

Experiencias del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos en el sector agroalimentario



**Edgar Iván Roldán Cruz - Aurea Bernardino Nicanor
Leopoldo González Cruz y Josefina Porras Saavedra
Coordinación**

**Experiencias del Tecnológico Nacional
de México y sus aliados estratégicos
en el sector agroalimentario**

Experiencias del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos en el sector agroalimentario

©2024, Coordinadores: Edgar Iván Roldán Cruz, Aurea Bernardino Nicanor, Leopoldo González Cruz y Josefina Porras Saavedra

©2024, Por los textos en interiores: Victor Manuel Moo Huchin, Nitmar Itzel Pat Moreno, Adamaris Estefany Caamal Uc, Mariela Irene Moo Huchin, Raciél Javier Estrada León, Jorge Carlos Canto Pinto, Gabriel Lizama Uc & Enrique Sauri Duch / Areli Flores Morales, Nelly Antonia Rojas Caporal, Erik Ocaranza Sánchez & Ángeles Sánchez Contreras / Isabel Araceli Amaro Espejo, María del Refugio Castañeda Chávez, Fabiola Lango Reynoso, Paula Zúñiga Ruiz & Rosa Elena Zamudio Alemán /Aurea Bernardino Nicanor, Edgar Iván Roldán Cruz & Leopoldo González Cruz/ Dolores Gabriela Martínez Vázquez, Brayan Flores Elías, Julia Rosa Medrano Macías, Raúl Rodríguez Herrera, Judith Amador Hernández, René Darío Peralta Rodríguez & Lluvia de Abril Alexandra Soriano Melgar/ Josefina Porras Saavedra, Nalleli Concepción Pérez Pérez & Tomás Tovar Benitez/ Luz del Carmen García Rodríguez, Alejandro Espinosa Calderón, Carlos Alberto Flores Gómez, Oscar Mauricio Álvarez Rosas & Juan Francisco Calderón Gutiérrez/ Francisco Javier Ruiz Ortega, Eddie H. Clemente Torres, Alicia Martínez Rebolgar, Dante Mújica Vargas & Manuel Fortis Hernández/ Elia Trejo Trejo, Natalia Trejo, Celerino Arroyo Cruz & Carlos Abraham Reynoso Ocampo / Itzel Galaviz Villa, Antonio Villegas Vilchis, Isabel Araceli Amaro Espejo, Arturo García Saldaña, Ana Yesica Toga Islava & Erika Michell Cazarín Luna/ María del Carmen Lozano Arizmendi & Cesaire Chiatchoua/ Guillermo Antonio Silva Martínez, Fabiola Estefanía Tristán Flores, Ramón Gerardo Guevara González, Humberto Ramírez Medina, Juan Antonio Cervantes Montelongo, Gabriel Márquez Rojas, Juan Manuel Pichardo González & Gerardo Acosta García/ Arturo F. Castellanos Ruelas, Genovevo Ramírez Jaramillo, José Gabriel Rosado Rubio, David A. Betancur Ancona & Luis A. Chel Guerrero

El Colegio del Estado de Hidalgo

Parque Científico y Tecnológico del Estado de Hidalgo. Edificio Tecnología, Blvd. Circuito La Concepción No.3, C.P 42162. Ex Hacienda de la Concepción. San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo.

Cuidado editorial: Enid Carrillo.

Diseño y maquetación: Margarita Dajui Montiel.

Diseño de portada Autor: Aurelio Agustín Rojas Robledo (autor de la obra),

Raúl Solís Medina (autor de la obra como mural), Técnica empleada: Mosaico bizantino,

Año: 2015.

ISBN ELECTRÓNICO 978-607-8082-35-3

ISBN IMPRESO 978-607-8082-37-7

Primera Edición, 2024

Queda prohibida la reproducción de este libro de forma parcial o total por cualquier medio, bajo las sanciones establecidas por la ley, salvo por la autorización escrita de los editores o autores de la obra.

Impreso y hecho en México/Printed and made in Mexico

Este libro ha sido arbitrado por pares académicos.

Realizado en El Colegio del Estado de Hidalgo.

Experiencias del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos en el sector agroalimentario

Edgar Iván Roldán Cruz, Aurea Bernardino Nicanor,
Leopoldo González Cruz y Josefina Porras Saavedra
Coordinación

CONSEJO EDITORIAL



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



ASA
Red de Atención al
Sector Agroalimentario
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



El Colegio
del Estado
de Hidalgo
Saber para convivir



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

ÍNDICE

- 09 Prólogo**
- 13 Introducción**
- 17 Parte I Impulso al sector agroalimentario**
- 19 *Revalorización del árbol brosimum alicastrum: composición química y efecto de la cocción sobre el potencial antioxidante de la harina y tortillas*
- 41 *Rescate, cultivo y explotación del agave salmiana (maguey pulquero), caso rancho san isidro, nanacamilpa, tlaxcala*
- 71 *El hongo shiitake (lentinula edodes (berk.) Pegler), alternativa alimentaria y medicinal*
- 89 *Modelo de transferencia al sector acuícola pesquero: producto ostión*
- 113 *Experiencia de vinculación Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco-Tecnológico de Celaya-CEH*
- 131 Parte II Agroindustria y Desarrollo**
- 133 *Efectos de diferentes métodos de extracción emergentes en la composición y la capacidad antioxidante de residuos de brócoli.*
- 155 *Pasta alimentaria adicionada con harina de tallos de coliflor e hidrolizados proteicos de frijol: caracterización estructural y potencial antioxidante*
- 175 *Diseño De Sistema Iot De Medición De Variables Para Acuaponía Basado En Temperatura, Ph, Oxígeno Disuelto, Conductividad Eléctrica Y Potencial De Oxido-Reducción*
- 195 *Un Enfoque Evolutivo Para Modelar La Evapotranspiración De Referencia Diaria Con Variables Comúnmente Medibles En Una Estación Climatológica*
- 227 Parte III Legislación y el sector Agroalimentario**
- 229 *Cumplimiento normativo en la agroindustria quesera artesanal: propuesta basada en la formación de clústeres*
- 261 *Herbicida paraquat su movilización a la zona costera y parque nacional sistema arrecifal veracruzano por malas practicas agricolas*
- 279 *Diagnóstico de buenas prácticas agrícolas y campaña de recuperación de envases vacíos de agroquímicos en el municipio de cotaxtla*
- 297 Parte IV Perspectivas en el sector Agroalimentario**
- 299 *Análisis de la influencia del sector agroalimentario en el desarrollo regional de méxico*
- 319 *Aportaciones del laboratorio de biología molecular del tecnm en celaya en la evolución y perspectivas de la biotecnología agrícola en el bajío.*
- 349 *Producción potencial de chia e incorporación en alimentación avícola para incrementar los ácidos grasos poliinsaturados en huevo y carne*

PRÓLOGO

El Tecnológico Nacional de México tiene una vocación de incidencia tecnológica en el desarrollo del país, a través de la cual contribuye de manera importante en las zonas vulnerables de la nación, que tiene presencia en los 32 estados del país y cuenta con 254 instituciones, de las cuales 126 son Institutos Tecnológicos Federales, 122 Institutos Tecnológicos Descentralizados, cuatro Centros Regionales de Optimización y Desarrollo de Equipo (CRODE), un Centro Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación Técnica (CIIDET) y un Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

En especial en el sector agroalimentario, la incidencia de nuestra institución se ve reflejada en la ejecución de proyectos que no solo abordan la ciencia básica, sino que involucran la transferencia de tecnología, estudios de problemáticas regionales y mejoramiento de distintas variedades de cultivos importantes para la alimentación. Aunado a esto, con el propósito de fortalecer los mecanismos de atención del sector social, se han establecido alianzas estratégicas con otras instituciones de educación superior, lo que ha permitido ejecutar proyectos como los contenidos en esta obra, que sin duda serán un referente para visibilizar el rumbo que las instituciones de educación superior podrían adoptar para poner al alcance de la sociedad el conocimiento y su aplicación con un enfoque humanista que permita la transformación de nuestro país.

Como resultado de la conjunción de esfuerzos de la Red de Atención al Sector Agroalimentario (RASA), los capítulos que se presentan en esta edición son una muestra de que el trabajo conjunto puede alcanzar grandes objetivos y que puede ser replicado en diferentes regiones prioritarias de nuestro país. Esperando que la lectura de este libro amplíe el panorama de la importancia del sector Agroalimentario y sus diversas vertientes, despierte el interés de más profesores y estudiantes, para que la atención sea en todo el país y consolidemos la presencia de la RASA.

Mtro. Ramón Jiménez López
Director General del Tecnológico Nacional de México

*La agricultura es la profesión propia del sabio,
la más adecuada al sencillo y
la ocupación más digna para todo hombre libre*
Marco Tulio Cicerón (106 - 43 a.C.)

Ante la necesidad de encontrar un espacio académico donde se pudiera discutir y explorar diversas alternativas y soluciones reales para mejorar las condiciones del campo mexicano y, en consecuencia, mejorar la calidad de vida de los agricultores y trabajadores rurales del país, es como surge la Red de Atención al Sector Agroalimentario (RASA).

La RASA representa un esfuerzo conjugado de un profesional y un talentoso grupo multidisciplinario de investigadoras, investigadores y especialistas, pertenecientes a diversas instituciones públicas de educación superior, colegios y centros de investigación.

El reto que afronta RASA no es menor, desde su objetivo, se estableció generar sinergias entre los diferentes grupos de investigación que lo integran, que permitan atender directamente problemas regionales y nacionales particularmente en el sector agrícola, pecuario y acuícola. Esto, desde una forma estructurada que integra tres ejes estratégicos que atiendan los sectores económicos de producción, transformación y servicios.

Entre las principales temáticas que aborda esta red, se destaca el impulso a la investigación aplicada y la innovación tecnológica para optimizar los procesos productivos, con la intención de mejorar la calidad y la rentabilidad de los cultivos en el país. Por ello, las y los investigadores enfatizaron la necesidad de trabajar en estrecha colaboración con los productores y las comunidades rurales para diseñar soluciones que sean relevantes, factibles y sostenibles a largo plazo.

Como parte de las acciones de esta red, se ha considerado oportuna la publicación del libro *Experiencias del Tecnológico Nacional de México y sus Aliados Estratégicos en el Sector Agroalimentario*. La obra es una compilación de quince trabajos producidos por investigadoras e investigadores de trece diferentes instituciones pertenecientes a RASA, donde identifica y analiza profundamente las diferentes problemáticas.

Los compiladores han seleccionado diligentemente los capítulos que componen el libro. Ha sido un proceso minucioso y certero para condensar el pensamiento de diversos expertos, configurándose como una pequeña muestra de un gran acervo bibliográfico. Asimismo, se ha realizado un excelente trabajo de edición, indispensable para facilitar la comprensión de cada uno de los textos, pero sin dejar de lado

el respeto por el contenido y el espíritu de lo expresado por cada una de las autoras y los autores.

Resulta conveniente advertir al lector sobre una característica distintiva del libro: más que un ejercicio único para producir un documento con un discurso interno, se trata más bien de dar difusión a los casos que han fortalecido o mejorado las acciones que se desarrollan en el sector agroalimentario a través del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos.

La titánica labor de edición llevada a cabo, da como resultado un texto que agrupa en cuatro secciones, quince capítulos que tienen la intención de impulsar al sector agroalimentario, la agroindustria y el desarrollo, normativas y legislaciones del sector agroalimentario, así como sus perspectivas generales. Cabe mencionar que el libro corresponde a las realidades del sector agroalimentario del país.

En definitiva, la reunión de todos estos textos resultó muy fructífera y enriquecedora, ya que fue posible establecer el trabajo colaborativo entre investigadoras e investigadores para la generación de un libro que contribuye al desarrollo del campo mexicano y al bienestar de las comunidades rurales. Siempre se espera que este tipo de iniciativas editoriales puedan contar con el apoyo y la colaboración de todos los actores relevantes, incluyendo el gobierno nacional y local, el sector educativo, el sector privado y la ciudadanía.

Dr. Edgar Castillo Flores
SEPH

INTRODUCCIÓN

El propósito de este libro es divulgar los casos que han fortalecido o mejorado las acciones que se desarrollan en el sector agroalimentario a través del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos. Si bien, de acuerdo con la Comisión Federal de Competencia Económica, el sector agroalimentario involucra a los bienes y servicios relacionados con los productos del campo y se agrupan diversas actividades. En primer lugar, se encuentran aquellas relacionadas con la agricultura, cría y explotación de animales; todas ellas permiten a la población y a la región alcanzar el desarrollo y la alimentación. En segundo lugar, se agrupan las actividades que también producen alimentos y se desarrollan en la industria alimentaria. En tercer lugar, se incluyen las actividades de diferente naturaleza y se relacionan con las anteriores.

En este sentido deviene la importancia de dar a conocer a través de esta obra, los esfuerzos del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos en el sector agroalimentario para la transferencia tecnológica, analizar problemáticas regionales y mostrar los principales hallazgos de distintos proyectos orientados a este sector. En este libro, se presentan quince capítulos agrupados en cuatro secciones: impulso del sector agroalimentario, agroindustria y desarrollo; legislación y el sector agroalimentario; perspectivas en el sector agroalimentario.

En la primera sección “Impulso al sector agroalimentario”, se examinan las aportaciones de investigadores, instituciones académicas y centros de investigación a productores mediante la transferencia tecnológica de procesos productivos para promover el crecimiento de este sector. Por ejemplo, se proporciona información sobre la composición química de cuatro tejidos vegetales de *Brosimum alicastrum* (hojas, cáscara, semilla y piel de semilla) y su efecto sobre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante in vitro de la harina y tortillas. Por otro lado, se describen las actividades realizadas en el cultivo y explotación de agave pulquero en el Rancho San Isidro ubicado en Nanacamilpa, Tlaxcala. Se presentan experiencias sobre la promoción del conocimiento generado en el Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Oaxaca, con la comunidad zapoteca de San Juan Evangelista Analco en la Sierra Norte de Oaxaca, para la

producción de hongo Shiitake (*Lentinula edodes*) en troncos de encino. Asimismo, se describe la vinculación de las productoras Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco con el Tecnológico de Celaya y el Colegio del Estado de Hidalgo para el fortalecimiento de la reproducción intensiva del chinicuil e implementación de un método de conservación del insecto. De manera similar, el Tecnológico Nacional de México y el Instituto Tecnológico de Boca del Río aportó un modelo de transferencia de tecnología al sector pesquero y acuícola a las cooperativas en el municipio de Pueblo Viejo, Veracruz con la finalidad de generar procesos de conservación de productos a partir del recurso ostión y así impulsar su producción, calidad y valor económico.

En la sección dos, titulada “Agroindustria y Desarrollo” se muestra la obtención de compuestos fitoquímicos con actividad biológica a partir de residuos de brócoli a través de métodos alternativos de extracción (ultrasonido, microondas e híbrido) y selección del disolvente idóneo para extraer el mayor contenido del compuesto de interés. De manera paralela, se describe el proceso de transformación de tallos de coliflor en harina y su aplicación junto con péptidos bioactivos de frijol en la producción de una pasta alimentaria con propiedades de textura aceptables para el consumidor. La recuperación y reutilización de estos residuos agroindustriales en la fabricación de nuevos productos alimenticios, además de responder a las demandas de los consumidores por alimentos más saludables y funcionales, contribuyen a la sostenibilidad de la cadena de suministro alimentaria, alineándose con los principios de la economía circular y la valorización de residuos.

Sin duda alguna, los paradigmas de los procesos productivos en el sector agroalimentario, se encuentran en constante cambio. Gracias a la tecnología de sensores, internet, comunicaciones e informática, la tecnología de Internet de las Cosas y su fusión con la Inteligencia Artificial, estas herramientas aportan nuevas formas de mejorar los procesos y modifican la toma de decisiones. En la sección dos, se describe el uso de la tecnología de Internet de las Cosas, en la implementación digital de un sistema para la monitorización en tiempo real de las principales variables que influyen en la calidad del agua. Lo anterior, con la finalidad de proponer acciones para disminuir la mortalidad del pez tilapia, mejorar el manejo de los cultivos e incrementar su producción. Otro de los casos de aplicación de la Inteligencia Artificial es la programación genética para modelar la evapotranspiración de referencia diaria con variables comúnmente medibles en la estación climatológica del estado de Coahuila; este estudio representa un avance en la estimación precisa de la evapotranspiración y constituye una herramienta valiosa para

la gestión eficiente de los recursos hídricos en diversas condiciones climáticas y geográficas.

