestibility. *International Journal of Biological Macromolecules*, 337, 149500. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.149500>
- Hu, X., Li, Z., Wang, F., Mu, H., Guo, L., Xiao, J., Liu, Y., & Li, X. (2022). Formation of starch–lipid complexes during the deep-frying process and its effects on lipid oxidation. *Foods*, 11(19), 3083. <https://doi.org/10.3390/foods11193083>
- León, M. J. R., Gutiérrez, D. R., & Reynoso, C. R. (2021). Tortillas made with extruded flours of blue maize and chia seeds as a nutritious and nutraceutical food option. *Agrociencia*, 55(6), 487–506. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2555>
- Ling, B., & Tang, J. (2014). Kinetics of food quality changes during thermal processing: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 343–358. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1232-0>
- Martínez, R. L. M., Luzardo, O. I., Barrón, G. O. Y., Rodríguez, G. M. E., Loarca, P. G., & Gaytán, M. (2026). Impact of high-amylose starch addition on the resistant starch content and the physicochemical properties of maize (*Zea mays* L.) cookies. *Food Chemistry*, 498, 144255. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144255>
- Procuraduría Federal del Consumidor [PROFECO] (2025). “Guía de consumo 2025”, Revista del Consumidor, [Página web], México, disponible en: https://revistadelconsumidor.profeco.gob.mx/media/revistas/sumario/sumario_guia_de_consumo_2025_11_9cUmNdt5.pdf [fecha de acceso: 11 de julio de 2026].
- de la Rosa-Millan, J. (2025). Lipid-Enriched Cooking Modulates Starch Digestibility and Satiety Hormone Responses in Traditional Nixtamalized Maize Tacos. *Foods*, 14(15), 2576. <https://doi.org/10.3390/foods14152576>
- Rojas-Molina, I., Mendoza-Avila, M., Cornejo-Villegas, M. de los Á., Del Real-López, A., Rivera-Muñoz, E., Rodríguez-García, M., & Gutiérrez-Cortez, E. (2020). Physicochemical Properties and Resistant Starch Content of Corn Tortilla Flours Refrigerated at Different Storage Times. *Foods*, 9(4), 469. <https://doi.org/10.3390/foods9040469>



- Rojas-Molina, I., Nieves-Hernandez, M. G., Gutierrez-Cortez, E., Barrón-García, O. Y., Gaytán-Martínez, M., & Rodríguez-García, M. (2024). Physicochemical changes in starch during the conversion of corn to tortilla in the traditional nixtamalization process associated with RS2. *Food Chemistry*, 439, 138088. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138088>
- Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. D. D., Véles-Medina, J. J., Salazar, R., & Arámbula-Villa, G. (2020). Physicochemical properties and resistant starch content of corn tortilla flours refrigerated at different storage times. *Foods*, 9(5), 616. <https://doi.org/10.3390/foods9050616>
- Sevenou, O., Hill, S. E., Farhat, I. A., & Mitchell, J. R. (2002). Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 31(1–3), 79–85. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(02\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(02)00067-3)
- van Soest, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D., & Vliegenthart, J. F. G. (1995). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 279, 201–214. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(95\)00270-7](https://doi.org/10.1016/0008-6215(95)00270-7)
- Vernon, C. E. J., Alvarez, R. J., Meraz, M., Bello, P. L. A., & García, D. S. (2020). Canola oil/candelilla wax oleogel improves texture, retards staling and reduces in vitro starch digestibility of maize tortillas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(4), 1526–1534. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10135>
- Yang, D., Wu, G., Li, P., Qi, X., Zhang, H., Wang, X., & Jin, Q. (2020). Effect of microwave heating and vacuum oven drying of potato strips on oil uptake during deep-fat frying. *Food Research International*, 137, 109338. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109338>
- Yang, Z., Zhang, Y., Wu, Y., & Ouyang, J. (2023). Factors influencing the starch digestibility of starchy foods: A review. *Food Chemistry*, 406, Article 135009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135009>
- Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1239–1255. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.979280>



ranged from 32.29 ± 2.22 to 101.04 ± 4.19 mg CE 100 g DW⁻¹; and flavonoids (quercetin equivalents) ranged from 46.85 ± 3.31 to 155.23 ± 7.90 mg QE 100 g DW⁻¹. Antioxidant capacity varied from 65.92 ± 2.83 to 283.87 ± 5.36 μ mol TE 100 g DW⁻¹. Hybrids H18 and H17 exhibited the highest antioxidant capacity and the greatest total phenolic content.

Keywords: *Zea mays*; native maize; phenolic compounds; hybrid maize; ABTS.

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Laboratorio de Productos Naturales, Departamento de Preparatoria Agrícola, km 38.5 Carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México C.P. 56230, México, Correos: rdominguezp@chapingo.mx, ghernandezr@chapingo.mx, dguerrar@chapingo.mx.

Introducción

En México, el maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo muy importante que posee alto valor económico, social y cultural. En el ámbito de la seguridad alimentaria el maíz tiene profunda relevancia culinaria (Ramírez-Vega et al., 2022). El maíz nativo constituye la base de la dieta mexicana, es ingrediente de preparaciones tradicionales como la tortilla, el tamal y el atole (Fernández-Suárez et al., 2013); su consumo aporta carbohidratos, proteínas y compuestos bioactivos que contribuyen a la salud. Los maíces nativos son indispensables para la dieta nacional pues representan un recurso estratégico para la soberanía alimentaria. En México y Sudamérica existen variedades de maíz con diferentes colores y propiedades nutraceuticas. En el caso de los maíces pigmentados estas propiedades están asociadas a las antocianinas y carotenoides que aportan beneficios antioxidantes y funcionales (Lao y Giusti, 2018; Capocchi et al., 2017).

Las variedades de maíz criollo generalmente están adaptados a condiciones locales y sistemas tradicionales lo que hace que su rendimiento sea variable, además presentan baja capacidad de respuesta a fertilizantes y a las altas densidades de población (Virgen-Vargas et al., 2010). Sin embargo, de acuerdo con Figueroa Cárdenas et al., (2013) existe una amplia variabilidad morfológica y fisiológica de razas de maíz nativo con potencial para programas de mejoramiento y conservación. Y ante la necesidad de optimizar la producción y mejorar el rendimiento, el maíz híbrido representa una alternativa para tener mayor productividad (Virgen-Vargas et al., 2010).

El uso de variedades mejoradas es una alternativa que permite un incremento en el rendimiento, ya que el 60 % de aumento en el rendimiento se atribuye al potencial genético del híbrido y el porcentaje restante al manejo del cultivo (Arellano et al., 2011). En los valles



Altos de México se evaluó el rendimiento de híbridos de maíz de grano blanco y se encontró que produjeron más de 10 t ha⁻¹ por lo que presentan perspectivas de uso comercial, como resultado de su interacción positiva con el ambiente (Martínez-Gutiérrez et al., 2018; Vázquez-Carrillo et al., 2020). En dos localidades de Tlaxcala, los híbridos obtenidos a partir de cruza de maíz criollo presentaron mayor rendimiento y calidad de semilla que la cruza de híbridos comerciales (Virgen-Vargas et al., 2010).

Actualmente, además de la composición fisicoquímica el consumo de alimentos está relacionado con el potencial nutraceutico. El maíz criollo se ha convertido en un objeto de estudio prioritario en las últimas décadas debido a la riqueza fitoquímica que presenta. Su diversidad genética, producto de miles de años de domesticación y selección tradicional, ha permitido la acumulación de una amplia gama de metabolitos secundarios con alto valor nutraceutico. En variedades de maíz nativo se ha reportado que el maíz morado presenta mayor actividad antioxidante, seguido del maíz rojo, blanco y amarillo (Mex-Álvarez et al., 2013; López-Martínez y García-Galindo 2010; Reyna, 2023). Sin embargo, en el caso del maíz híbrido se han realizado algunos estudios sobre las propiedades nutraceuticas (Cadena et al., 2024) pero aún falta información sobre este tipo de maíces, para promover su aprovechamiento en programas de mejoramiento y en el desarrollo de alimentos funcionales. En ese sentido, el objetivo de la investigación fue evaluar las propiedades antioxidantes de 6 híbridos de maíz obtenidos a partir de cruza de maíz nativo provenientes de diferentes regiones del país, producidos en el campo San Juan, Chapingo, para seleccionar los que presentan mejores características funcionales.

Materiales y métodos

Reactivos

El metanol, ácido acético, ácido clorhídrico, éter de petróleo e hidróxido de potasio fueron adquiridos en J.T. Baker. Folin-Ciocalteu, ácido gálico, carbonato de sodio anhidro, ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico (trolox), catequina, 2,4,6-tripiridil-triazina(TPTZ), acetato de sodio, ácido tricloroacético, cloruro férrico hexahidratado, B-caroteno, sal diamónica del ácido 2,2-azinobis(3-etil-benzotiazolina-6-sulfónico (ABTS) y persulfato de sodio fueron adquiridos de Sigma Aldrich.

Instrumentación

La medición de absorbancias para cuantificar el contenido de fenoles totales, flavonoides totales, antocianinas totales, carotenoides totales y evaluación de la capacidad antioxidante se llevó a cabo en un lector de microplacas Biotek (Biotek, Instruments Inc., Winooski, VT, USA) equipado con el software de análisis de datos Gen5™data.



y se realizó la lectura de absorbancia a 510 nm. La curva de calibración fue preparada con catequina en un intervalo de concentraciones de 0 a 130.2 μM . Los resultados fueron expresados como miligramos equivalentes de catequina por 100 gramos de muestra en base seca ($\text{mgEC g}_{\text{bs}}^{-1}$).