Es importante reconocer que, para fortalecer el desarrollo de las regiones, los procesos productivos deben diversificarse, considerando aspectos administrativos, de producción, transformación y comercialización. Para ello, es necesario el cumplimiento de las normativas vigentes, por lo que en la sección tres “Legislación y el sector agroalimentario”, se examina el cumplimiento de la norma NOM-251-SSA1-2009, en la agroindustria quesera artesanal de Ixmiquilpan, Hidalgo, resultando en la propuesta de tres clústeres representativos: Familiar-Comercial-Diversificado, Familiar-Comercial y Familiar Tradicional. En esta misma sección, se muestra el análisis de la concentración del herbicida paraquat en agua superficial del río Jamapa en la zona centro del golfo de México y su posible movilización hacia la zona costera y al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

Cabe resaltar que hablar del sector agroalimentario, implica un enfoque holístico, por lo anterior, en esta sección se plasma una estrategia exitosa para el manejo de residuos peligrosos o envases vacíos de agroquímicos en el cultivo de papaya (*Carica papaya* L.) así como los resultados de una campaña de recolección de envases agroquímicos en el municipio de Cotaxtla, Veracruz.

Finalmente, en la sección cuatro “Perspectivas en el sector agroalimentario”, se analiza la relación del sector agroalimentario sobre el desarrollo regional en México mediante el cálculo de coeficientes de correlación y modelos de regresión múltiple. En esta sección, se brinda un panorama de las investigaciones desarrolladas en el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya con énfasis en los mecanismos moleculares de las interacciones planta-patógeno, así como en la implementación de estrategias para el aumento del rendimiento en campo, tal es el caso de la aplicación de fitohormonas exógenas en chile ancho y jalapeño y la aplicación de giberelinas exógenas en plantas de amaranto. De manera similar, para incrementar el aporte de ácidos grasos poliinsaturados en huevo y carne, una de las estrategias ha sido mediante la incorporación de harina integral de chíá en la alimentación de aves de postura y en la dieta de pollos de engorda.

Dra. Josefina Porras Saavedra

The image features a woman standing in a cornfield. She is wearing a white dress with a patterned neckline and a wide-brimmed hat. The background is filled with tall corn stalks and a butterfly. The entire image is overlaid with a teal color and a grid of white dots.

Parte 1

Impulso al sector agroalimentario

Capítulo 1

Revalorización del árbol *Brosimum alicastrum*: composición química y efecto de la cocción sobre el potencial antioxidante de la harina y tortillas

Víctor Manuel Moo Huchin, Nitmar Itzel Pat Moreno, Adamaris Estefany Caamal Uc, Mariela Irene Moo Huchin, Raciél Javier Estrada León, Jorge Carlos Canto Pinto, Gabriel Lizama Uc & Enrique Sauri Duch

Resumen

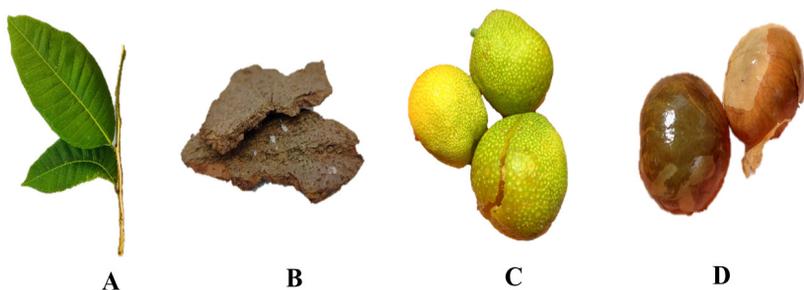
El objetivo fue determinar la composición química proximal de cuatro tejidos de *B. alicastrum* y también evaluar el efecto de la cocción de las semillas de Ramón sobre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de la harina y tortillas. La hoja, la semilla, la piel de semilla y la cáscara del fruto de Ramón se recolectaron, se liofilizaron y se analizaron para determinar su composición química proximal. Para determinar el tiempo de cocción con base en la dureza de las semillas, estas se cocieron a 90°C en agua, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaHCO_3 . Las semillas se volvieron a cocer a 90°C en agua (HA) y en NaHCO_3 (HB) durante 170 min (tiempo determinado). Se consideró como control un lote de semillas sin cocción. Para fines de comparación, se utilizó harina de maíz nixtamalizada (HMN). Se determinaron las propiedades bioactivas de la harina resultante de cada tratamiento. Al comparar los tejidos, la hoja exhibió mayor contenido de cenizas (14.43 %), lípidos (2.69 %) y proteínas (15.43 %), mientras que la semilla (72.40 %) y su piel (28.01 %) resultaron con alto contenido de carbohidratos y fibra cruda, respectivamente. Después de 170 minutos de cocción, la dureza de las semillas cocidas con NaHCO_3 disminuyó significativamente (de 154.50 a 23.49 N), seguida de las semillas cocidas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (de 154.50 a 50.50 N) y de

las semillas cocidas en agua (de 154.50 a 59.48 N). Aunque la harina HR sin cocción obtuvo las mayores propiedades bioactivas en comparación con la harina HA y HB, se sugiere el uso de harina HA porque incrementó el contenido de compuestos bioactivos y las propiedades antioxidantes de las tortillas de maíz. El Ramón es una alternativa potencial para la dieta basada en plantas plant-based. Se contribuye en dar valor agregado a las semillas para su aprovechamiento en la agroindustria.

Introducción

B. alicastrum, también conocido como árbol de Ramón, tiene trascendencia histórica por su gran importancia económica y alimenticia en la cultura maya del sureste de México. El árbol de Ramón se considera una especie multipropósito porque todas sus partes (principalmente hojas y semillas (figura 1) pueden aprovecharse como alimento para animales y humanos (Orantes-García et al., 2012). El látex y las hojas de *B. alicastrum* se han utilizado para elaborar infusiones antitusivas y diaforéticas, y también se han utilizado para tratar enfermedades como el asma, la bronquitis y la tuberculosis. Además, se utiliza un tónico elaborado con la corteza del árbol para tratar el dolor de pecho y el asma (Berg, 1972; Ortiz et al., 1995).

Figura 1. Partes utilizadas del árbol de Ramón. A) Hoja; B) Corteza; C) fruto entero y D) semilla



El árbol produce frutos que contienen semillas denominadas como “nuez maya”. Estas semillas se secan, se muelen y se mezclan con cereales como el maíz para complementar uno de los alimentos básicos de México, como las tortillas (Orantes-García et al., 2012). Las semillas se pueden comer cocidas o tostadas y a nivel comercial se encuentran disponibles como sustituto del café o el té (Larqué-Saavedra, 2014).

Los antiguos mayas utilizaron las semillas de Ramón como fuente de alimento para su población cuando los cultivos tradicionales como el maíz y el frijol no eran suficientes (Peters y Pardo-Tejeda, 1982). Se ha reportado que la harina producida a partir de semillas de *B. alicastrum* tiene un alto valor nutricional, con valores promedio de proteínas, grasas y carbohidratos del 11%, 1.5% y 70%, respectivamente. Asimismo, la harina de Ramón es fuente de fibra, vitaminas y minerales, conteniendo 318 Kcal por cada 100 g de harina (Larqué-Saavedra, 2014). El árbol de Ramón se considera una especie arbórea forrajera debido a su alto valor nutricional y abundancia de hojas (Ortiz et al., 1995). Las hojas contienen 14% de proteínas, 3.9% de lípidos, 13% de cenizas y 39% de fibra cruda (Ayala-Burgos et al., 2006).

El fruto de Ramón tiene una cáscara verde que se torna amarillo-naranja cuando el fruto alcanza su maduración comestible. Las semillas se cubren con una pequeña y delgada capa de piel que se desecha como residuo tras su procesamiento (Sarmiento-Franco et al., 2022). La cáscara del fruto de Ramón y la piel de la semilla son matrices vegetales que no han sido evaluadas desde el punto de vista nutricional. Si bien la producción, comercialización y consumo de harina a partir de semillas de Ramón ha aumentado en los últimos años, en general, para obtener la harina comercialmente se debe pasar por secado, cocción y tostado sin conocer la pérdida de sus compuestos antioxidantes. Por lo tanto, es conveniente realizar investigaciones para determinar los cambios que se producen en el contenido de compuestos fenólicos y en la capacidad antioxidante al cocer las semillas y seleccionar un método de cocción que pueda proteger las propiedades bioactivas de la harina de *B. alicastrum*.

El árbol de Ramón no ha recibido la suficiente atención para su industrialización y aún se apoya la idea de que las semillas de Ramón son una opción que puede reducir la importación de granos en México y contribuir a la seguridad alimentaria. El grupo de investigación del Instituto Tecnológico de Mérida colabora con otras instituciones en México y está comprometido a promover la alimentación saludable y sustentable utilizando harina de Ramón para impulsar la agroindustria en el sureste de México (Moo-Huchin et al., 2023).

Dado el contexto del uso ancestral del árbol de Ramón y el creciente interés como alimento potencialmente nutritivo, el objetivo de este estudio fue determinar la composición química proximal de cuatro tejidos vegetales de *B. alicastrum* (hojas, cáscara, semilla y piel de semilla) y evaluar el efecto de la cocción de las semillas sobre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante in vitro

de la harina y tortillas. Esta información incide en el valor agregado del árbol de Ramón, que las mujeres de comunidades rurales intentan añadir a sus productos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de tejidos liofilizados

Se recolectaron tejidos vegetales de *B. alicastrum* (hoja, cáscara del fruto, piel de semilla y semilla) de diez árboles al azar en el jardín del Instituto Tecnológico de Mérida, México en agosto de 2022. La semilla, cáscara y la piel de semilla se removieron de forma manual de los frutos maduros (coloración amarillo-naranja), y las hojas se colectaron verdes, sin ningún daño físico aparente. Posteriormente, las muestras fueron lavadas con agua potable, secadas y cortadas en trozos pequeños. Los tejidos fueron almacenados por separado en bolsas de polietileno con cierre hermético y se congelaron a -20°C . Seguidamente se liofilizaron en un FreezeDryer Edwards Modulyo EF4 1044 durante 72h y el tejido liofilizado se molió en un procesador de alimentos (NutriBullet, Los Ángeles, EE. UU.) en intervalos de 45s hasta alcanzar un tamaño de partícula que atravesase la malla No. 40. Finalmente, el material liofilizado se almacenó a 4°C en bolsas de polietileno con cierre hermético para su posterior análisis.

Composición química proximal

La determinación de la composición química proximal de los tejidos vegetales (hoja, cáscara, piel de semilla y semilla) de *B. alicastrum* se realizó siguiendo la metodología descrita por la AOAC para humedad (925.10), cenizas (923.03), proteína (920.87), fibra cruda (7.070) y lípidos (920.39) (AOAC, 1997). Para determinar el ELN (extracto libre de nitrógeno) se utilizó el método por diferencia de la materia seca, es decir la suma total del contenido de humedad, grasa, proteína, fibra y ceniza de las muestras se restó de 100 de la siguiente manera: contenido de carbohidratos (%) = $100 - [\text{proteína (\%)} + \text{grasa (\%)} + \text{humedad (\%)} + \text{ceniza (\%)}]$. El valor calórico de cada tejido liofilizado se calculó multiplicando los valores de proteína cruda y carbohidratos totales por el factor Atwater de cuatro, respectivamente, y la grasa cruda (%) se multiplicó por nueve. Finalmente, se sumaron todos los resultados y se expresó como Kcal/100 g.

Tratamientos de cocción de semillas y obtención de harina

Las condiciones de cocción descritas en este estudio se determinaron comparando la dureza de semillas cocidas a 90°C en agua purificada, bicarbonato de sodio e hidróxido de calcio. Se coció un lote de semillas secas (80 g) en un matraz Erlenmeyer de 250 mL que contenía 200 mL de solución de bicarbonato de sodio (NaHCO₃) (1 %, p/v) a 90°C durante 170 min (HB), utilizando una plancha de cocción (Oster®). Las semillas del segundo lote se sometieron a cocción en 200 mL de agua purificada (HA) a la misma temperatura y tiempo de cocción descritos anteriormente. Después de la cocción, las semillas cocidas se recuperaron en un colador de acero inoxidable, se lavaron con agua destilada a 25°C y se molieron en un procesador de alimentos Nutribullet Deluxe 600 (Nutribullet®). La muestra triturada fue secada a 55°C durante 72h y luego se molió en el mismo procesador de alimentos para obtener la harina. Se utilizaron semillas sin cocción como lote control y fueron trituradas en un molino de granos de nixtamal (Estrella®) para obtener partículas pequeñas. Estas partículas se procesaron en Nutribullet para obtener un polvo fino. Por otra parte, la masa nixtamalizada de maíz se compró en un comercio local, se secó a 70 °C durante 72 h y se molió en un Nutribullet para obtener harina de maíz nixtamalizada. Los polvos secos de los tratamientos, el control (HR) y la harina nixtamalizada (HMN) se almacenaron en bolsas Ziploc® a 10 °C hasta su uso.

Elaboración de tortillas

La harina (100 g) se hidrató y se mezcló con agua purificada (HMN:100 mL, 70% HMN-30% HR:100 mL, 70% HMN-30% HA:110 mL, 70% HMN-30% HB:120 mL) a 25°C utilizando un mezclador KitchenAid (KitchenAid Inc. St. Joseph, USA) tipo paleta para obtener una masa de buena consistencia que, al presionarla entre dos placas metálicas cubiertas de plástico, hasta un espesor de 2-3 mm, pueda despegarse sin romperse (Moo-Huchin et al., 2021). Se colocó una bola de masa (36g) en una prensa tortillera manual (Herradura, México) de 18cm de diámetro para obtener una masa en forma de disco. Los discos de masa se colocaron en una plancha eléctrica (CKSTGRFM18W Oster®) y se cocieron a 210 ± 10 °C utilizando los siguientes tiempos: 30s por cada lado (tres veces). Las tortillas se enfriaron, cortaron, congelaron a -20°C y fueron liofilizadas en una liofilizadora FreezeDryer Edwards (Modulyo EF41044) durante 3 días. Después de la liofilización, las

muestras secas se procesaron en Nutribullet® y el polvo obtenido se almacenó en bolsas de Ziploc® para su posterior análisis.

Preparación de extracto de compuestos fenólicos

La extracción de antioxidantes se realizó en tortillas y harina (HMN, HR, HB y HA). Se pesó 1 g de muestra y se mezcló con 10 mL de etanol al 50% (v/v, agua destilada). Cada mezcla se sometió a extracción asistida por ultrasonido durante 30 min a 30°C en un equipo CScientific CS-UB100 (240 W de potencia, una frecuencia de 40 KHz y amplitud de potencia de 100%). Después de la extracción, el extracto se centrifugó a 3,500 rpm durante 10 min. El sobrenadante del primer ciclo de extracción se recuperó en un tubo de centrifuga de 50 mL y el sedimento resultante se extrajo una segunda vez siguiendo el mismo procedimiento descrito previamente. Los sobrenadantes de ambas extracciones se mezclaron y se aforaron a 20 mL con etanol al 50% y se almacenaron a -20°C protegidos de la luz hasta el análisis.

Contenido de compuestos fenólicos totales (CFT)

El contenido de CFT se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965) modificado por Moo-Huchin et al. (2014). El extracto (50 µL) se mezcló con 3 mL de agua destilada y 250 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu (1N) y se homogeneizó en un vórtex. La mezcla se dejó a 25°C durante 5 min. Transcurrido el tiempo de reposo, se añadió a la mezcla 750 µL de solución de carbonato de sodio Na₂CO₃ (20 % v/v, en agua destilada) y 950 µL de agua destilada y se agitó nuevamente en vórtex. La mezcla se dejó en oscuridad a 25 °C durante 30 min. Finalmente, se midió la absorbancia a 765nm usando un espectrofotómetro UV-Vis Cary 60 de Agilent Technologies, y los resultados se expresaron como mg equivalente de ácido gálico (EAG)/100 g de harina, usando una curva de calibración para concentraciones de 100 a 1000 ppm de ácido gálico.