Cuantificación de flavonoides totales con quercetina

Los flavonoides totales fueron determinados de acuerdo con el método de Chang et al (2002) adaptado a microplacas. En tubos falcón se mezclaron 4.3 mL de agua destilada con 0.5 mL de extracto, blanco o curva de calibración, después se agregaron 0.15 mL de cloruro de aluminio al 10 % y 0.1 mL de acetato de potasio 1 M. La mezcla se dejó reposar durante 30 minutos y posteriormente se agregaron 0.3 mL de cloruro de aluminio hexahidratado al 10 %. Posteriormente, fueron transferidos 200 μL a una microplaca y se realizó la lectura de absorbancia a 415 nm. La curva de calibración fue preparada con quercetina en un intervalo de concentraciones de 0 a 130.2 μM . Los resultados fueron expresados como miligramos equivalentes de quercetina por 100 gramos de muestra en base seca ($\text{mgEQ g}_{\text{bs}}^{-1}$).

Capacidad antioxidante

Ensayo ABTS

La capacidad antioxidante por el ensayo ABTS se midió aplicando el método de Re et al. (1999) adaptado a microplacas. En una microplaca fueron mezclados 20 μL de las alícuotas de Trolox o del extracto y 180 μL de la disolución $\text{ABTS}^{\cdot+}$. Como blanco fueron utilizados 200 μL de la disolución de $\text{ABTS}^{\cdot+}$. La reacción en la microplaca se dejó reposar durante 10 minutos y, antes de realizar la lectura de absorbancia a 734 nm, se realizó una agitación de la placa durante 30 segundos. La curva de calibración de Trolox fue preparada en un intervalo de concentraciones de 4.99 a 59.93 μM . Los resultados fueron expresados como micromoles equivalentes de Trolox por cien gramos de muestra en base seca ($\mu\text{moles ET 100 g}_{\text{bs}}^{-1}$).

Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados aplicando un análisis de varianza y comparación de medias de tratamientos (Tukey, $p < 0.05$) utilizando el paquete estadístico SAS (versión 9.4).

Resultados y discusión

Los granos de maíz correspondientes a las muestras H1, H3, H4, H10 y H17 presentaron tonalidades amarillas, mientras que los de la muestra 18 fueron morados. Los resultados de



La capacidad antioxidante utilizando el ensayo ABTS se presenta en la Figura 2, el contenido que presentaron los híbridos de maíz oscilo entre 65.92 ± 2.83 y 283.87 ± 5.36 $\mu\text{moles ET } 100 \text{ g}_{\text{bs}}^{-1}$. La capacidad antioxidante de la muestra 18 fue la que estadísticamente presentó mayor capacidad antioxidante, mientras que los híbridos 3 y 4 presentaron la menor capacidad, y fueron estadísticamente iguales a los híbridos 10 y 17. La capacidad antioxidante presentada fue menor a la reportado por Montes-Hernández et al. (2020) quienes reportaron $12\text{--}15 \mu\text{mol ET g}^{-1}$. En general, el híbrido de maíz morado correspondiente al H18 fue el que presentó mayor contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante, así como mayor contenido de flavonoides utilizando como estándar la catequina.

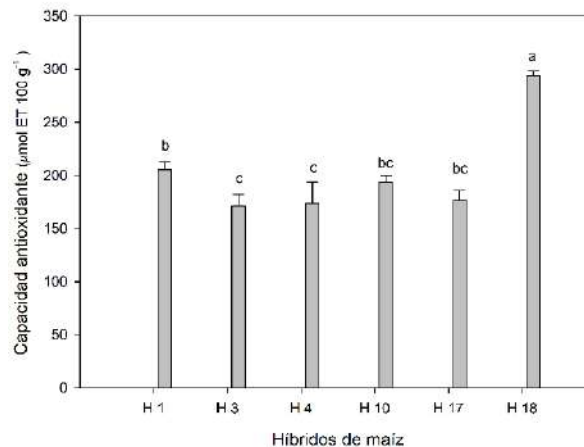


Figura 2. Capacidad antioxidante de híbridos de maíz

Conclusiones

Se cuantificó el contenido de fenoles totales, flavonoides con catequina y con quercetina para los híbridos de maíz H1, H3, H4, H10, H17 y H18 cultivados en el campo San Juan, Chapingo. El contenido de fenoles de las muestras fue de 103.65 ± 6.04 hasta 153.53 ± 8.06 $\text{mgEAF } 100 \text{ g}_{\text{bs}}^{-1}$, el de flavonoides totales con base en catequina fue de 32.29 ± 2.22 hasta 101.04 ± 4.19 $\text{mgEC } 100 \text{ g}_{\text{bs}}^{-1}$ y con base en quercetina de 46.85 ± 3.31 hasta 155.23 ± 7.90 $\text{mgEQ } 100 \text{ g}_{\text{bs}}^{-1}$. La capacidad antioxidante de las muestras fue de 65.92 ± 2.83 a 283.87 ± 5.36 $\mu\text{moles ET } 100 \text{ g}_{\text{bs}}^{-1}$. La muestra de maíz morado (H18) es la que presentó mejores propiedades antioxidantes, mientras que de las amarillas fue el híbrido 17.

Literatura citada



Arellano, V. J. L.; Virgen, V. J.; Rojas, M. I. y Ávila, P. M. A. 2011. H-70: híbrido de maíz de alto rendimiento para temporal y riego del Altiplano Central de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(4):619-626.

Cadena, F. C., Moscoso, J. L. A., Pérez, G. R., Ramírez, A. G., Meza, A. R. O., & Acuña, D. A. C. (2024). Actividad biológica de maíz (*Zea mays*) de color mejorado cultivado en el sur de Sonora. *Agronomía Mesoamericana*, 35(1), 31.

Chang, C., M. Yang. H. Wn and J. Chern. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis* 10:178-182.

Capocchi, A., Bottega, S., Spanò, C., & Fontanini, D. (2017). Phytochemicals and antioxidant capacity in four Italian traditional maize (*Zea mays* L.) varieties. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 68(5), 515–524. <https://doi.org/10.1080/09637486.2016.1261809>

Fernández Suárez, R., Morales Chávez, L. A., & Gálvez Mariscal, A. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional: Una revisión indispensable. *Revista fitotecnica mexicana*, 36, 275-283.

Figueroa Cárdenas, J. D. D., Narváez González, D. E., Mauricio Sánchez, A., Taba, S., Gaytán Martínez, M., Véles Medina, J. J., ... & Aragón Cuevas, F. (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista fitotecnica mexicana*, 36, 305-314.

Hernández-Rodríguez, G., Espinosa-Solares, T., Hernandez-Eugenio, ' G., Villa-García, M., Reyes-Trejo, B., & Guerra-Ramírez, D. (2016). Influence of polar solutions on the extraction of phenolic compounds from capulin fruits (*Prunus serotina*). *Journal of the Mexican Chemical Society*, 60(2), 73–78.

Kubola, J., & Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril, and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food Chemistry*, 127, 1138-1145. [10.1016/j.foodchem.2011.01.115](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.115)

Lao, F., & Giusti, M. M. (2018). Extraction of purple corn (*Zea mays* L.) cob pigments and phenolic compounds using food-friendly solvents. *Journal of Cereal Science*, 80, 87-93.

súper alimentos innovadores. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*.



¹ Universidad Autónoma Chapingo, Laboratorio de Productos Naturales, Departamento de Preparatoria Agrícola, km 38.5 Carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México C.P. 56230, México, Correos: rdominguezp@chapingo.mx, ghernandezr@chapingo.mx, dguerrar@chapingo.mx.

Abstract

Conostegia xalapensis, commonly known as nigua or mujut, is a species native to Mexico whose fruits contain pigments of potential nutraceutical interest. Despite its presence and importance to communities in the Sierra Norte region of Puebla, it remains an underutilized resource. This study evaluated the effects of ultrasound-assisted (US) and microwave-assisted (MW) extraction on anthocyanin recovery from the solid residue of its fruits. The plant material was collected in Puebla and processed to separate the juice from the residue, which consisted of peel, seeds, and pulp. Six treatments involving different processing times, power levels, and energy inputs were applied, while untreated juice and residue were used as reference samples. Total anthocyanin content was determined using the pH differential method adapted to microplates, and the results were analyzed by ANOVA and Tukey's test. The assisted extraction treatments significantly increased anthocyanin concentrations. US60-500 produced the highest value, at 15.29 ± 0.88 mg C3G 100 g⁻¹, with no statistically significant difference from MW60, which yielded 14.87 ± 0.78 mg C3G 100 g⁻¹. The most effective treatment resulted in anthocyanin concentrations approximately 87% higher than those in the juice and 185.5% higher than those in the untreated residue. These findings indicate that acoustic cavitation and microwave heating promote cell disruption and pigment release. These technologies represent promising alternatives for the valorization of nigua residues, although further optimization should consider anthocyanin stability and potential degradation.