Contenido de flavonoides totales (FT)

El extracto (1mL) se mezcló con 4 mL de agua destilada y 300 µL de nitrito de sodio NaNO₂ (5 % v/v, en agua destilada). La mezcla se agitó en un vórtex y se dejó reposar a 25 °C durante 5 min. Luego, se agregaron a la mezcla 300 µL de una solución de cloruro de aluminio AlCl₃ (10 % v/v, en metanol) y se dejó reposar durante 1 min. Poste-

riormente, se agregaron 2 mL de hidróxido de sodio NaOH (1M) y finalmente se agregaron 2.4 mL de agua destilada (Olvera-Aguirre et al., 2022). La mezcla se agitó nuevamente durante 30 s en el vórtex y se midió la absorbancia de la solución a 415 nm usando un espectrofotómetro UV-Vis. La concentración de FT se calculó usando la curva estándar de soluciones de quercetina (25-800 ppm) y los valores se expresaron como mg equivalente de quercetina (EQ)/100 g de harina.

Taninos hidrolizables (TH)

Se tomó 1 mL de cada extracto y se mezcló con 5 mL de yodato de potasio (2.5% KIO₃, en agua destilada) (Olvera-Aguirre et al., 2022). La mezcla se agitó en un vórtex y se midió la absorbancia de la solución a 550 nm con un espectrofotómetro UV-Vis. Los resultados se expresaron como mg equivalente de ácido tánico (AT) por 100 g de harina.

Capacidad antioxidante DPPH

Para el análisis de DPPH, se preparó una solución stock mezclando 2.5 mg de radical DPPH con 90 mL de metanol absoluto usando una placa de agitación. Se añadió metanol a la solución para ajustar la absorbancia a 0.70 ± 0.02 . La absorbancia de la solución se midió a 515 nm hasta que la reacción se estabilizó. La reacción se realizó utilizando alícuotas de 3.9 mL de la solución de DPPH ajustada y 100 μ L del extracto (Olvera-Aguirre et al., 2022). La mezcla se agitó y se dejó reposar durante 60 in y se midió la absorbancia a 515 nm. El porcentaje de inhibición se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de inhibición DPPH} = \frac{\text{absorbancia ajustada DPPH} - \text{absorbancia DPPH con extracto}}{\text{absorbancia ajustada DPPH}} \times 100$$

El resultado se expresó como mM Trolox (ET)/100 g de harina, usando una curva de calibración con concentraciones de Trolox de 100 a 1000 μ M.

Capacidad antioxidante-Poder reductor

El extracto (2.5 mL) se mezcló en un tubo de ensayo con 2.5 mL de buffer de fosfato de sodio (0.2 M, pH = 6.6) y 2.5 mL de ferricianuro de potasio (1 % v/v, en agua destilada). La mezcla se incubó durante 20 min con agitación utilizando un baño de agua caliente (60°C). Tras

el período de incubación, se agregaron a la mezcla 2.5 mL de ácido tricloroacético (10% v/v, en agua destilada) y se agitó nuevamente en un vórtex. Se tomaron 5 mL de esta solución final y se diluyeron con 5 mL de agua destilada. Luego se añadió 1 mL de cloruro férrico (0.1% v/v, en agua destilada) y se dejó en oscuridad a 25°C durante 10 min (Moo-Huchin et al., 2015). La absorbancia se midió a 700 nm usando un espectrofotómetro UV-Vis Cary 60 Agilent Technologies y el resultado se expresó como mg de ácido ascórbico/100 g de harina.

Análisis de compuestos fenólicos en tortillas mediante HPLC

La identificación y cuantificación de compuestos fenólicos se realizó utilizando HPLC-3000 Dionex Ultimate (Thermo Scientific), equipado con un inyector manual y un detector de longitud de onda UV-Vis acoplado a un sistema de control utilizando el software Dionex Chromelon®. El extracto seco (obtenido por evaporación de 20 mL del extracto) se reconstituyó en 1.5 mL de metanol-agua 1:1 grado HPLC y se filtró a través de una membrana Millipore PVDF (fluoruro de polivinilideno) con un tamaño de poro de 0.45 µm (GMF Whatman). La separación de compuestos fenólicos se realizó en una columna XDBC18 eclipse (250 mm x 4.9 mm de diámetro interno, tamaño de partícula de 5 µm); temperatura de la columna, 25°C; longitud de onda de detección, 280 nm; velocidad de 0.5 mL/min; volumen de inyección 20 µL. La fase móvil fue agua/ácido fórmico (99: 1, v/v; disolvente A) y acetonitrilo grado HPLC (disolvente B) (Moo-Huchin et al., 2019). La fase móvil se filtró al vacío usando un filtro de membrana de 0.45 µm. El gradiente lineal fue 2-100% (B) de 0 a 70 min. Se prepararon, filtraron e inyectaron soluciones de varios estándares de compuestos fenólicos en HPLC para determinar los tiempos de retención. Los compuestos fenólicos de las muestras se identificaron según su orden de elución y sus tiempos de retención se compararon con estándares auténticos.

Resultados y discusión

Composición química proximal

La composición química proximal (tabla 1) de los tejidos liofilizados del árbol de Ramón corresponde en gran medida a carbohidratos, proteínas, fibra cruda, cenizas, humedad y bajo contenido de lípidos.

Se sabe que el contenido de humedad de los alimentos proporciona información valiosa sobre su estabilidad durante el almacenamiento. La cáscara del fruto maduro tuvo el mayor contenido de humedad ($P \leq 0.05$) con un valor promedio de 12.42%, seguida de la piel de la semilla con un 9.91%, y las de menor contenido fueron las semillas y las hojas (4.86 y 2.65%, respectivamente). La ceniza es un indicador del contenido total de minerales en el alimento, en comparación con otros tejidos, la semilla de Ramón obtuvo el contenido más bajo y las hojas el contenido más alto (14.43%). Además, se encontró que este último tejido tuvo un mayor contenido de lípidos (2.69%) ($P \leq 0.05$) que los otros tejidos. La proteína es un componente esencial para la salud humana, y su función principal es proporcionar las cantidades suficientes de aminoácidos en la alimentación (Pugalenthi et al., 2004). La hoja obtuvo el mayor contenido de proteína ($P \leq 0.05$) con 15.43%, seguido de la semilla, cáscara y piel de semilla con 12.96%, 12.6% y 11.36%, respectivamente. La fibra cruda es un residuo orgánico (principalmente lignina y celulosa) que no contiene componentes solubles como proteínas, azúcar, almidón, etc. Al comparar los tejidos, la piel de semilla obtuvo 28.01% de fibra cruda. El extracto libre de nitrógeno fue significativamente mayor en la semilla (72.40%) que en todos los tejidos. Los resultados encontrados en este estudio, específicamente proteína, grasa, cenizas y fibra cruda de las semillas de *B. alicastrum*, son similares a los resultados reportados por Subiria-Cueto et al. (2019).

Tabla 1. Composición química proximal de diferentes partes del fruto y hoja de Ramón

TEJIDO	HUMEDAD (%)	HUMEDAD (%)	Lípidos (%)	Proteína (%)	Fibra (%)	ELN (%)
HOJA	2.65±0.05a	14.43±0.51d	2.69±0.05d	15.43±0.50c	13.93±0.91c	50.50±2.01b
CÁSCARA	12.42±0.94d	6.12±0.06b	1.75±0.98c	12.60±0.00b	9.75±0.63b	57.27±0.76c
SEMILLA	4.86±0.09b	3.44±0.00a	1.16±0.08a	12.96±0.25b	4.83±0.05a	72.40±0.40d
PIEL DE SEMILLA	9.91±0.05c	6.79±0.04c	1.43±0.00b	11.36±0.75a	28.01±0.06d	42.47±0.94a

Los datos están expresados en base seca. Letras diferentes en una misma columna indican valores significativamente diferentes ($P \leq 0.05$). ELN: extracto libre de nitrógeno.

Por otra parte, las calorías representan la energía que cada uno de los alimentos aporta para realizar diversas funciones y mantener el buen funcionamiento del organismo. La tabla 2 muestra el aporte calórico

de cuatro tejidos de *B. alicastrum*. La semilla de Ramón obtuvo el mayor aporte energético con un valor promedio de 351.88 kcal/100 g de polvo liofilizado, seguido de la cáscara del fruto maduro, hoja y piel de semilla con 295.23, 287.93 y 228.19 kcal/100 g de polvo liofilizado, respectivamente. Cabe mencionar que los tejidos del árbol de Ramón estudiados contienen menos calorías en comparación con cereales como la harina de maíz refinada (368 kcal), arroz pulido (361 kcal) y avena (361 kcal) (Latham, 2002). Por tanto, los tejidos investigados pueden ser aprovechados en la producción y desarrollo de alimentos funcionales.

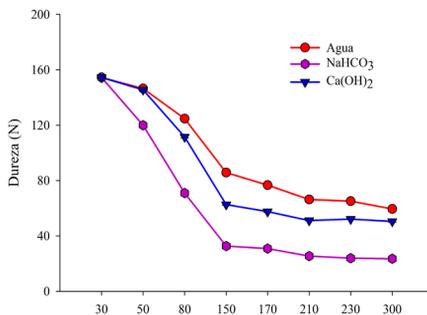
Tabla 2. Aporte calórico de diferentes partes del fruto y hoja de Ramón (base seca)

TEJIDO	KCAL/100 G
HOJA	287.93
SEMILLA	351.88
CÁSCARA	295.23
PIEL DE SEMILLA	228.19

Determinación del tipo de sal y el tiempo de cocción de las semillas de Ramón

El cambio de dureza de las semillas de Ramón cocidas en sal durante 300 min se puede observar en la figura 2.

Figura 2. Cambios en la dureza (N) de las semillas de Ramón después de diferentes tiempos de cocción en agua purificada, bicarbonato de sodio e hidróxido de calcio



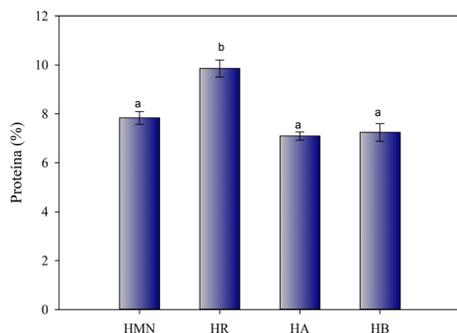
En general, los valores de dureza de las semillas cocidas en los tres tratamientos (agua purificada, bicarbonato de sodio e hidróxido de calcio) disminuyeron (de 154.50 N a 23.49 N). Sin embargo, después de 170 min, hubo pocos cambios en la dureza (de 76.70 a 59.48 N, de 30.83 a 23.49 N y de 57.57 a 50.50 N para cocción en agua purificada, bicarbonato de sodio e hidróxido de calcio, respectivamente). La razón de la disminución en la dureza de las semillas puede explicarse por el hecho de que el agua ingresa a las semillas durante la cocción, lo que las hace menos resistentes a la compresión y con mayor elasticidad (Sasikala et al., 2011). El uso de sal (bicarbonato de sodio e hidróxido de calcio) al cocer semillas redujo la dureza en 300 min en comparación con el uso únicamente de agua purificada. Al respecto, se ha estudiado la participación que tienen los iones de Ca^{+2} y Na^{+} en el interior de las semillas cuando son cocidas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaHCO_3 , en donde, los iones generados pueden interactuar con proteínas y almidón (Santiago-Ramos et al., 2018). Este hecho está relacionado con la desnaturalización de proteínas y la gelatinización del almidón, que pueden ser responsables de una mayor pérdida de dureza en semillas de Ramón tratadas con soluciones alcalinas (Sasikala et al., 2011). Los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con los reportados por de León et al. (1992) quienes indicaron que el uso de cationes monovalentes y divalentes redujo el tiempo de cocción de los frijoles en términos de la pérdida de dureza.

La menor dureza de la semilla se reportó en el tratamiento de cocción con bicarbonato de sodio (de 154.50 a 23.49 N), lo que indica que los cationes son responsables en desestabilizar a las proteínas y otros compuestos (Santiago-Ramos et al., 2018). Considerando los resultados, parece que los iones Na^{+} interactuaron más con otros compuestos de las semillas en comparación con sus interacciones con iones Ca^{2+} . Este efecto puede explicarse por la disociación de los iones, efecto que también se ve influido por la solubilidad de la sal. Considerando que la solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es 1.85 g/L y la del NaHCO_3 es de 50 g/L, es razonable que la disociación inicial del bicarbonato de sodio fue mayor a la generada por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Se entiende como disociación principal los siguientes balances: $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Ca}^{2+} + 2(\text{OH}^-)$ y $\text{NaHCO}_3 - \text{Na}^{+} + \text{HCO}_3^-$, de esta forma los iones Na^{+} tuvieron un efecto mayor que el Ca^{2+} , efecto que se puede observar en la disminución de la dureza de las semillas de Ramón. Por otra parte, de León et al. (1992) reportaron que los iones de Na^{+} ingresan a las semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris*) con mayor facilidad que los iones divalentes como Mg^{2+} y Ca^{2+} , fenómeno que podría ocurrir en el caso de las semillas de Ramón.

Contenido de proteína total de harina de las semillas cocidas

La harina HR sin cocción se caracterizó por obtener un valor promedio de proteína del 9.61%, seguido de la harina de maíz nixtamalizada (HMN) con el 7.65%. Sin embargo, cuando se cocieron las semillas de Ramón, el contenido de proteína disminuyó en un 6.99% y un 6.98% para las semillas cocidas en agua purificada (HA) y bicarbonato de sodio (HB), respectivamente (Figura 3). La disminución del contenido de proteína cruda se atribuye a la lixiviación de proteínas solubles durante la cocción (Drulyte y Orlien, 2019). Este resultado también fue confirmado por Adepoju et al. (2019), quienes reportaron que el contenido de proteína cruda del frijol guandú cocido disminuyó.

Figura 3. Contenido de proteína total de la harina de semillas de *B. alicastrum* cocida



Los datos están expresados en base seca. Letras diferentes entre barras indican valores significativamente diferentes ($P \leq 0.05$). HMN= harina de maíz nixtamalizada; HR= harina de semillas de Ramón sin cocer; HA= harina de semillas de Ramón cocida en agua; HB= harina de semillas de Ramón cocida en bicarbonato de sodio.

Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante in vitro de harina y tortillas

La cocción tradicional (ebullición en agua) es el tratamiento térmico más común utilizado para cocer legumbres, para mejorar su valor nutricional eliminando factores anti-nutricionales. Sin embargo, las semillas cocidas con este método están sujetas a cambios estructurales como la desnaturalización de proteínas, la gelatinización y retrogradación del almidón (Acquah et al., 2021). Estos cambios influyen en la funcionalidad y aplicaciones de la semilla cocida. En la tabla 3 se muestran los cambios en el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante in vitro de la harina de Ramón debido a diferentes tratamientos de cocción.

Tabla 3. Efecto de la cocción de semillas de Ramón sobre el contenido de CFT, FT, TH y la capacidad antioxidante de harina y tortillas

Muestra	CFT (mg EAG/100 g peso seco)	FT (mg EQ/100 g peso seco)	TH (mg AT/100 g peso seco)	DPPH (mM Trolox/100 g peso seco)	PR (mg ácido ascórbico/100 g peso seco)
Harina					
HMN	143.75±17.03a	145.89±5.92a	304.00±2.31b	23.70±1.28a	95.85±0.62a
HR	1925.00±90.06c	579.43±5.69d	477.75±38.65d	51.41±2.07d	320.35±16.71c
HA	296.13±3.02b	275.21±13.85b	235.00±4.62a	30.45±1.72b	193.77±13.12b
HB	351.63±27.30b	353.75±54.84c	425.75±16.96c	42.41±1.71c	180.89±7.94b
Tortilla					
Control	98.75±0.00a	122.43±0.33a	585.00±13.86a	21.59±0.55b	50.06±0.10a
TRC	727.88±7.94d	142.50±2.89b	675.00±24.25b	19.32±0.00a	110.62±0.00bc
TRA	443.38±2.17b	195.07±5.38d	817.50±51.75d	29.20±0.00d	113.35±2.12c
TRB	455.13±0.14c	166.93±2.89c	753.75±25.50c	27.45±0.86c	108.81±2.84b

Los datos están expresados en base seca. Letras diferentes en una misma columna (dentro de harina o tortilla) indican valores significativamente diferentes ($P \leq 0.05$). HMN= harina de maíz nixtamalizado; HR= harina de semillas de Ramón sin cocer; HA= harina de semillas de Ramón cocida en agua; HB= harina de semillas de Ramón cocida en bicarbonato de sodio. Control= Tortilla con HMN; TRC= Tortilla con harina compuesta 70 % HMN-30 % HB. HMN-30 % HR, TRA= Tortilla con harina compuesta 70 % HMN-30 % HA; TRB= Tortilla con harina compuesta 70 % HMN-30 % HB.

En general, al comparar las harinas, la HMN obtuvo el menor contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en ambos ensayos. Las harinas HA y HB exhibieron un menor contenido de CFT, FT, TH y capacidad antioxidante in vitro en comparación con HR (sin cocción). Esta reducción en el contenido de compuestos fenólicos se puede explicar porque la estructura polimérica de la matriz vegetal se ve afectada por la temperatura y el tratamiento alcalino, en donde, se rompen los enlaces éster que unen los compuestos fenólicos en la pared celular, quedando en forma libre en el medio acuoso (Rocchetti et al., 2022). De hecho, se ha reportado que durante el tratamiento térmico alcalino del maíz, se eliminan la hemicelulosa y la lignina y la permeabilidad en la superficie del grano aumenta, permitiendo que la solución alcalina entre en el maíz (González et al., 2004). La disminución en el contenido de TH tras la cocción de las semillas de Ramón (HA y HB) también puede explicarse por el hecho de que los taninos se unen a las proteínas de la harina, se pierden en el agua de cocción y permanecen libres o se polimerizan (Bonett et al., 2007).

La harina HR obtuvo 13.39, 4.0, 1.5, 2.2 y 3.3 veces más los contenidos de CFT, FT, TH, DPPH y PR en comparación con HMN. El contenido FT, TH y capacidad antioxidante DPPH resultó mayor en HB en comparación a HA; sin embargo, no hubo diferencia significativa en CFT y PR. Esta diferencia se puede atribuir al ablandamiento de la pared celular de la semilla durante la cocción con bicarbonato de sodio, lo cual deja disponible los compuestos fenólicos (posiblemente su forma esterificada) para su extracción (Ávila et al., 2020).

Otro resultado mostró que los valores de CFT, FT, TH y PR fueron más bajos en la tortilla control que TRC, TRA y TRB. Este resultado coincide con lo reportado en la comparación de las harinas. Entre las tortillas, TRA obtuvo el mayor contenido FT ($P \leq 0.05$) (195.07 ± 3.38 mg EQ/100 g peso seco), TH (817.50 ± 31.75 mg AT/100 g peso seco) y capacidad antioxidante DPPH (29.20 ± 0.0 mM Trolox/100 g peso seco). El valor CFT más alto ($P \leq 0.05$) se obtuvo para la tortilla TRC (727.88 ± 7.94 mg EAG/100 g peso seco) que para otras tortillas. Sin embargo, en PR se observaron valores similares entre TRC, TRA y TRB. Entre TRA y TRB, el primero resultó con mayores valores de FT, TH, DPPH y PR. La segunda tortilla obtuvo el valor CFT más alto (455.13 ± 0.14 mg EAG/100 g peso seco). La tendencia opuesta se observó al comparar las harinas. Se presume que la cocción (220 °C) de la tortilla TRA en comal libera flavonoides que no se liberan durante la cocción de las semillas en agua. La tortilla TRB

mostró menor contenido FT porque los compuestos fenólicos libres (producidos por la cocción en bicarbonato de sodio) se redujeron por la alta temperatura de cocción.

De acuerdo con Moo-Huchin et al. (2019) y Ozer (2017), la HR es una fuente de compuestos fenólicos con alta capacidad antioxidante. Esto explica por qué HR y TRC tuvieron el mayor contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante. Además, Moo-Huchin et al. (2019) indicaron que la harina de *B. alicastrum* tienen un alto contenido de ácido gálico, ácido clorogénico y ácido vanílico, los cuales contribuyen a su capacidad antioxidante. Por lo tanto, la harina de *B. alicastrum* puede ser una alternativa para elaborar tortillas con alto valor agregado y también puede considerarse como un alimento funcional.

Compuestos fenólicos de tortillas de maíz que contienen harina de Ramón

De acuerdo con el perfil cromatográfico, en las tortillas analizadas por HPLC se identificaron siete compuestos fenólicos (Tabla 4): 3-hidroxitirosol, ácido gálico, 2-4-hidroxifenil etanol, catequina, vainillina, siringaldehído y ácido ferúlico. Dicha caracterización permitió identificar la presencia de ácidos fenólicos y flavonoides en tortillas de harina de maíz nixtamalizado, TRC, TRA y TRB.

Al comparar los perfiles cromatográficos de HPLC se encontró que algunos de los compuestos identificados eran comunes para las tortillas evaluadas. La tabla 4 muestra los tiempos de retención (que fueron similares entre repetición) para cada compuesto fenólico identificado. En las tortillas TRC, TRA y TRB se encontró la presencia de seis compuestos fenólicos, incluyendo ácido gálico, 3-hidroxitirosol, 2-4-hidroxifenil etanol, catequina, vainillina y siringaldehído. Sin embargo, en la tortilla control no se reportó la presencia de ácido gálico, 3-hidroxitirosol y 2-4-hidroxifenil etanol, pero también se encontró ácido ferúlico.

Los ácidos fenólicos identificados en este estudio son similares a los reportados por Moo-Huchin et al. (2019) y Ozer (2017) para la harina de semilla de Ramón. Este último autor no reportó la presencia de 3-hidroxitirosol. La ausencia o presencia de ciertos compuestos en las semillas depende de la zona geográfica donde se recolectaron las semillas, el método de extracción de antioxidantes y el tratamiento térmico de la nuez maya (Cohuo-Huchin, 2020). El ácido ferúlico es el compuesto fenólico más abundante en el maíz y se ha reportado en forma ligada, libre y conjugada (Acosta-Estrada et al., 2023).

Tabla 4. Compuestos fenólicos identificados mediante HPLC-UV utilizando los tiempos de retención basados en estándares auténticos

Tiempo de retención (min)	Compuesto fenólico	Control	TRC	TRA	TRB
14.62	Ácido gálico	NI	X	X	X
15.42	3-hidroxitirosol	NI	X	X	X
18.62	2-4-hidroxifenil etanol	NI	X	X	X
19.373	Catequina	X	X	X	X
23.98	Vainillina	X	X	X	X
24.38	Siringaldehído	X	X	X	X
25.8	Ácido ferúlico	X	NI	NI	NI

Control= Tortilla con HMN; TRC=Tortilla con harina compuesta 70 % HMN-30 % HR; TRA= Tortilla con harina compuesta 70 % HMN-30 % HA; TRB= Tortilla con harina compuesta 70 % HMN-30 % HB. X= identificado; NI= no identificado.

Conclusiones

Acorde a la composición química proximal se pueden aprovechar los tejidos de *B. alicastrum* para el desarrollo y fortificación de alimentos funcionales. Por primera vez se ha proporcionado información valiosa sobre la piel de semilla y la cáscara del fruto de Ramón como una fuente natural de fibra y proteína respectivamente. La información de este trabajo contribuye en la posibilidad de seleccionar algún tejido con potencial en aplicaciones alimentarias y no alimentarias. Se recomienda cocer las semillas de Ramón en agua a 90°C durante 170 min, porque son menos duras y más fáciles de moler. Además, la harina resultante de este proceso aumenta el contenido de compuestos bioactivos y las propiedades antioxidantes de las tortillas de maíz. La información obtenida de esta investigación contribuirá a la creación de una agroindustria de harina y tortilla que reducirá el uso de granos importados, mejorará la dieta de la población con recursos sustentables y permitiría que las regiones rurales del sureste de México sean autosuficientes.

Bibliografía

- Acosta-Estrada, B. A., Serna-Saldívar, S. O., & Chuck-Hernández, C. (2023). Nutritional assessment of nixtamalized maize tortillas produced from dry masa flour, landraces, and high yield hybrids and varieties. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1183935. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1183935>
- Acquah, C., Ohemeng-Boahen, G., Power, K. A., & Tosh, S. M. (2021). The effect of processing on bioactive compounds and nutritional qualities of pulses in meeting the sustainable development goal 2. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 681662. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.681662>
- Adepoju, O., Dudulewa, B., & Bamigboye, A. (2019). Effect of cooking methods on time and nutrient retention of pigeon pea (*Cajanus cajan*). *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 19(3), 14708-14725. <https://doi.org/https://doi.org/10.18697/ajfand.86.17665>
- AOAC. (1997). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (16th ed.). AOAC International.
- Ávila, S., Kugo, M., Hornung, P. S., Apea-Bah, F. B., Songok, E. M., & Beta, T. (2020). Carica papaya seed enhances phytochemicals and functional properties in cornmeal porridges. *Food Chemistry*, 323, 126808. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126808>
- Ayala-Burgos, A., Capetillo-Leal, C., Cetina-Góngora, R., Zapata-Campos, C., & Sandoval-Castro, C. (2006). Composición química-nutricional de árboles forrajeros. Composición química-nutricional de árboles forrajeros. (Vol. 1). Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Mérida, Yucatán.
- Berg, C. C. (1972). *Olmedieae Brosimeae (Moraceae)*. *Flora Neotropica*, 7, 1-228.
- Bonett, L. P., Baumgartner, M. d. S. T., Klein, Â. C., & Silva, L. I. d. (2007). Compostos nutricionais e fatores antinutricionais do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.)/Nutritional compounds and antinutritional aspects of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Arquivos de Ciências da Saúde da UNIPAR* 11(3), 235-246.
- Cohuo-Huchin, M. D. R. (2020). Evaluación de extractos bioactivos de la harina de *Brosimum Alicastrum* obtenidos mediante CO2 supercrítico y extracción con solvente. Instituto Tecnológico de Mérida]. Mérida, Yucatán. <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4284/1/Tesis%20profesional%20Mari%cc%81a%20del%20Rosario%20Cohuo%20Huchin%2010-febrero-2020.pdf>

- de León, L., Elias, L., & Bressani, R. (1992). Effect of salt solutions on the cooking time, nutritional and sensory characteristics of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food Research International*, 25(2), 131-136. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0963-9969\(92\)90154-W](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0963-9969(92)90154-W)
- Drulyte, D., & Orlien, V. (2019). The effect of processing on digestion of legume proteins. *Foods*, 8(6), 224. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods8060224>
- González, R., Reguera, E., Mendoza, L., Figueroa, J. M., & Sánchez-Sinencio, F. (2004). Physicochemical changes in the hull of corn grains during their alkaline cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(12), 3831-3837. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/jf035175h>
- Larqué-Saavedra, A. (2014). *Brosimum alicastrum*. *GACETA*, 6(49), 6-33.
- Latham, M. C. (2002). *Nutrición Humana en el Mundo en Desarrollo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Moo-Huchin, V., Canto-Pinto, J., Cuevas-Glory, L., Sauri-Duch, E., Pérez-Pacheco, E., & Betancur-Ancona, D. (2019). Effect of extraction solvent on the phenolic compounds content and antioxidant activity of Ramon nut (*Brosimum alicastrum*). *Chemical Papers*, 73, 1647-1657. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11696-019-00716-x>
- Moo-Huchin, V. M., Estrada-Mota, I., Estrada-León, R., Cuevas-Glory, L., Ortiz-Vázquez, E., y Vargas, M. d. L. V., . . . Sauri-Duch, E. (2014). Determination of some physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of tropical fruits from Yucatan, Mexico. *Food Chemistry*, 152, 508-515. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.127>
- Moo-Huchin, V. M., Góngora-Chi, G. J., Sauri-Duch, E., Canto-Pinto, J. C., Betancur-Ancona, D., & Ramón-Canul, L. G. (2021). Tortilla de maíz adicionado con harina de *Brosimum alicastrum*: propiedades fisicoquímicas y actividad antioxidante. *CIENCIA ergo-sum*, 28(3), e129. <https://doi.org/https://doi.org/10.30878/ces.v28n3a1>
- Moo-Huchin, V. M., Moo-Huchin, M. I., Estrada-León, R. J., Cuevas-Glory, L., Estrada-Mota, I. A., Ortiz-Vázquez, E., . . . Sauri-Duch, E. (2015). Antioxidant compounds, antioxidant activity and phenolic content in peel from three tropical fruits from Yucatan, Mexico. *Food Chemistry*, 166(1), 17-22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.127>

- Moo-Huchin, V. M., Sauri-Duch, E., & Pat-Moreno, N. I. (2023). El Instituto Tecnológico de Mérida contribuye en el aprovechamiento de la semilla del Ramón. *Revista Árbol Ramón-Óox*, 1(3), 12.
- Olvera-Aguirre, G., Mendoza-Taco, M. M., Moo-Huchin, V. M., Lee-Rangel, H. A., Roque-Jiménez, J. A., Gómez-Vázquez, A., . . . Chay-Canul, A. J. (2022). Effect of extraction type on bioactive compounds and antioxidant activity of *Moringa oleifera* Lam. leaves. *Agriculture*, 12(9), 1462. [https://doi.org/ https://doi.org/10.3390/agriculture12091462](https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture12091462)
- Orantes-Garcia, C., Caballero-Roque, A., & Velázquez-Méndez, M. A. (2012). Aprovechamiento del árbol nativo *Brosimum alicastrum* Swartz (Moraceae) en la Selva Zoque Chiapas, México. *Lacandonia*, 6(1), 71-82.
- Ortiz, M., Azañón, V., Melgar, M., & Elias, L. (1995). The corn tree (*Brosimum alicastrum*): a food source for the tropics. *Plants in human nutrition*, 77, 135-146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1159/isbn.978-3-318-04261-0>
- Ozer, H. K. (2017). Phenolic compositions and antioxidant activities of Maya nut (*Brosimum alicastrum*): Comparison with commercial nuts. *International Journal of Food Properties*, 20(11), 2772-2781. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1252389>
- Peters, C. M., & Pardo-Tejeda, E. (1982). *Brosimum alicastrum* (Moraceae): uses and potential in Mexico. *Economic Botany*, 36(2), 166-175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02858712>
- Pugalenthi, M., Vadivel, V., Gurumoorthi, P., & Janardhanan, K. (2004). Comparative nutritional evaluation of little known legumes, *Tamarindus indica*, *Erythrina indica* and *Sesbania bispinosa*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 4(3), 107-123.
- Rocchetti, G., Gregorio, R. P., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Oliveira, P. G., Prieto, M. A., . . . Tomas, M. (2022). Functional implications of bound phenolic compounds and phenolics-food interaction: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 811-842. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1541-4337.12921>
- Santiago-Ramos, D., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., & Véles-Medina, J. J. (2018). Viscoelastic behaviour of masa from corn flours obtained by nixtamalization with different calcium sources. *Food Chemistry*, 248, 21-28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.041>
- Sarmiento-Franco, L., Montfort-Grajales, S., & Sandoval-Castro, C. (2022). La semilla del árbol Ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz):

alternativa alimentaria energética para animales de producción y seres humanos. *Bioagrociencias*, 15(1), 19-28.

Sasikala, V., Ravi, R., & Narasimha, H. (2011). Textural changes of green gram (*Phaseolus aureus*) and horse gram (*Dolichos biflorus*) as affected by soaking and cooking. *Journal of texture studies*, 42(1), 10-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2010.00263.x>

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/https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>

Subiria-Cueto, R., Larqué-Saavedra, A., Reyes-Vega, M. L., de La Rosa, L. A., Santana-Contreras, L. E., Gaytán-Martínez, M., . . . Núñez-Gastélum, J. A. (2019). *Brosimum alicastrum* Sw.(Ramón): An alternative to improve the nutritional properties and functional potential of the wheat flour tortilla. *Foods*, 8(12), 613. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods8120613>

Capítulo 2

Rescate, cultivo y explotación del maguey pulquero (*Agave salmiana*): caso rancho San Isidro, Nanacamilpa, Tlaxcala

Areli Flores Morales, Nelly Antonia Rojas Caporal, Erik Ocaranza Sánchez & Ángeles Sánchez Contreras

Resumen

Los antiguos habitantes cultivaban el "Maguey de Pulque", del que se extrae un líquido dulce llamado aguamiel, cuando esta savia se fermenta se convierte en pulque bebida de bajo contenido alcohólico. Para los pequeños propietarios que cultivan esta planta, es una especie que ha aportado beneficios sociales y económicos. Por ejemplo, el rancho San Isidro, ubicado en Nanacamilpa de Mariano Arista, en el estado de Tlaxcala, ha experimentado mejoras tanto en su comunidad como en su economía gracias al cultivo de esta planta. El objetivo fue dar a conocer el cultivo y la explotación sostenible agroindustrial del maguey de pulque. Para ello, se efectuó un muestreo estratificado para la selección de plantas, se llevaron a cabo mediciones y un análisis fisicoquímico del aguamiel colectado. El Rancho San Isidro cuenta

con una parcela (44 hectáreas) de cultivo de agave *salmiana*, con los ecotipos Ayoteco, Chalqueño, Manso y Púa larga. Esta última es la mejor variedad por sus características morfológicas. Existen viveros considerados como bancos vivos de germoplasma de estas especies. Se considera que cada variedad presenta características morfológicas (número de pencas, diámetro de la hoja y roseta, largo y número de espinas en cada hoja) independientes y en términos de productividad. El rancho cuenta con un sistema de manejo agronómico que permite mantener los agaves en diferentes etapas de crecimiento fisiológico, libres de plagas, la poda de pencas es continua, el uso de abono orgánico y el control manual de malas hierbas, de tal forma que se asegura la producción de aguamiel (aproximadamente 2000 L por día) que cumple con los parámetros de densidad (1.1 a 1.2 (g.ml⁻¹)), grados brix (11 a 15). Presenta una cantidad de azúcares de 60 %. Parámetros de interés para la producción de pulque y otros productos derivados del aguamiel comercializados por la familia Del Razo, además de promover ecoturismo regional.