Keywords: Anthocyanins; *Conostegia xalapensis*; ultrasound-assisted extraction (UAE); microwave-assisted extraction (MAE).

Introducción

Las antocianinas son pigmentos hidrosolubles del grupo de los flavonoides, responsables de las tonalidades rojas, púrpuras y azules en frutos, flores y otros tejidos vegetales. Debido a su actividad antioxidante, su potencial nutracéutico y su posible uso como colorantes naturales, existe un interés creciente en desarrollar métodos eficientes y sostenibles para su extracción. En este contexto, tecnologías emergentes como la extracción asistida por ultrasonido (UAE) y la extracción asistida por microondas (MAE) han mostrado ventajas frente a los métodos convencionales, al favorecer la ruptura celular, mejorar la transferencia de masa, reducir los tiempos de procesamiento y disminuir el uso de solventes (Leonarski et al., 2025). Estas técnicas se consideran estrategias de extracción verde con potencial para



valorizar matrices vegetales y residuos agroindustriales ricos en compuestos bioactivos (Elez Garofulić et al., 2023).

Conostegia xalapensis (Bonpl.) D. Don ex DC., conocida localmente como nigua o mujut, es una especie arbustiva nativa de México perteneciente a la familia Melastomataceae. De acuerdo con registros botánicos de UNAM, la especie presenta diversos nombres comunes en México, entre ellos nigua, capulincillo, capulín, serita y teshuate, con presencia registrada en diferentes estados, incluido Puebla (González-Sánchez et al., 2026). En la Sierra Norte de Puebla, esta especie ha sido reportada en ambientes tropicales y templados, así como en selvas, bosques, potreros, cultivos de maíz y cafetales; además, se reconoce su importancia para comunidades originarias por el consumo directo de sus frutos, el uso de leña derivada de podas y su aporte de materia orgánica a los cultivos.

A pesar de su presencia en regiones como Ecatlán, Jonotla y Xicotepec, Puebla, la nigua suele ser considerada una planta sin valor económico o incluso maleza, por lo que carece de esquemas formales de aprovechamiento. No obstante, estudios recientes señalan que *C. xalapensis* es un recurso nativo subutilizado cuyos frutos oscuros podrían asociarse con compuestos de interés nutraceutico, aunque aún existe limitada investigación sobre su actividad antioxidante, manejo agronómico, diversidad genética y desarrollo comercial (González-Sánchez et al., 2026). Debido a la alta perecibilidad de los frutos, su transformación en extractos ricos en antocianinas representa una alternativa para incrementar su valor agregado, reducir pérdidas poscosecha y promover el aprovechamiento sostenible de recursos vegetales locales. En este sentido, la aplicación de ultrasonido y microondas para la extracción de antocianinas de residuos de cáscara de nigua podría contribuir a la valorización de una especie nativa actualmente desaprovechada y generar oportunidades para las comunidades rurales de la Sierra Norte de Puebla

Material es y Métodos

Material vegetal y obtención del residuo

El material vegetal fue colectado en el mes de junio del presente en el Rancho Ecoturístico Las Cañadas, Carretera Tlapehuala kilómetro 12.5, Tecolotla, 73080 en el estado de Puebla. Los frutos se recolectaron en un estado maduro, lo que corresponde a un color morado oscuro. Se almacenaron en refrigeración a 4° C hasta su posterior uso. Los frutos de Nihua fueron triturados en un mortero con ayuda de un pistilo, ambos de porcelana. Después, se tomó un colador con malla fina y se exprimió manualmente para separar el jugo de los residuos sólidos. Los residuos sólidos incluyen la cáscara, semillas y parte de la pulpa del fruto. Para homogenizar aún más la muestra, se sometió a molienda usando una licuadora (1200 W, Nutribullet®, México). Este residuo final es el que se sometió a tratamiento de extracción.

Determinación de humedad



La humedad se determinó usando una termobalanza (Ohaus, MB45). La determinación se hizo por triplicado, usando 500 mg de muestra de residuo. El valor se obtuvo en % m/m de humedad.

Obtención de extractos

De acuerdo con el diseño experimental, se colocó en un tubo Falcon de 50 mL una muestra de residuo de cáscara de Nihua, a la que posteriormente se le añadió metanol acidificado (1% v/v de HCl concentrado) en relación 1:10 (m:v). Se mezcló y se mantuvo en agitación en una agitadora orbital durante 12 h sin luz.

Determinación de antocianinas totales

El contenido de antocianinas totales se determinó de acuerdo con el método de Lee et al. (2005) adaptado a microplacas.

Se preparó 25 mL de la disolución buffer pH= 1 y 25 mL de la disolución buffer de acetatos (pH= 4.5). Se prepararon dos muestras con 1 mL de extracto. La primera muestra se disolvió en 1 mL de una disolución buffer pH= 1. La segunda muestra se disolvió en 1 mL de una disolución buffer de acetatos (pH= 4.5). Ambas muestras se agitaron en vortex (Symphony™, WVR International) por 15 min y centrifugaron (Spectrafuge™ 24D, Labnet) por 10 min a 4000 RCF. Una alícuota de 100 µL de cada uno de los sobrenadantes se colocó en el pozo de una microplaca.

Se tomaron lecturas de la absorbancia de las muestras a 513 y 700 nm. Se usó el lector de microplacas Biotek Synergy™ 2, software Gen5. La concentración de pigmentos de antocianinas se expresó como equivalentes de antocianinas (mg C3G 100 g_{bf}⁻¹), de acuerdo con la ecuación 1:

$$\text{Equivalentes de antocianinas} = \frac{A \cdot PM \cdot FD \cdot 10^3}{\epsilon \cdot 0.38} \quad (1)$$

Donde:

A = (A_{520 nm} - A_{700 nm}) pH1.0 - (A_{520 nm} - A_{700 nm}) pH 4.5

PM= 449.2 g mol⁻¹ para Cianidina 3-glucósido (C3G)

FD= Factor de dilución establecido

ε= Coeficiente de extinción molar de Cianidina 3-glucosido (26 900 mol⁻¹ cm⁻¹)

10³= Factor de conversión de g a mg

0.38 cm= Longitud de trayectoria, factor de corrección por uso de microplacas

Diseño experimental



Se realizaron seis tratamientos, tres usando microondas (MV), tres usando ultrasonido (US), como comparación y testigo se usaron jugo de nigua y residuo de nigua. Para determinar los tratamientos, se determinó la energía aplicada por gramo de muestra, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$E_{US} = \frac{P_{nom}}{t_{trat} \times m_{total}} \quad (1)$$

$$P_{MV} = \frac{m_{H_2O} \times C_{p_{H_2O}} \times \Delta T}{t_{trat}} \quad (2)$$

$$E_{MV} = \frac{P_{MV} \times t_{trat}}{m_{res}} \quad (3)$$

Donde E_{US} y E_{MV} son la energía emitida por el equipo de ultrasonido (Cole-Palmer, 08890-01, 70W) y microondas (Samsung, MG40J5133AT) respectivamente ($J \text{ g}^{-1}$), P_{nom} es la potencia nominal de salida reportada por el equipo de US, t_{trat} es el tiempo de tratamiento (s) de la muestra o el agua según corresponda, m_{total} corresponde a la masa de agua más la muestra en el baño ultrasónico (1250 g), m_{H_2O} masa de agua sometida a tratamiento (g), $C_{p_{H_2O}}$ es la capacidad calorífica del agua ($J \text{ Kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), ΔT es el incremento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de la muestra y P_{MV} ($J \text{ s}^{-1}$) es la potencia del microondas determinada experimentalmente.

La Tabla 1, muestra los tratamientos establecidos para el estudio del efecto del microondas y ultrasonido en la extracción de las antocianinas del residuo de Nigua. El parámetro principal fue la energía aplicada por gramo de muestra.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a ANOVA y a pruebas de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se usó el Programa SAS (SAS Institute Inc., 1999). Todas las evaluaciones se realizaron por triplicado.

Tabla 1. Diseño experimental usado para evaluar el efecto de la energía aplicada por microondas o ultrasonido sobre el residuo de *Conostegia xalapensis*.

Tratamiento	Tiempo de tratamiento (s)	Energía aplicada ($J \text{ g}^{-1}$)
MV10	10	287.4
MV30	30	862.2
MV60	60	1724.4
US60-500	3600	201.6



compuestos en tejidos epidérmicos o en estructuras celulares resistentes puede explicar su retención en el residuo, convirtiendo a este subproducto en una fuente potencial de compuestos bioactivos para procesos de valorización agroindustrial.

Comparando los tratamientos con las muestras de referencia, se observa que los métodos de extracción asistida incrementaron notablemente la recuperación de antocianinas. El tratamiento más eficiente (US60 500) presentó una concentración aproximadamente 87% superior a la del jugo de nihua y 185.5% mayor que la del residuo. Estos resultados evidencian el potencial de las tecnologías asistidas con US o MW para mejorar el aprovechamiento de pigmentos naturales presentes en la nihua. Para el tratamiento con US, se necesitan largos periodos y cantidades muy pequeñas de muestra, lo que podría ser una limitante. Mientras, que usando MV la potencia es mayor, lo que se traduce en menores tiempos de tratamiento, además que es una tecnología más barata y disponible.