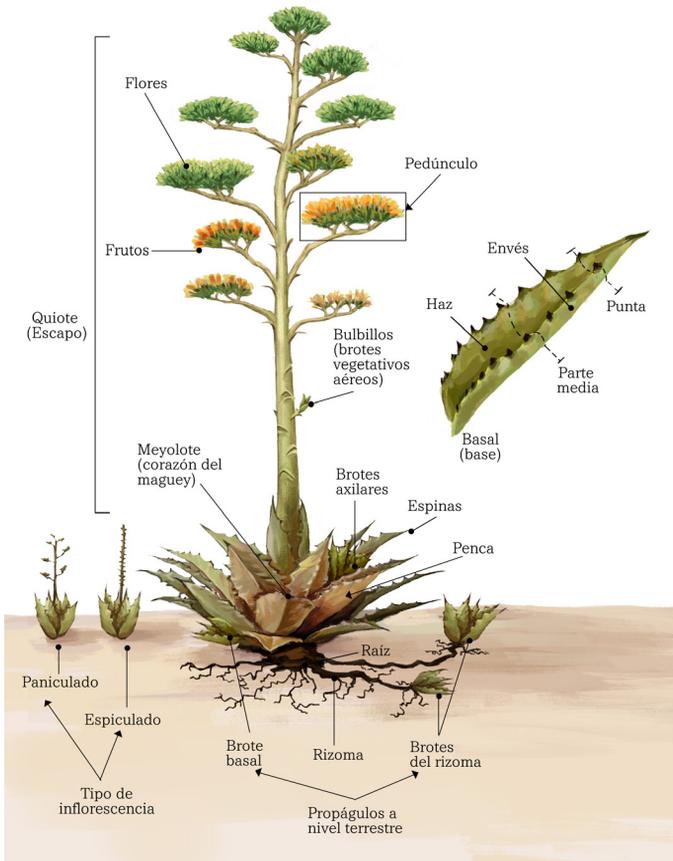
Palabras clave: Cultivo Agave, explotación, Rancho San Isidro, Tlaxcala.

Introducción

El Agave *salmiana* (o maguey pulquero), es cultivado principalmente en los estados de Tlaxcala, Puebla, Morelos, Estado de México e Hidalgo. De este maguey se obtiene un líquido opalescente, de sabor dulce, denominado aguamiel, que fluye del centro de sus pencas, una vez que el quiote es removido. Posteriormente por fermentación espontánea, el aguamiel es utilizado para la elaboración rústica y semi-industrial del pulque. Esta bebida de un bajo grado alcohólico (4-8%), es de color blanco, olor fuerte y viscosidad leve característica (Álvarez-Duarte et al., 2018).

El Agave *salmiana* o maguey pulquero (Figura 1) es una de las especies botánicas más estudiadas del altiplano de la República Mexicana, perteneciente al grupo *salmianae* se divide en diversos ecotipos con una gran diversidad genética (maguey de ixtle, penca larga, manso, chalqueño, xamini, xaco, amarillo, cosmete, venado, matziziquil, chino, cenizo, manso) que han sido fomentadas por los productores de cada región. Crecen en forma silvestre y son cultivados en regiones, de frías a templadas, con elevaciones entre 2300 a 2460 m snm con una precipitación de 360 a 1000 mm anuales (Narváez Suárez et al. 2016).

Figura 1. Planta de Maguey



En México el aprovechamiento de los Agaves pulqueros ha tenido varias etapas durante este siglo, la primera en la década de 1950-1960, durante la cual se consolidó la industria pulquera, incrementando la superficie de cultivo hasta 47,656 Ha, con un número de plantas de 25,104,000. Durante la década de los 60's, el cultivo intensivo del maguey pulquero alcanzó una superficie de 54,817 Ha, con un total de plantas de 27,567,212, esta segunda etapa es considerada la de mayor producción y por ende la de mayor ganancia económica. Sin embargo, en la década de los 70's empieza el declive de la industria pulquera, en esta etapa el cultivo del maguey disminuyó la superficie cultivada para la década de los 80's se estimó que apenas existían 10 millones de plantas. Sin embargo, no se encuentra como especie amenazada (NOM-059-ECOL-2001), de tal forma que las poblaciones

magueyeras han presentado diferentes etapas asociadas a diversos escenarios a través del tiempo (Rojas et al., 2016 y Roldan et al., 2022). La población magueyera actual es muy reducida, en el año 2020 el anuario estadístico de la producción agrícola del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) del Gobierno de México, reportó una superficie sembrada de apenas 648 Ha y 37,397.41 plantas con un valor de producción de \$105,436.95 entre cultivos de riego y temporal (SIAP, 2020).

Una de las razones por las que se dejó de sembrar el maguey pulquero de manera intensiva es por la baja demanda de su principal producto, el pulque, de este, ha disminuido su producción debido a la aparición de otras bebidas alcohólicas de gran impacto comercial, los estados productores de agave pulquero reportados en el SIAP para el año 2020, se muestran en la Tabla 1, destacando Hidalgo con un valor de la producción de \$ 637,662.57, seguido de Tlaxcala con \$105,436.95 (SIAP, 2020).

Tabla 1. Estados productores de maguey pulquero (2020).

	Entidad	Superficie (ha)		Producción	Rendimiento (adm/ha)	Valor producción (miles de pesos)
		Sembrada	Cosechada			
1	Guanajuato	7	5	122	24.40	532.52
2	Guerrero	1	1	6.10	6.10	21.77
3	Hidalgo	4858.20	1374.20	111682.95	81.27	637662.57
4	México	504.10	260.10	4595.79	17.67	17370.63
5	Michoacán	3.25	0	0	0	0
6	Puebla	983.50	339.50	11103.29	32.70	50641.75
7	Querétaro	259	0	0	0	0
8	San Luis Potosí	42	42	893	21.26	1171.78
9	Tlaxcala	648	524	37397.41	71.37	105436.95
10	Veracruz	115	112	1422.40	12.70	7561.73
TOTAL		7421	2657.80	167222.94	267	820399.70
Datos de https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/						

En el estado de Tlaxcala, se han creado en las últimas décadas patronatos, promotoras, comisiones y diversos grupos coordinadores para impulsar el cultivo del maguey, con el fin de promover, organizar y coordinar un mejor manejo sostenible del cultivo de maguey pulquero (García Mendoza, 2024) y su uso en el desarrollo de nuevos productos (Navor Alberto Rojas Mancera, 2022 y Roldan et al. 2022). Sin embargo, los frutos han sido escasos, ya que no se ha logrado impulsar en el desarrollo tecnológico para los productores y, por lo tanto, no existe un aumento de ganancias que incentive a estos para el fomento y transformación para este cultivo

Por ello, en este trabajo se desea exponer como caso específico, el de la familia “Del Razo Curiel” quienes, a lo largo de aproximadamente siete décadas ininterrumpidas, se han dedicado a la siembra y explotación del maguey pulquero en el “Rancho San Isidro”, ubicado en el municipio de Nanacamilpa, Tlaxcala (Figura 2 a-c).

Figura 2. a) Rancho San Isidro, b) Entrada principal y c) Plantas de maguey



La familia Del Razo conserva una cultura de tradición dedicada al cultivo del agave pulquero, logrando la transformación del aguamiel en pulque, siendo actualmente el único producto de esta cadena de valor, que es exportado y puesto en el mercado en forma enlatada (Figura 3a y 3b), como principal producto de transformación. Además de promover la comercialización de pulque natural y saborizado, de venta a granel en las pulquerías de Ciudad de México y en la región circunvecina. Otro de los productos en venta por parte de la familia Del Razo, son las plantas de maguey de las variedades Púa larga y Manso (Figura 3c), (Morales Manuel, 2018), ecotipos que por excelencia prefieren los productores de la región y de los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala, quienes plantan generalmente el maguey en tierras de cultivo, ya sea en forma de lidero, como cercas vivas, como medida para evitar la erosión de la tierra y preservar el medio ambiente debido a que son plantas con metabolismo CAM, captadoras de CO₂ (Flores et al., 2022).

Figura 3. a) Pulque enlatado, b) Saborizado y c) Plantación de maguey



En el presente trabajo se planteó como objetivo, generar conocimiento sobre el trabajo que por décadas se desarrolla en el Rancho San Isidro, ubicado en Nanacamilpa, Tlaxcala, los dueños impulsan el cultivo del maguey pulquero y buscan alternativas de uso y explotación agroindustrial sustentable, considerando como un nicho de oportunidad el empleo de métodos convencionales para la propagación en forma masiva, siendo un factor muy importante para la conservación de esta especie, así como la mejora en la calidad y cantidad de producción del agave y sus derivados.

Desarrollo Experimental

Los datos reportados se obtuvieron durante el periodo de 2019-2022 directamente de los propietarios del Rancho San Isidro, ubicado en el municipio de Nanacamilpa de Mariano Arista, Estado de Tlaxcala. El rancho se encuentra al oeste del estado de Tlaxcala, cerca de los límites con el estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas extremas son de 19° 27' - 19° 34' de latitud norte y 98° 26' - 98° 38' de longitud oeste. La altitud varía entre 2,600 y 3,300 metros sobre el nivel del mar. La extensión total del rancho es de 97,862 kilómetros cuadrados, lo que representa el 2.40% de la superficie total del estado. Se encuentra en la ruta "Calpulalpan y el Poniente", por la carretera federal 136 México-Veracruz. Sus límites corresponden al oeste y al norte con el municipio de Calpulalpan, al este con el municipio de Españita y con el municipio de Sanctórum de Lázaro Cárdenas, y al sur limita con el estado de Puebla, específicamente con el municipio de Tlahuapan (INEGI, 2022).

Para evaluar el objeto de estudio, se llevó a cabo una entrevista estructurada mediante un cuestionario. Las preguntas estaban relacionadas con la historia evolutiva de la familia Del Razo, el rancho y el Corporativo Magueyero San Isidro S.A de C.V. También se indagó sobre los ecotipos de maguey cultivados, las prácticas agrícolas, la producción de aguamiel y pulque, la innovación de productos y la comercialización.

Las entrevistas se realizaron directamente con diferentes miembros de la familia Del Razo Curiel, especialmente con los Señores. Rodolfo Del Razo (padre e hijo), quienes cuentan con más de 70 años de experiencia en el tema. Se utilizó un muestreo simple aleatorio para garantizar que cada miembro de la familia tuviera una oportunidad igual e independiente de ser entrevistado. Además, se entrevistó al personal, principalmente a los tlachiqueros, quienes proporcionaron información de primera mano sobre el proceso de colecta de aguamiel y las prácticas agronómicas aplicadas al maguey.

En el Rancho San Isidro, se cultivan 44 hectáreas de maguey, siguiendo la topografía del terreno. Además, cuentan con viveros especializados para conservar el germoplasma de los ecotipos de maguey que propagan y comercializan como material elite dentro y fuera del estado.

Se realizaron evaluaciones cualitativas y cuantitativas, incluyendo temas de:

- Propagación asexual del cultivo (mediante brotes producidos por rizomas, bulbillos o hijuelos).
- Densidad de cultivo.
- Prácticas agrícolas aplicadas al cultivo.
- Descripción de los ecotipos de maguey cultivados.
- Producción de aguamiel y evaluación de su composición.
- La composición fisicoquímica del aguamiel se analizó mediante métodos químicos proximales de acuerdo con las técnicas reportadas por (A.O.A.C, 2000). Se determinaron parámetros como contenido de humedad, cenizas, extracto etéreo, proteína total y extracto libre de nitrógeno. Además, se midió el pH y grados Brix.
- Los datos recopilados se sometieron a análisis estadístico utilizando software como Statgraphics y Excel (Office 365)

Resultados

Descripción de los ecotipos cultivados en el Rancho San Isidro

Las especies consideradas pulqueras se han reportado en diferentes fuentes García Mendoza et al. (2019), identifican 210 especies de *Agave*, reconociendo 130 como nativas de México entre las variedades de magueyes productores de pulque, que se identifican en el altiplano mexicano se encuentran principalmente *Agave americana* L., *A. americana* L. var. *americana*, *A. atrovirens* Karw. ex Salm-Dyck, *A. ferox* K. Koch, *A. hookeri* Jacobi, *A. mapisaga* Trel., *A. marmorata* Roetzl,

A. salmiana Otto ex Salm-Dyck, *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck subsp. *salmiana*, *A. scaposa* Gentry y *A. seemanniana* Jacobi (Alvares et al., 2018 y Vega et al., 2023). En el estado de Tlaxcala, existen variedades de agave entre la que se destaca es *A. salmiana* Otto ex Salm, que los habitantes identifican por sus nombres comunes (Maguey de Ixtle, Amarillo, Chino, Cenizo, Manso, Chalqueño, Ayoteco) (Ramírez et al., 2020 y Comunicación personal con el Dr. Abisaí García, 2012). En el Rancho San Isidro, se encuentran cultivados los ecotipos; Manso, Chalqueño, Púa larga y Ayoteco (Figura 4 a-f), todas asociadas a *A. salmiana* Otto ex Salm.

Figura 4. a) Rancho San Isidro, b) Vista de la plantación de agave, ecotipos de agave; c) Manso, d) Chalqueño, e) Ayoteco y f) Púa larga



El ecotipo Manso, presenta hojas angostas en la punta, poco alargadas, color verde intenso en la parte basal y cambia a verde-amarillo a lo largo de la penca, espinas alargadas, peso en promedio de 800 a 900 kg., su ciclo para explotación es de 10 a 12 años, con una producción de aguamiel de 15 a 18 L por día, con °Brix de 13 a 15, durante un tiempo de 4 meses.

Para el ecotipo Chalqueño, se observa un color verde grisáceo, cuyas pencas son poco más anchas que las del Manso, el número de pencas por planta es menor, la explotación de la planta inicia a los 12 años con una producción de aguamiel de 18 L por día, con °Brix de 11 -12.

El ecotipo Ayoteco, de color verde limón a amarillento, se distingue por tener sus pencas alargadas e inclinadas, presenta una mayor cantidad de espinas, las cuales se encuentran más juntas y achatadas, su peso en promedio es de 1200 kg; la edad de explotación es de 12 a 14 años, es la variedad que produce una mayor cantidad de aguamiel, de 18 a 20 litros por día, con °Brix de 10 a 12.

El maguey Púa larga, como característica posee pencas más largas, erguidas sobre la roseta, la especie pesa alrededor de los 1000 kg, con una coloración verde oscuro, su meyolote es angosto. Su edad de producción es de 8 a 10 años con una producción de aguamiel es de 10 a 12 litros por día, con °Brix de 12 a 13 (Comunicación personal con el Sr. Rodolfo del Razo Curiel).

Estas plantas se cultivan durante 8 a 10 años, antes de poder emplearse para la extracción de aguamiel, la primera etapa para iniciar su fase productiva es el capado de los magueyes (Figura 5a). Cuando se corta el conjunto de pencas más tiernas del centro de la planta denominado “cogoyo”, y éste se raspa diariamente para iniciar después de unos meses aproximadamente de 2 a 4 meses que es el tiempo de reposo de la planta para que inicie a producir sus primeros litros de aguamiel (Figura 5 a - d), (Sr. Del Razo Curiel, comunicación Personal). El tiempo de explotación para la producción de aguamiel dura de 3 a 4 meses, produciendo cantidades variables en función de la variedad de maguey y el periodo de explotación, siendo escasa al inicio, hasta llegar en promedio alrededor de 8 a 12 litros por día como máxima producción; al final de este periodo, la cantidad de aguamiel puede bajar hasta 2 o 4 litros por día, observándose las pencas marchitas sin su lozanía y turgencia características, en este último periodo la planta del maguey muere (Figura 5d).

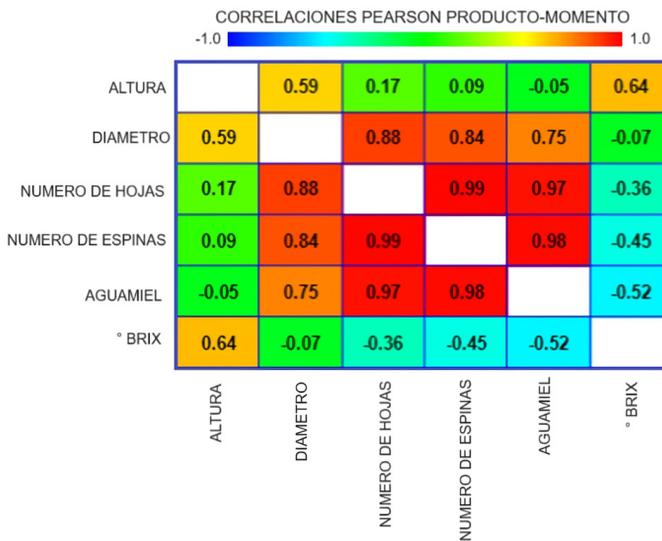
Figura 5. a) Maguey capado, b) Cogoyo, c) Etapa productiva “cajete” y d) Etapa final de producción



Algunos reportes han documentado que durante el periodo de producción se puede obtener de cada maguey entre 270 y 420 L de aguamiel (García Mendoza, 2012 y Vega-García et al., 2023). Sin embargo, la información proporcionada por el Sr. Rodolfo del Razo (2021 y 2022) indica que la producción total de cada planta (4 a 6 meses), puede alcanzar entre 500 y 1000 litros del aguamiel en función del ecotipo y la variedad. En el Rancho San Isidro, el promedio de aguamiel aproximado es de 1,200 L en la mañana y 800 L en la tarde, haciendo un total de 2000 litros por día. En la Figura 6, como resultado de la evaluación

estadística de la morfología y productividad de la planta, se muestra que existe una alta correlación positiva entre las variables (número de hojas, espinas, altura y producción de aguamiel, en menor intensidad el diámetro y altura de la planta, respecto a la producción de aguamiel y los grados Brix) por variedad, indicando que las plantas de maguey poseen características independientes en términos de productividad.

Figura 6. Correlación entre las variables (Número de hojas, espinas, altura, diámetro de la planta, respecto a la producción de aguamiel y los grados Brix)



En este estudio el volumen de la colecta de aguamiel por cada ecotipo de maguey fue variable (Tabla 2), en un periodo de extracción de cuatro meses, la producción de aguamiel sería entre 1721 a 1980 L. Santos et al., 2012 mencionan un dato de 1500 L de 4 a 6 meses como el periodo de cosecha de aguamiel. La cantidad de aguamiel colectada en la mañana y por la tarde, está asociada no solo al ecotipo de maguey, a la región de cultivo, a las condiciones climáticas, o tipo de suelo, sino también a la persona (“Tlachiquero”) que realiza la raspa de la cavidad del maguey y la forma de extracción de aguamiel, conocido como el proceso de “Tlachique” (Comunicación personal con el Sr. Rodolfo del Razo Curiel).

Tabla 2. Producción por día de cuatro variedades de *Agave salmiana*.

Variedad	Aguamiel (mL)	°Brix
Chalqueño	1851 ± 106.42	11.52 ± 0.39
Ayoteco	1979 ± 400.67	11.18 ± 0.56
Manso	1869 ± 444.47	11.47 ± 0.35
Púa Larga	1721 ± 272.57	12.05 ± 0.26

Los datos muestran el promedio de 3 repeticiones y su desviación estándar
Época de colecta de enero a junio, dos veces por mes.

Composición del aguamiel

En la determinación de sólidos solubles de las variedades evaluadas, se destaca el valor de 12.05 °Brix del maguey Púa larga. El valor obtenido para el ecotipo Manso, especie de maguey más común que se cultiva en la región, tiene un valor de 11.5, dato similar a los magueyes Ayoteco (11.18) y Chalqueño (11.52), estos últimos valores concuerdan con lo reportado en literatura para aguamiel de *A. salmiana* 11.40 °Brix y 11.0 °Brix en aguamiel de *A. atrovirens* (Romero et al, 2015). Sin embargo, Rascon et al., 2020 reportan un valor de 9.3 °Brix para *A. salmiana*, mucho más abajo del promedio de otras variedades. Generalmente la producción está condicionada por la región en donde se colecta, tipo de suelo, prácticas agrícolas, así como la estación del año, debido a que cuando la colecta de aguamiel es obtenida en época de lluvia la proporción de estos sólidos se ve disminuida, los productores le denominan “aguamiel mojada”. La caracterización de los componentes principales del aguamiel de las plantas de maguey estudiadas en este trabajo se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Características fisicoquímicas del aguamiel de cuatro variedades de *Agave salmiana*

*Componentes	Manso	Chalqueño	Ayoteco	Púa Larga
Densidad (g.ml-1)	1.27 ± 0.04	1.12 ± 0.03	1.17 ± 0.02	1.16 ± 0.08
pH	6.60 ± 0.24	5.9 ± 0.02	6.20 ± 0.01	6.4 ± 0.01
Acidez (% ácido cítrico)	0.06 ± 0.008	0.07 ± 0.002	0.07 ± 0.002	0.07 ± .001
Índice de refracción	1.38 ± 0.12	1.14 ± 0.05	1.13 ± 0.04	1.16 ± 0.01
*Humedad	86.8 ± 0.04	82.6 ± 0.06	81.7 ± 0.61	82.6 ± 0.06
*Cenizas	3.13 ± 0.03	3.11 ± 0.05	3.08 ± 0.02	3.11 ± 0.08
*Proteínas	3.01 ± 0.36	3.42 ± 0.086	3.49 ± 0.82	3.05 ± 0.01
*g. 100 g., en base seca; promedio de tres mediciones ± desviación estandar.				

La composición del aguamiel varía significativamente entre las variedades de agave. La densidad presenta valores de 1.12 a 1.27 g. mL⁻¹, la humedad varía entre 86.8 y 81.7 g. L⁻¹, encontrándose acorde a los parámetros reportados por Romero et al., 2015 (89.61g. L⁻¹). El contenido de cenizas es de 3.08 a 3.13 g. L⁻¹ y de proteínas entre 3.01 a 3.49 g. L⁻¹, valores comparables a los datos descritos por Ortiz et al. 2008, son de 3.3 y 3.0 %, reportados por Romero et al. 2015, quien indica valores similares de 3.50 y 3.10%. Los valores de pH oscilan entre 5.9 a 6.6. Este parámetro y la densidad se considera de interés para los productores, ya que indica la calidad en la que se encuentra el aguamiel al momento de ser colectada para la transformación a pulque.

El porcentaje de acidez es de 0.06 a 0.070, comparable al reportado por Ortiz et al. (2008) que es 0.0680 % descrito por Romero et al. (2015), estos autores reportan un valor de 0.060%. Este valor incrementa hasta 1.60 % si las muestras son congeladas en gran volumen y al descongelar, durante este proceso se observa el incremento del porcentaje de acidez, el cual puede estar asociado a una mayor acumulación de ácidos debido a la presencia natural de una comunidad microbiana, la cual participa en el proceso de fermentación para la obtención de pulque. Por otra parte, los valores obtenidos de pH, acidez, proteína y cenizas en el aguamiel colectada de las plantas de maguey estudiadas concuerdan parcialmente con lo establecido para aguamiel tipo I (NMX-V-022-1972). Es importante

mencionar que la composición del aguamiel entre cada variedad varía significativamente, posiblemente debido a la época de colecta (agosto a noviembre), por la edad del agave (8 y 10 años) y por factores como son suelo, clima y prácticas agrícolas realizadas en la zona de Nanacamilpa, así como el abonado y poda de plantas de maguey. El aguamiel presentó una cantidad considerable de azúcares reductores totales. Ortiz et al. (2008), reporta para *A. mapisaga* un contenido del 75%, de fructosa como azúcar mayoritario un 32.4%, de glucosa 26.5% y sacarosa 8.8%, mientras para *A. atrovierens* se reportan valores de glucosa 28.68, de fructosa 32.63 % y sacarosa 12.9% (Romero et al., 2015). Leal-Díaz., et al. (2016) reportan un contenido de sacarosa del 44.4%, glucosa 29.1% y 26.5 % de fructosa para *A. salmiana*. En este trabajo, para todas las plantas de maguey evaluadas se reporta una cantidad de azúcares de 57.6 a 61.9 %, de glucosa entre 27.5 y 30.7 g.100 g⁻¹, de fructosa total entre 27.2 a 32.1 g.100 g⁻¹ y sacarosa de 8.9 a 12.2%. Sin embargo, Peralta et al. (2022), mencionan cantidades promedio de 9-11% p/v de sacarosa, estos autores cuantificaron fructanos obteniendo un 0.2-0.6% p/v en el aguamiel. Indican también que es importante considerar la forma de raspa y colecta de aguamiel para así enriquecerla de estos componentes e igual favorecer la producción de pulque, el cual está acorde a la comunidad microbiana predominante (Chacon et al. 2020). Andrade et al. 2019, de igual forma comentan que el aguamiel es una fuente de fructanos de donde se pueden obtener productos funcionales promisorios (López et al. 2018 y Andrade et al. 2019). Finalmente, la única explotación comercial del aguamiel se realiza mediante la fermentación natural con la flora microbiana que existe en el ambiente, logrando la obtención de pulque en aproximadamente 24 a 48 horas.

Comercialización de pulque y plantas de agave

Como se ha mencionado el pulque se comercializa principalmente en las pulquerías. Una pulquería de tamaño mediano vende de 200 a 600 litros diarios, las más grandes entre 1,000 y 1,200 litros diarios. Su precio es variable y depende de varios factores, como es el lugar de venta, la presentación y sabor (Martínez, 2018 y Fernández y Sagarnaga, 2022). Actualmente el precio del pulque se encuentra entre 5.00 a 20.00 pesos por litro, acorde al lugar de venta, sea natural o saborizado (Figura 7a y b). Otro segmento innovador ha sido la comercialización de pulque en lata (Figura 7b), procesos estandarizados por la familia Del Razo. Producto que cumple con los parámetros de calidad y normatividad de FDA

(Food and Drug Administration), que le permite ser un producto de exportación, principalmente a Estados Unidos con un promedio de 45 a 50 mil latas/temporada, cada lata de pulque contiene 334 mL, 5% de alcohol. El precio de venta oscila alrededor de 10 a 12 dólares.

Figura 7. a) Pulque natural, b) En lata natural y c) Saborizado



La comercialización se realiza bajo la denominación del Corporativo Magueyero San Isidro S.A de C.V., empresa familiar socialmente responsable con 10 años de experiencia, que produce y comercializa pulque enlatado. El producto es natural, con un contenido considerable de minerales, proteína y carbohidratos. El Corporativo cuenta con la infraestructura necesaria para la producción de pulque, misma que podría generar una reingeniería para modificar e introducir equipo para otros productos. Actualmente la empresa está interesada en tecnificar productos elaborados a partir del maguey, dado que tradicionalmente y de forma artesanal han elaborado, mismos que son comercializados en baja proporción a nivel local y regional.

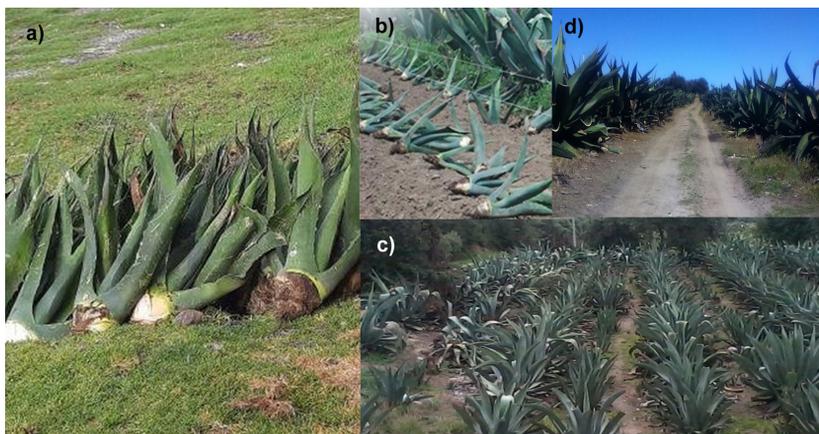
El Rancho San Isidro comercializa planta de maguey (hijuelos) en cantidades considerables en la región centro del país. Generalmente a productores de maguey y a Instituciones gubernamentales con la finalidad de incrementar las poblaciones magueyeras y de reforestación (Morales Manuel; 2018). Toda la planta cuenta con la certificación acorde a las buenas prácticas agrícolas (sistema de cultivo, preparación del terreno, abono, podas). Brinda asesoría sobre las prácticas agrícolas a los productores de maguey para incrementar las poblaciones magueyeras.

Sistema de cultivo

El Rancho San Isidro es precursor del cultivo de maguey en el Estado, forma parte del impulso del sistema producto maguey en los estados Puebla, Hidalgo y Tlaxcala y del consejo regional de productores de maguey (Madrigal et al. 2013 y 2014).

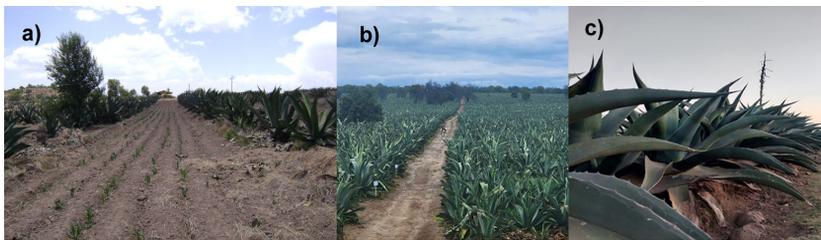
En el Rancho San Isidro se realizan todas las labores, desde el trabajo de campo hasta la entrega de producto con valor agregado. Con relación al cultivo de plantas de maguey que se ejecuta en el Rancho San Isidro, la plantación es realizada por selección de hijuelos, el proceso se practica cuando el maguey emite nuevas plantas (renuevos vegetativos o mecuates), se dejan crecer hasta la altura de 80 a 90 cm, cuando alcanzan dicha altura los mecuates, se remueven de la planta madre, estos se arrancan con una barreta que se introduce a manera de palanca bajo sus raíces tratando de no lastimar ni dañar la planta madre. Una vez arrancados se les deja solamente con tres pencas las más nuevas y cercanas al meyolote o cogollo (parte central del maguey), podándole las raíces (Figura 8a), las plantas con meyolotes desnudos se dejan tiradas a lado de las magueyeras por un periodo de 4 a 6 meses a orear, periodo en el cual se coloca en estrés hídrico, lo cual favorece el enraizamiento y arraigo de la planta al suelo, de esta forma todos los hijuelos son trasplantados a otra parcela para que continúen su desarrollo (Figura 8 b, c y d).

Figura 8. a) Hijuelos de maguey, b) Hijuelos listos para ser colocados en suelo preparado para el cultivo de renuevos, c) Plantas de agave de 3 a 4 años de edad fisiológica y d) Plantación de maguey en parcela



El Sr. Del Razo comenta que es la manera de que el maguey se adapte más rápido para su desarrollo. Él, indica que la labor de arranque que se efectúa, de preferencia en los meses de primavera, es para que las plantas de maguey estén listas en sus bordos antes de los meses de lluvia y como se dice coloquialmente “amacicen” en el terreno, con ayuda de las lluvias. Ya que, en esta época, es cuando más se desarrolla la planta (Figura 9a). En promedio una planta adulta desarrolla de 10 a 12 plántulas (o mecuates), éstos nacen de la raíz de la planta madre después de aproximadamente 3 años de su plantación, generando en promedio de 3 a 4 renuevos por año. En la etapa en la que la planta madre emite los primeros brotes, se inicia el periodo de podas, que se practica a las plantas hasta la edad de producción de aguamiel (Figura 9b y c).