Conclusiones

En conjunto, los hallazgos sugieren que la aplicación de energía acústica y radiante constituye una estrategia efectiva para incrementar la extracción de antocianinas a partir de matrices vegetales de nihua. El desempeño superior de los tratamientos MV 60 y US60 500 indica que la disrupción celular intensa favorece la liberación de estos compuestos, aunque futuros estudios deberían evaluar simultáneamente parámetros de estabilidad, capacidad antioxidante y posibles mecanismos de degradación para optimizar las condiciones de procesamiento y maximizar el rendimiento de extracción.

Literatura Citada

- Carreira-Casais, A., Carpena, M., Pereira, A. G., Chamorro, F., Soria-Lopez, A., Perez, P. G., Otero, P., Cao, H., Xiao, J., Simal-Gandara, J., & Prieto, M. A. (2021). Critical Variables Influencing the Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds—A Review. *Chemistry Proceedings*, 5(1), 50. <https://www.mdpi.com/2673-4583/5/1/50>
- Elez Garofulić, I., Repajić, M., Zorić, Z., Jurendić, T., & Dragović-Uzelac, V. (2023). Evaluation of Microwave- and Ultrasound-Assisted Extraction Techniques for Revalorization of Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) Fruit Pomace Anthocyanins. *Sustainability*, 15(9), 7047. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/9/7047>
- González-Sánchez, J. A., Fajardo-Franco, M. L., Chepe-Cruz, G., & Aguilar-Tlatelpa, M. (2026). CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE MUJUT (*Conostegia xalapensis*) EN HUEHUETLA, PUEBLA, MÉXICO. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 49(1), 53. <https://doi.org/10.35196/rfm.2026.1.53>

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- Lee, J., Durst, R. W., Wrolstad, R. E., & Collaborators:.. (2005). Determination of Total Monomeric Anthocyanin Pigment Content of Fruit Juices, Beverages, Natural Colorants, and Wines by the pH Differential Method: Collaborative Study. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 88(5), 1269-1278. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269>
- Leonarski, E., Kuasnei, M., dos Santos, E. H., Benvenutti, L., Moraes, P. A. D., Cesca, K., de Oliveira, D., & Zielinski, A. A. F. (2025). Ultrasound and microwave-assisted extractions as green and efficient approaches to recover anthocyanin from black rice bran. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(5), 7251-7264. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05479-4>
- Tena, N., & Asuero, A. G. (2022). Up-To-Date Analysis of the Extraction Methods for Anthocyanins: Principles of the Techniques, Optimization, Technical Progress, and Industrial Application. *Antioxidants*, 11(2), 286. <https://www.mdpi.com/2076-3921/11/2/286>



Los grillos domésticos (*Acheta domestica*) se adquirieron en una granja especializada (Griyum), se secaron a 65 °C durante 24 h y se molieron para la obtención de harina (HGD). Posteriormente, la harina se desengrasó mediante extracción con hexano durante 2 h en un sistema Soxhlet (HGDD) y se obtuvo un concentrado proteico (CPGD) mediante solubilización alcalina a pH 10.5 y precipitación isoelectrica a pH 4.5.

Se evaluaron las siguientes propiedades:

Composición proximal: se determinó el contenido de proteína, lípidos, fibra, cenizas y carbohidratos de la harina de grillo (HGD) y la harina de grillo desengrasada (HGDD).

Solubilidad y potencial zeta: se evaluó la solubilidad de las proteínas en función del pH y se determinó el potencial zeta para caracterizar la carga superficial e identificar el punto isoelectrico del concentrado proteico.

Capacidad de retención de agua y aceite: se determinó la capacidad de retención de agua (WHC) y la capacidad de retención de aceite (OBC) del concentrado proteico, expresadas como gramos de agua o aceite retenidos por gramo de muestra.

Propiedades reológicas: se evaluó el comportamiento viscoelástico del concentrado proteico mediante los módulos de almacenamiento (G') y pérdida (G''), así como su comportamiento durante el calentamiento para determinar la formación de la red proteica y la temperatura de gelificación.

Espectroscopía FTIR: se caracterizó la estructura de las proteínas mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Se analizaron las bandas características de las proteínas y se realizó la deconvolución de la región Amida I para determinar la contribución de las estructuras secundarias.

Digestibilidad *in vitro*: se evaluó la digestibilidad proteica del concentrado mediante hidrólisis enzimática utilizando pepsina y pancreatina para simular las etapas de digestión gastrointestinal.

Todos los análisis se realizaron por triplicado y los datos se procesaron estadísticamente con ANOVA y pruebas de Tukey ($p \leq 0.05$).

Resultados y discusión

El desengrasado incrementó el contenido de proteína de 51.63 ± 0.54 a 69.92 ± 0.05 % y redujo los lípidos de 25.75 ± 0.14 a 0.68 ± 0.04 %, evidenciando la concentración de la fracción proteica. La solubilidad dependió del pH, con un mínimo de 2 % a pH 5, próximo al punto isoelectrico, y un máximo de 91 % a pH 11. Este comportamiento fue consistente

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



- Lam, A. C., Can Karaca, A., Tyler, R. T., & Nickerson, M. T. (2018). Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality. *Food Research International*, 108, 74-82.
- Lanza, R. F., Muccio, E., Malvano, F., Darvishikolour, M., Marra, F., Campanella, O. H., & Albanese, D. (2025). Tuning gelation of insect proteins: Effect of ionic strength on *Acheta domesticus* protein extracts. *Gels*, 11(12), 937.
- Yi, L., Lakemond, C. M. M., Sagis, L. M. C., Eisner-Schadler, V., van Huis, A., & van Boekel, M. A. J. S. (2013). Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry*, 141(4), 3341–3348.
- Zielińska, E., Karaś, M., & Baraniak, B. (2018). Comparison of functional properties of edible insect and soy protein isolates. *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 323–331.
- Zhang, F., Xu, Y., Kong, B., Liu, Q., & Wang, H. (2022). Comparative study of pre-extraction treatments on protein properties of *Tenebrio molitor*. *Journal of Food Engineering*, 316, 110789.



capacidad antioxidante observada respaldan la valorización de esta especie como recurso agroalimentario.

Palabras clave: ñame, composición proximal, capacidad antioxidante, compuestos fenoles.

Abstract

Dioscorea alata L. is a tuber widely studied and cultivated in different regions of the world, mainly in Asia and Africa, where yams are of agri-food importance, whereas in the Americas their production and utilization are limited and, in Mexico, their valorization remains low. The objective of this study was to characterize the proximate composition, quantify phenolic compounds, and evaluate antioxidant capacity to assess the agri-food potential of this species. Tubers were collected in the community of Ecatlan, municipality of Jonotla, Puebla, Mexico; subsequently, they were dehydrated at 40 °C, milled, and sieved. Proximate composition was determined using official AOAC methods, including Kjeldahl for protein, Soxhlet for fat, incineration for ash, and carbohydrates by difference. Total, phenolics were determined using the Folin-Ciocalteu method, total flavonoids using the $\text{NaNO}_2\text{-AlCl}_3$ method with catechin as the standard, and antioxidant capacity using ABTS, DPPH, and FRAP assays. On a dry basis, protein, crude fiber, ash, and fat contents were $8.46 \pm 0.02\%$, $4.37 \pm 0.53\%$, $3.91 \pm 0.08\%$, and $0.56 \pm 0.11\%$, respectively. Total phenolics were 0.213 ± 0.003 mg GAE/g, and total flavonoids were 0.032 ± 0.005 mg CE/g. Antioxidant capacity was 0.871 ± 0.060 $\mu\text{mol TE/g}$ by ABTS, 0.971 $\mu\text{mol TE/g}$ by DPPH, and 0.871 ± 0.060 $\mu\text{mol TE/g}$ by FRAP. Overall, the proximate composition, phenolic compounds, and antioxidant capacity observed support the valorization of this species as an agri-food resource.

Keywords: yam, proximate composition, antioxidant capacity, phenolic compounds.

Introducción

El género *Dioscorea* comprende más de 600 especies distribuidas en regiones tropicales y subtropicales de África, Asia, América Latina, el Caribe y Oceanía; sin embargo, solo una pequeña proporción ha sido domesticada y utilizada ampliamente con fines alimentarios (Obidiegwu et al., 2020). Dentro de este género, *Dioscorea alata* L., conocida como ñame de agua o ñame grande, destaca por ser una de las especies de ñame con mayor distribución y uso agroalimentario a escala mundial (Lebot et al., 2023). Aunque los ñames constituyen una fuente alimentaria relevante para millones de personas, su producción se concentra principalmente en África, mientras que la participación del continente americano continúa siendo considerablemente menor (Cordero-Herrera et al., 2026). Esta distribución desigual evidencia oportunidades para ampliar el conocimiento, aprovechamiento y valorización de especies como *D. alata* en regiones donde su utilización agroalimentaria es todavía escasa.



Obtención de extractos

Los extractos utilizados para la cuantificación de fenoles totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante se obtuvieron de acuerdo con el protocolo de extracción establecido en el laboratorio. La harina se mezcló con metanol al 80 % en una relación 1:10 (m/v) y se agitó en vortex durante 1 min. Posteriormente, el pH se ajustó a 3 con HCl 0.1 N, se agitó nuevamente durante 3 min y se sometió a sonicación durante 15 min. La extracción continuó mediante agitación a 30 °C y 200 rpm durante 30 min. Finalmente, la mezcla se centrifugó a 4000 rpm durante 15 min y el sobrenadante se llevó a un volumen final de 10 mL con metanol al 80 %.

Determinación de fenoles totales

El contenido de fenoles totales se determinó siguiendo la metodología de Singleton y Rossi (1965), con modificaciones, mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu y utilizando ácido gálico como estándar. En cada pozo de una microplaca se adicionaron 25 μ L del extracto o estándar de ácido gálico, 125 μ L de agua destilada, 20 μ L del reactivo de Folin-Ciocalteu y 30 μ L de Na_2CO_3 al 20 %. La mezcla se mantuvo durante 30 min en oscuridad y posteriormente se registró la absorbancia a 760 nm. Los resultados se calcularon a partir de la curva de calibración de ácido gálico y se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra en base seca (mg EAG/g BS).

Determinación de flavonoides

Los flavonoides totales se determinaron siguiendo la metodología de Kubola y Siriamornpun (2011), con modificaciones, mediante el método colorimétrico de NaNO_2 - AlCl_3 y utilizando catequina como estándar. Se mezclaron 0.5 mL del extracto con 2.25 mL de agua destilada y 0.15 mL de NaNO_2 al 5 %, dejando reaccionar durante 6 min. Posteriormente, se adicionaron 0.30 mL de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ al 10 % y, después de 5 min, 1 mL de NaOH al 5 %. La mezcla se agitó en vortex durante 3 min a 3000 rpm. Se transfirieron 200 μ L de la mezcla de reacción a una microplaca y la absorbancia se registró a 510 nm. Los resultados se calcularon mediante la curva de calibración de catequina y se expresaron como mg equivalentes de catequina por gramo de muestra en base seca (mg EC/g BS).

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante por ABTS se determinó siguiendo la metodología de Re et al. (1999), con modificaciones. La solución del radical $\text{ABTS}^{\cdot+}$ se preparó a partir de una solución de ABTS 7.4 mM y una solución de persulfato 2.6 mM, las cuales se mezclaron en volúmenes iguales y se mantuvieron durante 16 h a temperatura ambiente y en oscuridad. En una microplaca se adicionaron 20 μ L del extracto o estándar de Trolox y 180 μ L de la solución $\text{ABTS}^{\cdot+}$. La mezcla se mantuvo



durante 10 min protegida de la luz y posteriormente se registró la absorbancia a 734 nm. La capacidad antioxidante se calculó mediante una curva de calibración de Trolox y se expresó como μmol equivalentes de Trolox por gramo de muestra en base seca ($\mu\text{mol ET/g BS}$).

Por otro lado capacidad antioxidante mediante DPPH se determinó de acuerdo con el protocolo establecido en el laboratorio. Se preparó una solución de DPPH 0.5 mM en metanol al 80 % y se utilizó Trolox como estándar de calibración. En cada pozo de una microplaca se adicionaron 200 μL del extracto o estándar de Trolox y 50 μL de la solución de DPPH. El control estuvo constituido por 200 μL de metanol al 80 % y 50 μL de DPPH, mientras que el blanco contenía 250 μL de metanol al 80 %. Después de 30 min de reacción, la absorbancia se registró a 515 nm. La capacidad antioxidante se calculó con respecto a la curva de Trolox y se expresó como $\mu\text{mol ET/g BS}$.

Por último el poder reductor se determinó siguiendo la metodología de Benzie y Strain (1996), con modificaciones. El reactivo FRAP se preparó mediante la mezcla de buffer de acetatos 300 mM, pH 3.6, TPTZ 10 mM y $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 20 mM, en una proporción de 10:1:1. En cada pozo de una microplaca se adicionaron 20 μL del extracto o estándar de Trolox, 180 μL del reactivo FRAP y 60 μL de agua destilada. La placa se agitó durante 30 s y la absorbancia se registró a 530 nm. Los resultados se calcularon mediante una curva de calibración de Trolox y se expresaron como μmol equivalentes de Trolox por gramo de muestra en base seca ($\mu\text{mol ET/g BS}$).

Análisis estadístico

Las determinaciones se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. El análisis de los resultados se realizó mediante estadística descriptiva.

Resultados y discusión

Composición proximal

La composición proximal de la especie *Dioscorea alata* L. se presenta en el cuadro 1. Los contenidos de proteínas, fibra cruda, cenizas y grasa se encontraron próximos a los valores reportados por Batuwita et al. (2025). Por su parte Lebot net al. (2023) señala que las diferencias en la composición de *D.alata* pueden estar relacionadas a diferentes factores como el genotipo, las condiciones ambientales y el estado de la planta.

Cuadro 1 Composición Proximal de Dioscorea alata L.

	<i>Resultado (%)</i>
<i>Materia seca</i>	91.83 ± 0.04
<i>Proteína</i>	8.46 ± 0.02
<i>Fibra cruda</i>	4.37 ± 0.53



and *Coleus esculentus* from Cameroon. *Food Chemistry Advances*, 3, 100500. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100500>

Lebot, V., Lawac, F., & Legendre, L. (2023). The greater yam (*Dioscorea alata* L.): A review of its phytochemical content and potential for processed products and biofortification. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104987. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104987>

Obidiegwu, J. E., Lyons, J. B., & Chilaka, C. A. (2020). The *Dioscorea* genus (yam)—An appraisal of nutritional and therapeutic potentials. *Foods*, 9(9), 1304. <https://doi.org/10.3390/foods9091304>

Rasheed, H., Deng, B., Ahmad, D., & Bao, J. (2024). Genetic diversity and genome-wide association study of total phenolics, flavonoids, and antioxidant properties in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), 12795. <https://doi.org/10.3390/ijms252312795>

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. doi: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3.

Sahoo, M., Titikshya, S., Kumar, V., & Naik, S. N. (2023). Physico-chemical compositions, nutraceutical properties, and starch-related techno-functional, thermal, and morphological characteristics of underutilized yam flour (*Dioscorea* spp.) from Odisha. *Food Bioscience*, 56, 103103. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103103>

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. doi: 10.5344/ajev.1965.16.3.144.

Srivichai, S., & Hongsprabhas, P. (2020). Profiling anthocyanins in Thai purple yams (*Dioscorea alata* L.). *International Journal of Food Science*, 2020, 1594291. <https://doi.org/10.1155/2020/1594291>

Wambua, M., Nduko, J. M., Matofari, J., & Mulwa, R. (2024). Nutritional, safety, and starch properties of flour from selected sweet cassava (*Manihot esculenta* Crantz) varieties grown in Nakuru County Kenya. *Journal of Food Composition and Analysis*, 135, 106684. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106684>

Wang, P., Shan, N., Ali, A., Sun, J., Luo, S., Xiao, Y., Wang, S., Hu, R., Huang, Y., & Zhou, Q. (2022). Comprehensive evaluation of functional components, biological activities, and minerals of yam species (*Dioscorea polystachya* and *D. alata*) from China. *LWT*, 168, 113964. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113964>

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



inifap



Wang, Y., Lu, R.-S., Li, M.-H., Lu, X.-Y., Sun, X.-Q., & Zhang, Y.-M. (2024). Unraveling the molecular basis of color variation in *Dioscorea alata* tubers: Integrated transcriptome and metabolomics analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(4), 2057. <https://doi.org/10.3390/ijms25042057>



Efecto de hidrocoloides sobre las propiedades funcionales y estabilidad de geles de almidón de arroz tipo Morelos

Lara Hernández Gaby de Jesús^a, Aguirre-Mandujano Eleazar^b, López-Monterrubio Diana Itzel^b, Hernández-Rodríguez Blanca Elizabeth^b

Mesa: Nuevas perspectivas de Química: de lo molecular a lo global

Resumen

La harina y el almidón de arroz presentan propiedades funcionales de interés para el desarrollo de sistemas alimentarios; sin embargo, las diferencias en su composición y la incorporación de hidrocoloides pueden modificar su interacción con el agua y la estabilidad de los geles obtenidos. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la harina y el almidón aislado de arroz y evaluar el efecto de la incorporación de goma guar, goma arábica y pectina, a concentraciones de 1 y 2 %, sobre las propiedades funcionales y la estabilidad de los geles durante el almacenamiento. El almidón se aisló mediante tratamiento alcalino y se determinó su rendimiento. Se realizó el análisis proximal de la harina y el almidón, y se prepararon geles control y adicionados con los diferentes hidrocoloides. Se evaluaron el poder de hinchamiento, la solubilidad y la sinéresis durante 1, 7 y 30 días de almacenamiento. El aislamiento presentó un rendimiento de 53.30 %. La harina mostró mayor contenido de proteína (8.46 %) y extracto etéreo (2.06 %) que el almidón aislado (0.78 y 0.14 %, respectivamente), evidenciando la reducción de componentes no amiláceos durante el aislamiento. Los hidrocoloides modificaron el comportamiento funcional de los geles, observándose diferencias significativas en el poder de hinchamiento de ambas matrices y en la solubilidad del almidón ($p < 0.05$). Particularmente, los geles adicionados con goma guar no presentaron sinéresis durante los 30 días de almacenamiento. Los resultados muestran que la composición de la matriz y el tipo de hidrocoloide influyen en las propiedades funcionales y en la estabilidad de los geles de arroz.

Palabras clave: arroz mexicano; hidrocoloides; poder de hinchamiento; solubilidad; sinéresis.