Figura 9. a) Magueyes plantados en el terreno, b) Parcela de plantas entre 5 y 6 años y c) Magueyes adultos (8 a 10 años)



Sin embargo, se reporta que algunos productores dejan crecer al meholote (parte central del maguey) para que se desarrollen sus flores y de estas se de origen a la semilla, de cada capsula se obtienen decenas de semillas, estas se siembran en almácigos hasta su nacimiento y consolidación (2 a 6 meses), luego se trasplanta a viveros donde se dejan hasta que cumplan 18 a 24 meses de sembrados. Después son removidos para establecer en la parcela correspondiente.

Las prácticas productivas del maguey fueron a su vez tradiciones de generación en generación, que se volvieron cotidianas para el campo y el trabajo de los jornaleros del Rancho, quienes han adquirido experiencia para establecer un cultivo planificado, con un desarrollo de la planta mejor controlado. Los trabajadores mencionan que las actividades de cuidado y protección del maguey pulquero pueden ser muy contrastantes ya que durante el periodo de siembra y cosecha el cuidado agrícola del maguey es mínimo en comparación con otros cultivos de la región (cebada y maíz principalmente).

Los jornaleros (25) y los tlachiqueros (25 a 30 personas) realizan revisiones periódicas a las plantas para evitar la presencia de plagas que contaminen a la misma, como mecanismo de control de plagas que eviten pérdidas de la población. Estas personas se encargan del deshierbe, el cual se realiza de forma manual de dos a tres veces por semana, según sea el caso, así como de abonar cada planta usando abono orgánico proveniente del estiércol de animales de corral, este proceso se realiza de dos a tres veces al año y dependiendo de la edad de las plantas. También utilizan las pencas de poda, las cuales son trituradas en el campo y ocasionalmente utilizan el metzal como abono propio para la planta.

Como se mencionó la madurez fisiológica o vida vegetativa corresponde a un periodo que va desde su plantación hasta su maduración y toma alrededor de 8-10 años. Durante este periodo influyen las condiciones de humedad y suelo. Generalmente, la plantación del maguey se hace en diferentes formas según el tipo de explotación agrícola y sobre todo a la topografía del terreno. En el aspecto agrícola su importancia está influenciada por su capacidad para el cultivo en el suelo arcilloso que sea pobre en materia orgánica y sin cubierta vegetal permanente. Si se tiene terrenos con pendientes y se quiere que el maguey funcione como reten del suelo, se planta en bordo que es una elevación de 1.20 metros de altura aproximadamente sobre cuyo lomo se coloca la planta (Payno. 2014). La longitud entre bordos depende de la pendiente del terreno, mientras que el espacio entre planta y planta es dado por el diámetro de la roseta que forman las pencas, de ahí se tiene entre 2.5 y 3 metros de distancia; puede ser de 5 a 6 metros cuando se intercala con un nopal o árbol frutal. Conforme se incrementa la inclinación de la superficie el espaciamiento de los bordos se acorta. Si se trata de terrenos planos o con pendiente mínima es posible tener 700 o más plantas por hectárea cuadrada. Con esta densidad se tiene una separación entre hilera e hilera de 5 metros, y 3 metros entre planta y planta para obtener entre 800 y 1000 plantas por hectárea. Esta distancia permite que entre hilera e hilera (metepantle o mesurco) se pueda intercalar cultivos de grano (cebada y maíz) (Madrigal et al. 2013 y 2014).

Narváez Suárez et al. 2016, mencionan que a pesar de que un gran número de productores o ejidatarios conoce los beneficios que proporciona la planta de maguey al suelo, como alternativa de rescate de suelos erosionados, no todos realizan prácticas de cultivo y conservación a través de la formación de metepantle para lindero o bien de cultivo extensivo.

Para el caso del Rancho San Isidro, el cultivo y explotación del

maguey se ha desarrollado de saberes históricos, del resultado de observaciones, experimentaciones y selecciones azarosas, conduciendo a un sistema de cultivo más usual que no es en bordos, sino son en parcelas establecidas y viveros vivos, en donde los cultivos del maguey de variedades seleccionadas por sus características fisiológicas y morfológicas, se desarrollan en dos etapas una de adaptación y otra de desarrollo de la planta hasta la etapa de producción.

En el caso del Rancho San Isidro, los viveros se localizan en zonas especiales de las 44 hectáreas, estos se encuentran intercalados, para ello se requiere la preparación del terreno mediante un rastreo o barbecho, donde se deja el suelo parcialmente liso, con bordes o terrones que sirven para evitar la lixiviación del suelo y el desarrollo de malezas, además para que la planta tenga una mejor adaptación al suelo. Aproximadamente en el vivero se establecen alrededor de 1000 plantas. Los viveros están compuestos de forma independiente de los ecotipos que se cultivan en el rancho que son Manzo, Ayoteco, Chalqueño y Púa larga. Esta última ha sido seleccionada y cultivada debido a sus características morfológicas.

Posteriormente las plantas obtenidas en los viveros se llevan a un sistema de cultivo practicado por la familia Del Razo. Este consiste en cultivos en hilera, denominado como “maxantle” o “mashacle” que consiste en plantar las plantas en los vértices de un triángulo equilátero, lo que permite tener más plantas que si se desarrolla en otro tipo de sistema, para estos productores le denominan de cuadrícula, de “cruz” o “contracruz”. En el Rancho, en las 44 hectáreas dedicadas al cultivo del maguey es de tipo escalonado, es decir, se requiere una plantación con ejemplares de todas las edades, agrupando las plantas en desarrollo con edades similares para que existan plantas que, durante todo su periodo de crecimiento, alcancen una madurez fisiológica en diferentes tiempos y se encuentren listas para la producción de aguamiel. De esta manera se asegura una producción continua tanto de aguamiel como de planta de maguey (Comunicación personal con los Señores. Rodolfo y Rafael del Razo Curiel, 2019).

Una vez que el maguey se ha trasplantado y colocado en la parcela donde se desarrollará, inicia el periodo de crecimiento hasta alcanzar la madurez productiva, para que este sea capado y se prepare para la obtención de aguamiel. Como ya se mencionó, este lapso de desarrollo fisiológico puede durar entre 8 y 10 años, en función de la variedad de la planta. Pero los señores Del Razo indican que es preferible esperar a los 10 años, debido a que la planta logra su pleno desarrollo y en términos de producción de aguamiel es más rentable. Durante ese pe-

riodo de crecimiento, la plantación de maguey, se le realizan prácticas agrícolas, entre ellas está el deshierbe, 4 veces por año, la adición de abono orgánico, es decir estiércol, este es acorde al requerimiento de las plantaciones y antes de la época de lluvia se realiza trabajo para el control de malas hierbas o maleza.

Además, se practican podas, una cada dos años. La primera a los 4 o 5 años de trasplantado y la última cuando ha alcanzado 1.4 metros de altura y ha emitido varios hijuelos. En las podas se cortan todas aquellas pencas viejas más alejadas del meyolote, se cortan a raíz del mezontete hasta dejar unas 8 o 10 hojas sin cortar cuando los magueyes son jóvenes (4-6 años). Las podas se realizan con una tejadera o machete curvo de doble filo. El Sr. Del Razo comenta que en un año un podador experto puede hacer entre 10 mil y 12 mil podas. Las pencas de poda se dejan frecuentemente a un lado de la planta y sirve de abono.

Por otra parte, para efectuar la capazón de la planta requiere de un especialista. Se escogen ciertos periodos propicios como lo son la fase de la luna nueva. Los dos periodos en el año en que se hacen capazones masivas son el inicio de la temporada de lluvias y a fines de otoño (Comunicación personal Sr. Del Razo, 2019). Esto tiene un sentido ya que mantiene un mismo número de plantas en producción.

El proceso de capado implica:

1. Selección de la planta en edad de caparse (8 – 10 años).
2. Limpieza de púas terminales de las pencas y del material que pueda presentar un peligro o estorbo en la entrada de la “olla” o “cajete” para la persona que realiza la colecta de aguamiel.
3. Corte de la penca protectora del meyolote que es la que se encuentra en la parte exterior del maguey.
4. Corte del meyolote para dejar al descubrimiento la yema vegetativa, denominada “huevo”, es la base generativa de la planta. Junto con el huevito se eliminan los bordes alrededor de la herida principal para desojar y a partir de esta, se forma la cavidad interior de la piña del maguey (cajete).
5. Al final del proceso de obtención de la “olla” o pozo del maguey, este es marcado con la fecha para indicar que es una planta que está recién capada, generalmente dejan de 4 a 6 meses en reposo (añejamiento), tiempo que permite a la planta de reparar los tejidos para iniciar la etapa productiva del maguey. A partir de ese momento el tlachiquero visitará dos veces al maguey todos los días con un raspador (herramienta semicircular, afilada en su borde, de unos 10 centímetros de diámetro) y eliminará el material gelatinoso, denominado “metzal” que se forma después de cada visita, el cual se deposita a un lado de la planta

(figura 10a), así como una ligera capa del cajete (1cm), para que no cicatrice y siga produciendo aguamiel. Con la ayuda de un “acocote” (Calabaza grande, alargada y hueca, abierta por ambos extremos) el tlachiquero succiona con la fuerza de sus pulmones, el aguamiel (figura 10b y c) que se depositó en el cajete y lo vacía en pequeñas barricas de madera o en un odre de piel de chivo, a la fecha actual hecho de plástico (figura 10d), al término de vaciar el cajete, el tlachiquero debe cubrirlo con pencas y una piedra, a fin de que no le caiga basura, agua de lluvia, o se introduzcan animales extraños (Del Razo Curiel, com. Personal.). El aguamiel colectado es transformado a pulque en mayor proporción.

Figura 10. a) Metzsal, b) Proceso de raspa del maguey, c) Utensilios y d) Colecta de aguamiel



El pulque, bebida alcohólica, obtenida de la fermentación natural del aguamiel, también se emplea como levadura para elaborar el “pan de pulque”, comúnmente en ciertas poblaciones del estado. El Sr. Del Razo, comenta que, en varias comunidades en el estado, las pencas (parte basal de las hojas) son cocidas a vapor en pozos hechos de ladrillo y barro de 1.20 de profundidad por 90 cm de ancho, sean profundos o aéreos, los cuales son calentados previamente con leña, durante 8 horas; estos depósitos se envuelven con las pencas y se emplean para

envolver carne (res, ovino, pollo, etc.), la cual es cocida en pozos para elaborar barbacoa, este tratamiento le da un sabor especial a la carne. La gruesa cutícula de las hojas de maguey, se desprende y se emplea para envolver carne, para elaborar barbacoa u otros guisos denominados mixiotes, dándole un sabor especial a la carne, esta práctica es común en el centro del país, donde hay mercados que venden la cutícula de maguey, obtenida por el proceso de desmixiotado (Figura 11) causando un daño fisiológico a la planta, el cual genera que una severa deshidratación de las plantas que conduce a que estas mueran, sin producir aguamiel, reduciendo así el número de plantas productoras y ocasionando pérdida de poblaciones magueyeras. Lo que implica falta de conciencia en la explotación del recurso. El Sr. Del Razo, menciona que el ecotipo púa larga presenta una cutícula más delgada en comparación de otras variedades, lo cual concuerda con Chávez-Güitrón et al (2019), quienes describen la variación en los caracteres epidérmicos de la hoja y la plasticidad fenotípica de individuos de tres localidades de estudio, indicando que existen diferencias significativas para *Agave salmiana* que presenta subespecies con variación morfológica. Esto apoya el comentario del Sr, Del Razo sobre el maguey púa que no es objeto del proceso de “desmixiotado”, en contraste con otras prácticas realizadas por los productores a las pencas que consiste en picar la penca sea con un machete o bieldo para evitar les sea eliminada la cutícula de la hoja de maguey, a este proceso se le denomina "picado". Jacinto y Moya (2000) comentan que este tipo de practica apoya en la conservación y desarrollo de hojas en las plantas manteniéndolas intactas.

Figura 11. Desprendimiento de la cutícula a la penca de agave (desmixiotado)



Desafortunadamente no todas las personas de las comunidades tienen un interés de explotación sustentable de esta especie. La familia del Razo, indica que de la planta de agave se puede obtener una gran diversidad de nuevos productos considerando su milenaria historia también de explotación. Actualmente, tienen a la venta productos elaborados de forma semiindustrial dentro del Corporativo, con características de calidad, aplicando las buenas prácticas de manufactura, cumpliendo la normatividad de etiquetado, bajo la denominación “CORMASANI” (Figura 12)

Figura 12. Usos de agave salmiana (maguey pulquero)



Dada la experiencia de la Familia Del Razo Curiel sobre el cultivo de maguey, en el Rancho San Isidro, se cultivan 44 hectáreas, con aproximadamente 80,000 plantas para producción, sembradas de forma escalonada en diferentes edades o etapas de desarrollo fisiológico, sin contar con los viveros, los cuales integran aproximadamente cuatro hectáreas. En total existen un promedio de más de 2,000.00 plantas para explotar a lo largo de doce meses. Las plantas son seleccionadas considerando las características fenotípicas, la producción y calidad de aguamiel colectado. Entre las que se destacan de las 4 variedades sembradas; púa larga y manso. Esto asegura en términos de producción, un cultivo con una explotación sustentable.

La contribución del Corporativo Magueyero San Isidro incide con su esquema de producción y explotación que permite:

- Conservar la biodiversidad de genes, poblaciones y ecosistemas y con ello las variedades y ecotipos tradicionales.
- La propagación clonal, por selección de plantas ejemplares que permite mayores rendimientos en termino de producción de aguamiel.
- Se conserve la cultura a través de sus tradiciones y conocimientos asociados.
- Se generen empleos y la oportunidad de mejores condiciones de vida (desarrollo social) y se evite la migración de la gente.
- Se conserve el paisaje que atrae al turismo en Tlaxcala (Parque de la luciérnaga y Ruta del Pulque).
- Aportar innovación en el uso que se da a los magueyes, el cual solo se limita, en muchos de los casos, a la obtención de un sólo producto (pulque), cuando bien podría hacerse un uso más integral de ellos, bajo una explotación de forma sostenible, lo cual significaría una mayor rentabilidad para los productores.

Actualmente en El Rancho San Isidro, a través del Corporativo Magueyero San Isidro S.A de C.V., colocan en venta diversos productos derivados de la planta de maguey (Figura 13) y promueven acciones de turismo como la ruta del pulque y santuario de la luciérnaga (García E. 2020).

Figura 13. Productos derivados de maguey pulquero en el Corporativo San Isidro S.A de C.V.



Conclusiones

En este trabajo se resumen las actividades realizadas en el cultivo y explotación de agave pulquero en el “Rancho San Isidro”, como un ejemplo de manejo sustentable y económicamente rentable. El enfoque principal es fomentar el cultivo del maguey pulquero, incluyendo las cuatro principales variedades descritas: Manso, Púa larga, Chalqueño y Ayoteco. De las cuarenta hectáreas cultivadas, cuatro se dedican a conservar el germoplasma en viveros. Las prácticas agrícolas que se incluyen en el manejo son: la revisión constante de plantas para evitar plagas, la poda de pencas, el uso de abono orgánico y el control manual de malas hierbas. Este sistema beneficia tanto la biodiversidad como el aprovechamiento sustentable del maguey. Los tlachiqueros están capacitados para la colecta de aguamiel, que debe cumplir con especificaciones óptimas de grados Brix y densidad para la elaboración de pulque y otros productos derivados (alcohol, concentrado, inulina y azúcar). Las prácticas culturales en el Rancho San Isidro han generado desarrollo social y económico en la comunidad, protegiendo el valor cultural de la planta en la región del centro del país, aportando adicionalmente al manteniendo del paisaje tradicional y turístico en el estado de Tlaxcala, cuyo fomento se garantiza con acciones como la ruta del pulque y el santuario de la luciérnaga.

Agradecimientos

A Miranda Sánchez Sánchez por la ilustración de agave (figura 1). Edición de fotografías originales Areli Flores Morales. A los señores; Rodolfo del Razo, padre e hijo y toda la familia Del Razo Curiel (Rancho San Isidro, Nanacamilpa, Tlaxcala).