^a Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera Federal México Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.



la cocción (INIFAP, 2021). En contraste con otros tipos de arroz de grano cristalino, se han reportado diferencias en el tamaño de grano y rendimiento, características que hacen que este material sea de interés de estudio en cuanto a las propiedades funcionales de su harina y almidón aislado.

Aunque la harina de arroz contiene al almidón como componente predominante, constituye una matriz más compleja debido a la presencia de proteínas, lípidos, fibra y minerales. Estos componentes no amiláceos pueden interactuar con el almidón y el agua, modificando el comportamiento fisicoquímico y funcional de la matriz (Kraithong et al., 2023). Por esta razón, la utilización de harina o almidón aislado puede originar diferencias en propiedades relacionadas con la hidratación, gelatinización, viscosidad y formación de estructuras durante el procesamiento, por lo que resulta de interés evaluar ambas matrices bajo condiciones comparables.

Una alternativa para modificar las propiedades funcionales y mejorar la estabilidad de los sistemas a base de almidón consiste en la incorporación de hidrocoloides. Estos biopolímeros presentan una elevada afinidad por el agua y son utilizados en alimentos principalmente como agentes espesantes, estabilizantes y modificadores de textura. Su incorporación puede alterar las propiedades de hidratación, gelatinización y estabilidad de las matrices de harina de arroz. Sin embargo, sus efectos dependen de factores como la naturaleza y estructura del hidrocoloide, su concentración y las características de los componentes presentes en el sistema (Kraithong et al., 2023).

Entre los hidrocoloides utilizados en sistemas alimentarios se encuentran la goma guar, la goma arábiga y la pectina, cuyas diferencias estructurales pueden producir comportamientos distintos al interactuar con el almidón y otros componentes de la matriz. Particularmente, se ha demostrado que la incorporación de goma guar puede modificar las propiedades de empastamiento y viscoelásticas de geles de almidón de arroz y reducir su tendencia a la sinéresis bajo determinadas condiciones de almacenamiento, debido, entre otros mecanismos, a su capacidad para interactuar con el agua y modificar la organización del sistema (Xu et al., 2022).

Las propiedades reológicas permiten caracterizar la respuesta viscoelástica de estos sistemas y aportar información sobre su comportamiento estructural frente a una deformación. Los módulos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') representan las contribuciones elástica y viscosa, respectivamente (Xu et al., 2022), y permiten evaluar cómo la incorporación de hidrocoloides modifica el comportamiento de la matriz.

En este contexto, resulta relevante estudiar comparativamente el comportamiento de la harina y del almidón aislado de arroz y determinar la respuesta de ambas matrices ante la incorporación de diferentes hidrocoloides. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue



caracterizar la harina y el almidón aislado de arroz y evaluar el efecto de la incorporación de goma guar, goma arábica y pectina, a concentraciones de 1 y 2 %, sobre las propiedades funcionales, el comportamiento reológico y la estabilidad durante el almacenamiento de los geles obtenidos.

Materiales y Métodos

Ubicación del trabajo

La investigación se realizó de enero a diciembre de 2025 en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. En este laboratorio se realizó el aislamiento del almidón de arroz, la preparación de los geles de harina y almidón adicionados con hidrocoloides y la determinación de sus propiedades funcionales y estabilidad durante el almacenamiento.

Materiales

Se utilizó harina integral de arroz tipo Morelos, libre de gluten, adquirida de La Molienda (Pachuca de Soto, Hidalgo, México). Para el aislamiento del almidón se empleó hidróxido de sodio (NaOH, 97 %, Meyer®, México). Para la elaboración de los geles se utilizaron pectina cítrica de gelación rápida (PE; CEDROSA®, grado de esterificación de 74.2 %), proporcionada por Central de Drogas S.A. de C.V. (Naucalpan, Estado de México, México); goma guar (GG; HIGUM 100/5000), adquirida de Makymat (Naucalpan de Juárez, Estado de México, México); y goma arábica (GA; G9752-1KG), adquirida de Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EE. UU.). El agua utilizada durante los experimentos fue destilada y desionizada.

Aislamiento del almidón de arroz

La harina integral de arroz fue sometida a molienda y tamizado. Para la obtención del almidón utilizado en los ensayos posteriores, se emplearon 500 g de harina y se realizó un aislamiento alcalino basado en Wang y Wang (2004), con modificaciones. La harina se maceró durante 24 h en una solución de NaOH al 0.25 % (p/v), manteniendo una relación harina:solución de 1:6. Posteriormente, el macerado se centrifugó a 5500 rpm durante 15 min a 21 °C en una centrífuga 5810 R (Eppendorf, Alemania). El sobrenadante se descartó y el sedimento se sometió a molienda húmeda con agua destilada, manteniendo la misma relación 1:6, en una licuadora Oster 465-15 (Newell Brands de México S.A. de C.V., Ciudad de México, México) durante 1 min. La suspensión obtenida se lavó con agua destilada y se centrifugó a 6500 rpm durante 15 min a 21 °C. El procedimiento de lavado y centrifugación se repitió tres veces. El sólido recuperado se secó en una estufa con recirculación de aire HCF-62 (Riossa Digital, Puebla, México) a 40 °C durante 24 h. Finalmente, el almidón seco

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

15 y 16 octubre de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MODALIDAD: HÍBRIDO



Almidón (A)	CTR-A	GG-A 1% / GG-A 2%	GA-A 1% / GA-A 2%	PE-A 1% / PE-A 2%
Harina (H)	CTR-H	GG-H 1% / GG-H 2%	GA-H 1% / GA-H 2%	PE-H 1% / PE-H 2%

Nota: A = almidón de arroz; H = harina de arroz; GG = goma guar; GA = goma arábica; PE = pectina cítrica; CTR = control.

Las dispersiones se calentaron posteriormente en baño María sobre una parrilla eléctrica a 95 ± 1 °C durante 30 min para favorecer la gelatinización y formación de los geles. Una vez concluido el tratamiento térmico, los geles se enfriaron a temperatura ambiente durante 30 min y se almacenaron a 4 ± 1 °C durante 12 h antes de su análisis. En total, se obtuvieron 14 formulaciones: siete elaboradas con harina y siete con almidón de arroz, correspondientes a un control y a tratamientos adicionados con GG, GA o PE al 1 y 2 %.

Poder de hinchamiento y solubilidad

El poder de hinchamiento y la solubilidad de los geles se determinaron mediante el método descrito por Castro et al. (2018), con modificaciones. Se pesaron aproximadamente 3 g de cada gel previamente preparado y se registró la masa exacta utilizada en cada determinación. Las muestras se centrifugaron a $2500 \times g$ durante 15 min en una centrífuga 5810 R (Eppendorf, Alemania). Después de la centrifugación, el sobrenadante se separó cuidadosamente del sedimento y este último se pesó para determinar el poder de hinchamiento. El sobrenadante recuperado se transfirió a una placa de Petri y se secó a 105 °C hasta alcanzar peso constante; posteriormente, se determinó la masa del residuo seco. El poder de hinchamiento y la solubilidad se calcularon mediante las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

Poder de hinchamiento (Ecuación 2):

$$PH = \frac{P_{SH}}{P_M} \quad (2)$$

donde:

PH = poder de hinchamiento (g/g);

P_{SH} = peso del sedimento húmedo después de la centrifugación (g);

P_M = peso de la muestra de gel utilizada en el ensayo (g).

Solubilidad (Ecuación 3):



$$S(\%) = \frac{P_{SS}}{P_{SH}} \times 100 \quad (3)$$

donde:

S = solubilidad (%);

P_{SS} = peso del sólido seco recuperado del sobrenadante (g);

P_{SH} = peso del sedimento húmedo después de la centrifugación (g).

Determinación de la sinéresis

La sinéresis de los geles se determinó de acuerdo con el método descrito por Funami et al. (2005), con modificaciones. Se colocaron aproximadamente 5 g de cada gel en tubos de centrífuga de 50 mL y las muestras se almacenaron en refrigeración a 4 ± 1 °C durante 1, 7 y 30 días. Al término de cada periodo de almacenamiento, las muestras correspondientes se retiraron de refrigeración 1 h antes del análisis para permitir que alcanzaran la temperatura ambiente. Posteriormente, se centrifugaron a $3000 \times g$ durante 15 min a temperatura ambiente. El sobrenadante recuperado después de la centrifugación se separó cuidadosamente y se determinó su masa. La sinéresis se expresó como el porcentaje de líquido liberado respecto a la masa inicial del gel y se calculó mediante la Ecuación 4:

$$\text{Sinéresis (\%)} = \frac{P_S}{P_M} \times 100$$

donde:

P_S = masa del sobrenadante recuperado después de la centrifugación (g);

P_M = masa inicial del gel utilizada para la determinación (5 g).

Propiedades reológicas

Las propiedades viscoelásticas de los geles se evaluaron mediante ensayos oscilatorios utilizando un reómetro MCR301 equipado con una geometría de placas paralelas PP50 (50 mm). Se realizaron barridos de frecuencia angular de 0.1 a 100 rad/s empleando una deformación de 0.1%. Se registraron el módulo de almacenamiento (G'), el módulo de pérdida (G''), el factor de pérdida ($\tan \delta$) y la viscosidad compleja (η^*). Para la comparación gráfica de los tratamientos se consideró la región instrumental común con mediciones válidas, comprendida entre 2.81 y 100 red/s. Los resultados reológicos se analizaron de manera descriptiva.

Análisis estadístico



Se evaluaron dos matrices, harina (H) y almidón aislado de arroz (A), y siete formulaciones por matriz: un control sin hidrocoloide (CTR) y seis tratamientos obtenidos mediante la incorporación de goma guar (GG), goma arábica (GA) o pectina cítrica (PE) a concentraciones de 1 y 2 %, para un total de 14 tratamientos. La unidad experimental estuvo constituida por el gel correspondiente a cada formulación y repetición independiente.

Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. Debido al reducido número de observaciones por tratamiento y a que no se asumió normalidad en la distribución de los datos, las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Cuando se detectaron diferencias globales significativas, se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba *post hoc* de Dunn, aplicando el procedimiento de Holm para el ajuste de la probabilidad asociado a comparaciones múltiples. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Para el poder de hinchamiento y la solubilidad, los tratamientos se compararon por separado dentro de cada matriz. Los tratamientos adicionados con goma guar no se incluyeron en estos análisis debido a que dichas propiedades no pudieron determinarse mediante el procedimiento utilizado (ND). Para la sinéresis, los tratamientos se analizaron independientemente para cada matriz y tiempo de almacenamiento (1, 7 y 30 días). En esta determinación, los tratamientos con goma guar sí fueron incluidos, ya que la ausencia de sobrenadante correspondió a un valor experimental de 0 % de sinéresis.

Las diferencias entre tratamientos se representaron mediante letras; los tratamientos que comparten al menos una letra no presentan diferencias significativas entre sí, mientras que aquellos que no comparten letras presentan diferencias significativas ($p < 0.05$).

Resultados y discusión

Composición químico-proximal y rendimiento de aislamiento

La composición químico proximal evidenció diferencias entre la harina y el almidón aislado de arroz (Cuadro 2). La harina presentó contenidos de proteína cruda, extracto etéreo, cenizas y fibra cruda de 8.46, 2.06, 1.42 y 0.93 %, respectivamente, mientras que en el almidón aislado estos componentes disminuyeron a 0.78, 0.14, 1.15 y 0.64 %, respectivamente. En contraste, los carbohidratos calculados por diferencia aumentaron de 87.13 % en la harina a 97.28 % en el almidón, evidenciando la obtención de una fracción enriquecida en carbohidratos después del proceso de aislamiento.

Cuadro 2. Composición químico proximal de la harina y el almidón aislado de arroz.

Componente (%)	Harina (H)	Almidón (A)
----------------	------------	-------------



Proteína cruda	8.46 ± 0.19	0.78 ± 0.16
Extracto etéreo	2.06 ± 0.07	0.14 ± 0.03
Cenizas	1.42 ± 0.02	1.15 ± 0.01
Fibra cruda	0.93 ± 0.01	0.64 ± 0.06
Carbohidratos ¹	87.13 ± 0.02	97.28 ± 0.01

¹ Calculados por diferencia. Valores expresados en base seca.

La reducción más notoria correspondió al contenido de proteína cruda, que disminuyó de 8.46 % en la harina a 0.78 % en el almidón aislado. Este comportamiento es congruente con el procedimiento alcalino empleado. La extracción alcalina constituye un método convencional para la separación del almidón y las proteínas del arroz; el tratamiento con NaOH favorece la solubilización de proteínas, mientras que las etapas posteriores de centrifugación y lavado permiten separar la fracción rica en almidón. De Souza et al. (2016), mediante extracción de harina de arroz con NaOH al 0.18 %, obtuvieron igualmente una fracción rica en almidón con bajo contenido residual de proteína.

El extracto etéreo también presentó una reducción considerable, de 2.06 % en la harina a 0.14 % en el almidón, mientras que las cenizas disminuyeron de 1.42 a 1.15 % y la fibra cruda de 0.93 a 0.64 %. En conjunto, la disminución de los componentes no amiláceos es consistente con las sucesivas etapas de separación y lavado involucradas en el aislamiento. Como consecuencia, los carbohidratos calculados por diferencia aumentaron hasta 97.28 % en el almidón. Sin embargo, este porcentaje no debe considerarse equivalente a 97.28 % de pureza de almidón, ya que corresponde a carbohidratos estimados por diferencia y no a una determinación específica de almidón total.

Rendimiento de aislamiento

En la extracción independiente realizada para determinar el rendimiento se recuperaron 53.298 g de almidón seco a partir de 100 g de harina, correspondientes a un rendimiento de 53.30 %. Debido a que esta determinación se realizó en una sola extracción independiente, el resultado se presenta de manera descriptiva y no se realizó análisis estadístico.

El rendimiento obtenido fue inferior al reportado por Puchongkavarin et al. (2005), quienes evaluaron a escala piloto la producción de almidón de arroz mediante diferentes procedimientos y obtuvieron una recuperación de aproximadamente 79.75 % en base seca utilizando NaOH al 0.4 %. En ese estudio, además, el producto obtenido mediante extracción alcalina presentó 95.7 % de almidón total y 0.48 % de proteína residual. Por otra parte, Choudhary et al. (2025), mediante un procedimiento de maceración alcalina, reportaron rendimientos de 58 % para almidón de arroz blanco y 65 % para arroz rojo, valores más próximos al 53.30 % obtenido en el presente trabajo.



Las diferencias entre los rendimientos reportados no deben atribuirse exclusivamente a la concentración de NaOH. La recuperación de almidón depende de las características de la materia prima y de múltiples variables del procedimiento, entre ellas la relación sólido:líquido, duración y temperatura de maceración, molienda, centrifugación, lavado y recuperación de la fracción sedimentada. La literatura describe concentraciones aproximadas de 0.2–0.5 % de NaOH como habituales para el aislamiento alcalino convencional del almidón de arroz. De Souza et al. (2016), por ejemplo, utilizaron NaOH al 0.18 % a 30 °C durante 30 min, mientras que también describen procedimientos tradicionales que emplean alrededor de 0.3–0.5 % de NaOH y periodos de maceración de hasta 24 h.

En este sentido, las condiciones utilizadas en el presente estudio (NaOH al 0.25 %), relación harina:solución 1:6 y maceración durante 24 h, seguidas de centrifugaciones y tres ciclos de lavado, se encuentran dentro de las condiciones descritas para procedimientos de aislamiento alcalino de almidón de arroz. No obstante, el rendimiento de 53.30 % fue menor que algunas recuperaciones reportadas, por lo que lo más apropiado es considerarlo como el rendimiento obtenido bajo las condiciones específicas del procedimiento utilizado.

Poder de hinchamiento y solubilidad

El poder de hinchamiento fue afectado significativamente por los tratamientos tanto en los geles elaborados con almidón ($p = 0.0187$) como en los elaborados con harina de arroz ($p = 0.0181$). En la matriz de almidón, el tratamiento control presentó un poder de hinchamiento de 0.243 ± 0.072 g/g, mientras que la incorporación de pectina al 1 % presentó el mayor valor (0.555 ± 0.005 g/g). Al incrementar la concentración de pectina al 2 %, el valor disminuyó a 0.422 ± 0.029 g/g, por lo que el efecto observado no fue proporcional al incremento en la concentración del hidrocoloide.

El poder de hinchamiento está relacionado con la capacidad del sistema amiláceo para captar y retener agua después del tratamiento hidrotérmico y depende de la organización estructural del almidón y de las interacciones entre sus componentes. La incorporación de hidrocoloides puede modificar este comportamiento debido a su elevada afinidad por el agua y a su interacción con los componentes de la matriz; sin embargo, la magnitud y dirección del efecto dependen del tipo y concentración del hidrocoloide y de las características del sistema. Kraithong et al. (2023) señalan precisamente que los hidrocoloides pueden modificar las propiedades de hidratación y gelatinización de la harina de arroz y que sus efectos no son uniformes, debido a diferencias en estructura química, grupos funcionales, conformación y concentración.

En el caso de la pectina existe evidencia directa de su interacción con el almidón de arroz. Chen et al. (2022) demostraron que las moléculas de pectina pueden adsorberse



El mayor valor de solubilidad observado fue en el tratamiento con goma arábica al 2 % esto indica que, bajo las condiciones experimentales utilizadas, esta formulación favoreció una mayor recuperación de material soluble en el sobrenadante respecto al control. Sin embargo, debido a que en el presente estudio no se caracterizó la composición de dicha fracción soluble ni las interacciones moleculares entre goma arábica y almidón, no es posible establecer el mecanismo responsable de este comportamiento únicamente a partir de la determinación de solubilidad.

Por otro lado, en los tratamientos adicionados con goma guar no fue posible obtener una separación definida entre sobrenadante y sedimento después de la centrifugación. En consecuencia, el poder de hinchamiento y la solubilidad no pudieron cuantificarse mediante el procedimiento utilizado y fueron reportados como no determinados (ND). Esto es importante porque no significa poder de hinchamiento = 0 ni solubilidad = 0. De hecho, el comportamiento físico observado sugiere que la incorporación de goma guar alteró considerablemente la separación de fases del sistema. Los hidrocoloides poseen elevada afinidad por el agua y pueden modificar de manera importante las propiedades de hidratación y la estructura de matrices de arroz (Kraithong et al., 2023). Sin embargo, con este ensayo no podemos cuantificar cuánto hinchó o cuánto se solubilizó la goma guar, precisamente porque el método dejó de producir las dos fracciones necesarias para realizar el cálculo.

Sinéresis

La sinéresis de los geles estuvo influenciada por la formulación y el tiempo de almacenamiento. Las muestras se evaluaron después de 1, 7 y 30 días a 4 ± 1 °C, observándose diferencias en la cantidad de sobrenadante liberado entre los tratamientos. Particularmente, los geles adicionados con goma guar (GG), tanto al 1 como al 2 %, no presentaron sobrenadante recuperable durante ninguno de los tres periodos evaluados, independientemente de que la matriz correspondiera a harina o almidón de arroz. Por lo tanto, bajo las condiciones del ensayo, estos tratamientos presentaron 0 % de sinéresis durante los 30 días de almacenamiento (Figura 3). Este comportamiento indica que la incorporación de goma guar favoreció la retención de agua y la estabilidad frente a la separación macroscópica de líquido. Estos incrementos pueden deberse al incremento en la capacidad de recuperación estructural y reducción de la retrogradación durante el almacenamiento refrigerado, provocando una disminución de la disponibilidad del agua libre y se limita la movilidad y reorganización de las cadenas de almidón (Xu et al., 2022). Estos autores también mencionan que geles de almidón de arroz almacenados a 4 °C presentaron una reducción en la retrogradación en presencia de goma guar. Asimismo, durante ensayos de congelación-descongelación, los geles adicionados con goma guar presentaron menor sinéresis que el control, mostrando una mayor estabilidad frente a la separación de agua, lo cual es consistente con los resultados del presente estudio. Por ello, los resultados permiten afirmar que los geles adicionados con goma guar mantuvieron el agua incorporada sin separación



detectable durante 30 días de almacenamiento refrigerado, pero no permiten concluir que la retrogradación haya sido completamente inhibida.

Los tratamientos adicionados con goma arábica y pectina mostraron separación de sobrenadante en diferentes magnitudes durante el almacenamiento, evidenciando que el efecto estabilizante depende del tipo y concentración del hidrocoloide. Este comportamiento concuerda con el hecho de que los hidrocoloides difieren en estructura molecular, capacidad de hidratación, viscosidad e interacciones con los componentes del almidón, factores que determinan su capacidad para modificar la retención y movilidad del agua dentro de los geles.

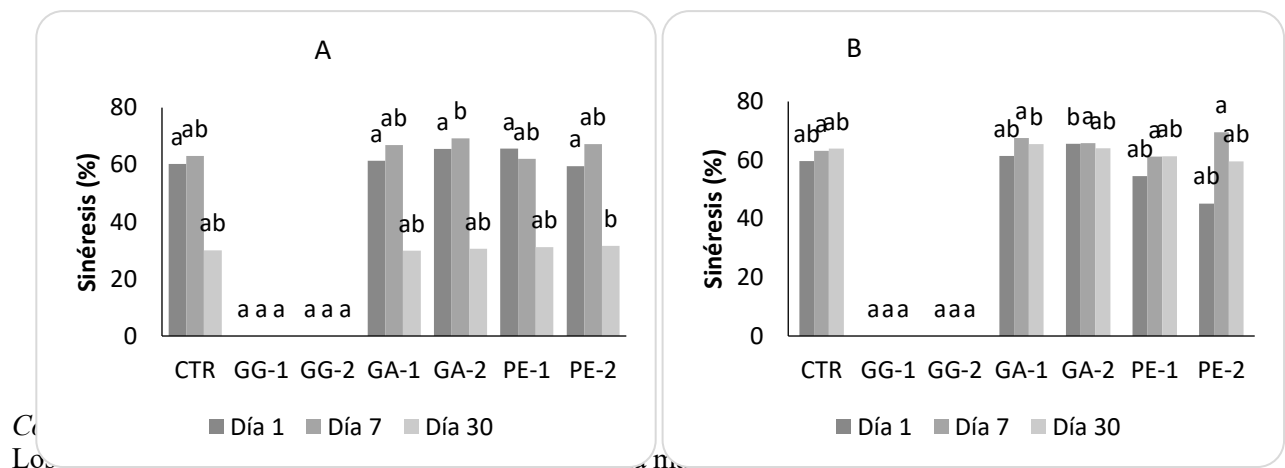


Figura 3. Sinéresis de geles elaborados con almidón (A) y harina de arroz (B) sin hidrocoloide (CTR) y adicionados con goma guar (GG), goma arábica (GA) o pectina cítrica (PE) al 1 y 2 %, después de 1, 7 y 30 días de almacenamiento a 4 ± 1 °C. Los valores se expresan con media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada tiempo de almacenamiento ($p < 0.05$).

dependió del tipo y concentración del hidrocoloide, así como de la matriz utilizada. Debido a que se analizó una repetición por tratamiento, estas diferencias se interpretaron de manera descriptiva.



Conclusiones

El aislamiento alcalino permitió obtener almidón de arroz con menor contenido de componentes no amiláceos respecto a la harina y un rendimiento de 53.30 %. La incorporación de hidrocoloides modificó el poder de hinchamiento, la solubilidad, el comportamiento reológico y la estabilidad de los geles, con respuestas dependientes del tipo de hidrocoloide, su concentración y la matriz utilizada. La goma guar destacó por modificar la respuesta viscoelástica, observándose los mayores valores de G' en adiciones de 2% y por evitar la separación de agua durante los 30 días de almacenamiento refrigerado, tanto en los geles de harina como de almidón. En conjunto, estos resultados evidencian el potencial de los hidrocoloides, particularmente de la goma guar, para modificar las propiedades viscoelásticas y mejorar la estabilidad física de sistemas gelificados a base de arroz.

Literatura citada

AOAC. (2005). Horwitz, W., & Latimer, G. W. (Eds.). Official Methods of Analysis of AOAC International (18th ed.). AOAC International, Gaithersburg, Maryland, USA.

Choudhary, A., Sood, M., Bandral, J. D., Gupta, N., Kour, K., y Kumari, A. (2025). Physico-chemical and structural characterization of starch extracted from red and white rice obtained from North-West Himalayas. *Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews Journal*, 13(3), 369–373. <https://doi.org/10.21276/AATCCReview.2025.13.03.369>

da Silva, L. R., de Carvalho, C. W. P., Velasco, J. I., y Fakhouri, F. M. (2020). Extraction and characterization of starches from pigmented rice. *International journal of biological macromolecules*, 156, 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.034>

de Castro, D. S., dos Santos Moreira, I., de Melo Silva, L. M., Lima, J. P., da Silva, W. P., Gomes, J. P., y de Figueirêdo, R. M. F. (2019). Isolation and characterization of starch from pitomba endocarp. *Food Research International*, 124, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.032>

de Souza, D., Sbardelotto, A. F., Ziegler, D. R., Marczak, L. D. F., y Tessaro, I. C. (2016). Characterization of rice starch and protein obtained by a fast alkaline extraction method. *Food Chemistry*, 191, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.032>

Funami, T., Kataoka, Y., Omoto, T., Goto, Y., Asai, I., y Nishinari, K. (2005). Food hydrocolloids control the gelatinization and retrogradation behavior of starch. 2a. Functions of guar gums with different molecular weights on the gelatinization behavior of corn starch. *Food Hydrocolloids*, 19(1), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.04.008>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), (2023). Variedad de arroz El Siverio, calidad de grano. Gobierno de México. [General Declaration protecting the Geographical Indication of the Morelos State Rice 'Arroz del](#)



[Estado de Morelos' \(published in the Official Journal of the Federation on February 16, 2012\), Mexico, WIPO Lex](#)

Kraithong, S., Theppawong, A., Lee, S., y Huang, R. (2023). Understanding of hydrocolloid functions for enhancing the physicochemical features of rice flour and noodles. *Food Hydrocolloids*, 142, 108821. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108821>

Pourfarzad, A., Yousefi, A., y Ako, K. (2021). Steady/dynamic rheological characterization and FTIT study on wheat starch-sage seed gum blends. *Food Hydrocolloids*, 111, 106380. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106380>.

Puchongkavarin, H., Varavinit, S., y Bergthaller, W. (2005). Comparative study of pilot scale rice starch production by an alkaline and an enzymatic process. *Starch-Stärke*, 57(3-4), 134-144. <https://doi.org/10.1002/star.200400279>

Shoukat, R., Cappai, M., Pilia, L., y Pia, G. (2025). Rice Starch Chemistry, Functional Properties, and Industrial Applications: A Review. *Polymers*, 17(1), 110. <https://doi.org/10.3390/polym17010110>

Wang, L., y Wang, Y. J. (2004). Rice starch isolation by neutral protease and high-intensity ultrasound. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 291-296 <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.11.002>

Xu, X., Ye, S., Zuo, X., y Fang, S. (2022). Impact of guar gum and locust bean gum addition on the pasting, rheological properties, and freeze-thaw stability of rice starch gel. *Foods*, 11(16), 2508. <https://doi.org/10.3390/foods11162508>

Zhang, Y., Dou, B., Jia, J., Liu, Y., y Zhang, N. A. (2023). A study on the structural and digestive properties of rice starch-hydrocolloid complexes treated with heat-moisture treatment. *Foods*, 12(23), 4241. <https://doi.org/10.3390/foods12234241>