Bibliografía

- Andrade, A. I. C., Bautista, C. R., Cabrera, M. A. R., Guerra, R. E. S., Chávez, E. G., Ahumada, C. F., & Lagunes, A. G. (2019). Agave salmiana fructans as gut health promoters: Prebiotic activity and inflammatory response in Wistar healthy rats. *International journal of biological macromolecules*, 136, 785–795. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.045>
- Álvarez-Duarte, M.C., García-Moya, E., Suárez-Espinosa, J., Luna-Cavazos, M., & Rodríguez-Acosta, M. (2018). Conocimiento tradicional, cultivo y aprovechamiento del maguey pulquero en los mu-

- nicipios de Puebla y Tlaxcala. *Polibotánica*, (45), 205-222. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.15>
- Aguilar, J. B.; Enríquez, D. J.; Rodríguez, O. G; Granados, S. D., & Martínez, C. B. (2014). El estado actual de *Agave salmiana* y *A. mapisaga* del Valle de México. *México. Rev. Mex. Agroec.* 1(2):106-120.
- A.O.A.C. (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (17th ed.). USA. MD: Association of Official Analytical Chemist.
- Chacón-Vargas, K., Torres, J., Giles-Gómez, M., Escalante, A., & Gibbons, J. G. (2020). Genomic profiling of bacterial and fungal communities and their predictive functionality during pulque fermentation by whole-genome shotgun sequencing. *Scientific reports*, 10(1), 15115. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71864-4>
- Chávez-Güitrón, Lorena E., Salinas-Pérez, Florencia del C., Pérez-Salinas, Edgar A., Caballero, Javier, Vallejo-Zamora, Alejandro, & Sandoval-Zapotitla, Estela. (2019). Variación de caracteres epidérmico-foliares de *Agave salmiana* subsp. *salmiana* (Asparagaceae) en el centro de México. *Botanical Sciences*, 97(4), 711-724. Epub 04 de febrero de 2020. <https://doi.org/10.17129/botsci.2159>
- Fernández-Galicia., Y. V. & Sagarnaga-Villegas., L.M. (2021). Análisis económico de la producción de pulque y aguamiel en el Oriente del Valle de México. Consultado en: <https://www.researchgate.net/publication/366325033>
- Flores-Morales A.; Aquino-Juárez D. V., Ocaranza-Sánchez E. & Sánchez-Contreras A. (2022). Cap. 6. El maguey pulquero, descripción del cultivo y explotación en el Estado de Tlaxcala. En: *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis* (pp 350-356). México. Editores: Programa Mexicano del Carbono (PMC)/ Instituto de Ecología, A.C. (INECOL). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 404 p.
- García Eric (2020, 30 de septiembre,) Tlaxcala: deleita tus sentidos con la Ruta del Pulque y la Luciérnaga. Secretaria de Turismo-Tlaxcala. (2020). *Ruta-3-el-pulque-y-la-luciernaga*. Recuperado en: www.visitatlaxcala.com.mx/ruta-3-el-pulque-y-la-luciernaga
- García-Mendoza, A. J. (18 de febrero del 2012). México, país de magueyes. Suplemento "La Jornada del campo". *La Jornada*, no. 53, p. 4.
- García Mendoza, A. J., Franco Martínez, I. S., & Sandoval Gutiérrez, D. (2019). Cuatro especies nuevas de *Agave* (Asparagaceae, Agavoi-deae) del sur de México. *Acta Botanica Mexicana* (Número 126). <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1461>
- García Montiel Otoniel. Cámara de Diputados. (2024). Impulsan iniciativa para expedir una ley que proteja al Maguey. Consultado

- en: <https://www.portalambiental.com.mx/legislacion/20240604/impulsan-iniciativa-para-expedir-una-ley-que-proteja-al-maguey>.
- González-Montemayor, ÁM., Flores-Gallegos, A.C., Serrato-Villegas, L.E. et al. (2020). Processing temperature effect on the chemical content of concentrated aguamiel syrups obtained from two different Agave species. *Food Measure* 14, 1733–1743 <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00421-4>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022). Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?a-g=070000290015#collapse-ResumenPrincipales> resultados por localidad.
- Jacinto José, R., & García Moya, E. (2000). Remoción Cuticular ("Mixio-te") y Desarrollo Foliar en los Agaves Pulqueros (*Agave Salmiana* y *A. Mapisaga*). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (66), 73-79. DOI: 10.17129/botsci.1613
- Leal-Díaz, A. M., Noriega, L. G., Torre-Villalvazo, I., Torres, N., Alemán-Escondrillas, G., López-Romero, P., Sánchez-Tapia, M., Aguilar-López, M., Furuzawa-Carballeda, J., Velázquez-Villegas, L. A., Avila-Nava, A., Ordáz, G., Gutiérrez-Urbe, J. A., Serna-Saldivar, S. O., & Tovar, A. R. (2016). Aguamiel concentrate from *Agave salmiana* and its extracted saponins attenuated obesity and hepatic steatosis and increased *Akkermansia muciniphila* in C57BL/6 mice. *Scientific reports*, 6, 34242. <https://doi.org/10.1038/srep34242>
- López G. M. (1988). *El maguey: árbol de las maravillas*, México: CONACULTA.
- López-Romero, J. C., Ayala-Zavala, J. F., González-Aguilar, G. A., Peña-Ramos, E. A., & González-Ríos, H. (2018). Biological activities of *Agave* by-products and their possible applications in food and pharmaceuticals. *Journal of the science of food and agriculture*, 98(7), 2461–2474. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8738>
- Madrigal Lugo, R., Velázquez Loera, A., García Moya, E., Sánchez Lozada, O. & Ramírez González, X. (2013). "El Maguey, Cultivo y Cultura en la Región Centro del País; Primer Etapa. Fideicomiso de Desarrollo Regional Centro País, pp.1–24.
- Madrigal Lugo, R.; García M., E. & Velázquez L., A. (2014). El maguey: cultivo y cultura. En el maguey y el pulque en la región central de México. Gobierno del Estado de Tlaxcala. Fideicomiso Colegio de Historia de Tlaxcala. México. pp.137-157.
- Martínez J.C. (2018. 8 de junio), "Tomarte un litro de pulque ahora cuesta 20 pesos". *El sol de Puebla*, Consultado en: <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/estado/tomarte-un-litro-de-pulque>

- ahora-cuesta-20-pesos-1745603.html
- Mendoza Mendoza Bethsua, Velázquez de Lucio Brianda Susana & Romero López María del Rosario. (2023). Comprehensive use of agave salmiana. *Journal of Agricultural Sciences Research*. 3(16), 1-13. <https://doi.org/10.22533/at.ed.9733162305109>
- Montse Romero. Food Travel. Pulquerías a domicilio: a falta de amores, ¡pulque señores! Publicado el 8 de junio-2020. Obtenido en: <https://foodandtravel.mx/pulquerias-a-domicilio-a-falta-de-amores-pulque-senores/> Revisado el 6 de septiembre-2021.
- Morales Manuel. (2018. 6 de febrero). Sol de Tlaxcala; Venderá rancho San Isidro 30 mil plantas de maguey. Consultado en: <https://www.elsoldetlaxcala.com.mx/local/municipios/vendera-rancho-san-isidro-30-mil-plantas-de-maguey-983819.html#>
- Narváz Suárez, A. U., Martínez Saldaña, T. J., Velázquez, Mercedes A. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de Geografía Agrícola*, (56), 33-44.
- Navor Alberto Rojas Mancera. Senado de la Republica. (2022). Inicial con proyecto de decreto por el que se expide la Ley Federal para la Conservación, Protección, Restauración y Aprovechamiento Sustentable del Maguey, consultado en: https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/65/2/2022-11-29-1/assets/documentos/Ini_Morena_Sen_Rojas_Expide_Ley_General_Conservacion_Maguey.pdf
- NORMA Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001, (2002. 6 de marzo) Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Recuperado de: <https://www.bing.com/search?q=NOM-059-ECOL-2001+%amp;form=ANNTH1&refig=d9076f11fd284f7180f15d58d62a4fba>
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Norma Mexicana. NMX-V-040-1972. (1972. 26 de Septiembre) “Aguamiel, Hydromel”. Recuperado de: <https://gotomexico.today/media/doc/nmx-v-022-1972.pdf>.
- Ortiz-Basurto, R. I., Pourcelly, G., Doco, T., Williams, P., Dornier, M., & Belleville, M. P. (2008). Analysis of the main components of the aguamiel produced by the maguey-pulquero (*Agave mapisaga*) throughout the harvest period. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(10), 3682–3687. <https://doi.org/10.1021/jf072767h>
- Peralta-García, I., González-Muñoz, F., Elena, R. M., Sánchez-Flores, A., & López Munguía, A. (2020). Evolution of Fructans in Aguamiel

- (Agave Sap) During the Plant Production Lifetime. *Frontiers in nutrition*, 7, 566950. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.566950>
- Payno, M. (2014). Tradiciones e historia del maguey. *Revista e-consulta.com*. Recuperado de: <http://mundonuestro.e-consulta.com/index.php/cronica/item/tradiciones-e-historia-del-maguey>
- Rascón, L., Cruz, M., Rodríguez-Jasso, R. M., Neira-Vielma, A. A., Ramírez-Barrón, S. N., & Belmares, R. (2020). Effect of Ohmic Heating on Sensory, Physicochemical, and Microbiological Properties of "Aguamiel" of *Agave salmiana*. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(12), 1834. <https://doi.org/10.3390/foods9121834>
- Ramírez-Manzano Sandra I., Robert Bye, García-Moya Edmundo & Romero-Manzanares Angélica. (2020). Aprovechamiento del maguey pulquero en Nanacamilpa, Tlaxcala, México. *Revista Etnobiología*. 18, (1), 65-76. ISSN 2448-8151 • ISSN 1665-2703
- Rojas Rivas, E., Viesca González, F. C., Espeitx Bernat, E., & Quintero Salazar, B. (2016). El maguey, el pulque y las pulquerías de Toluca, Estado de México, ¿patrimonio gastronómico turístico?. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 14(5), 1199-1215.
- Romero M. (2020 8 de junio). Pulquerías a domicilio: a falta de amores, ¡pulque señores! . *Food Travel*. Recuperado el 6 de septiembre-2021 en: <https://foodandtravel.mx/pulquerias-a-domicilio-a-falta-de-amores-pulque-senores/>
- Romero-López, M.R., Osorio-Díaz, P., Flores-Morales, A., Robledo, N., & Mora-Escobedo, R. (2015). Chemical composition, antioxidant capacity and prebiotic effect of aguamiel (*Agave atrovirens*) during in vitro fermentation. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(2), 281-292. ISSN 1665-2738.
- Roldán Cruz, E. I., Chavarria Miranda, H., & Cano de la Rosa, J. (2022). Intervenciones programáticas y bioeconomía: repensar la viabilidad del maguey. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 13(1), 167-179. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2334>
- Santos-Zea L., Leal-Díaz A. M., Cortés-Ceballos E. & Gutiérrez-Urbe J. A. (2012). Agave (*Agave spp.*) and its Traditional Products as a Source of Bioactive Compounds. *Current Bioactive Compounds*. 8(3), 1- 14. <https://doi.org/10.2174/157340712802762410>
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP-2020). Consultado en: <https://www.gob.mx/siap>
- Vega-García, M. A., Álvarez-Ríos, G. D., & Figueredo-Urbina, C. J. (2023). Sistemas de manejo de agaves pulqueros en el estado de Hidalgo. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 92-100. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9598>

- Vela, E. (2014). "El maguey". *Arqueología Mexicana*, Edición especial 57. México. Pp. 42-65.
- Vázquez Díaz, Erasmo, García Nava, J. Rodolfo, Peña Valdivia, Cecilia B., Ramírez Tobías, Hugo M., & Morales Ramos, Victorino. (2011). Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Revista fitotecnia mexicana*, 34(3), 167-173. ISSN 0187-7380.

Entrevistas

Familia del Razo Curiel, específicamente señores Rodolfo Del Razo (Padre e hijo). Encargados del área de campo y producción. Rancho San Isidro, Nanacamilpa. Tlaxcala.

Capítulo 3

El hongo Shiitake (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler), alternativa alimentaria y medicinal

Claudia López Sánchez, Marcos Pedro del Carmen Ramírez López, Felipe de Jesús Palma Cruz & José Víctor Galaviz Rodríguez

Resumen

Las propiedades terapéuticas de los hongos comestibles son una novedad que ha llamado la atención en gran medida por los metabolitos o compuestos farmacológicos y medicinales que contienen, los cuales funcionan como antioxidantes, anticancerígenos, inmunomoduladores, antiartríticos, hipoglucemiantes, cardioprotectores, antiinflamatorios, anti-osteoporóticos, antivirales, antifúngicos, y antibacterianos. En este trabajo se presenta una experiencia sobre la promoción del conocimiento generado en el Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Oaxaca, iniciando por el trabajo realizado a nivel laboratorio para la obtención de la cepa por esporada y pequeños trozos del hongo comestible con propiedades medicinales Shiitake (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler); siguiendo con las condiciones de cultivo, activación, e inoculación y producción de taquetes de madera impregnados con el tejido del hongo, llamados bio-cilindros, con los que se promovió la producción de hongos en troncos de encino en la comunidad zapoteca de San Juan Evangelista Analco en la Sierra Norte de Oaxaca, en donde se promovió una estrategia de seguridad alimentaria.

Introducción

En el mundo se cultivan comercialmente más de 15 especies de hongos comestibles a través de diferentes procesos biotecnológicos muy eficientes. En México, solo se producen de manera consistente tres especies a diferentes escalas: champiñones (*Agaricus bisporus*), setas (*Pleurotus ostreatus*), y shiitake (*Lentinula edodes*); aun cuando nuestro país tiene un enorme potencial para la producción competitiva de otras especies en función de la diversidad de sus ecosistemas y de la gran gama de condiciones edáficas y climáticas resultantes; así como por la abundancia de subproductos agrícolas y forestales que pueden utilizarse como sustrato del cultivo de especies de hongos comestibles (Okuda, 2022).

La composición química de los hongos comestibles determina su valor nutricional y sus propiedades, mismas que difieren de acuerdo con las especies, al sustrato empleado para su cultivo, a las condiciones atmosféricas, la edad y la parte de la fructificación que se ingiera (Bell *et al.*, 2022). Por lo general, los hongos comestibles contienen altos niveles de potasio y fósforo, muy bajo contenido de sodio, cantidades considerables de algunos microelementos, alto y valioso contenido de proteínas, pero bajo contenido de grasa (Vetter, 2019). La calidad biológica de las proteínas de los hongos varía de acuerdo con las diferentes especies consumidas, así como de las cepas de las que proceden, del método de cultivo utilizado para su producción, la composición del sustrato empleado para su crecimiento, la edad y el grado de desarrollo del cuerpo fructífero. La proteína presente en las células de estos hongos es uno de los componentes responsables de la alta calidad nutracéutica de dichos alimentos (Wang *et al.*, 2014).

Además de lo anterior, la importancia nutracéutica de los hongos comestibles está definida por la presencia de otros metabolitos primarios como el ácido oxálico, metabolitos secundarios como terpenos, esteroides, antraquinonas, derivados del ácido benzoico y quinolonas (Gupta *et al.*, 2018). Los hongos tienen un gran valor nutricional y presentan moléculas medicinales entre las que se encuentran polisacáridos, terpenoides, esteroides y lípidos, que participan activamente en varios trastornos humanos y modulan mecanismos implicados en la regulación del sistema inmunológico (Finimundy *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014).

Sin embargo, cabe destacar que además de las moléculas antes referidas, los polisacáridos son conocidos como los compuestos más potentes producidos por los hongos y exhiben numerosas actividades benéficas para la salud humana; entre los más conocidos se encuentran

el *lentinano* del Shiitake (*L. edodes*), pleurano del hongo seta (*Pleurotus* spp.), y *ganoderano* del hongo Reishi (*Ganoderma lucidum*). Estos y otros polisacáridos participan en la regulación del microbioma estomacal y mejoran la función gastrointestinal. Asimismo, es importante decir que la bioactividad de este tipo de moléculas se debe a su naturaleza estrictamente polisacárida o a que junto con otras biomoléculas forman conjugados como las glicoproteínas, que, de manera sinérgica, producen grandes beneficios que mejoran o mantienen el estatus de salud de quienes los consumen. La producción de hongos comestibles presenta un potencial biotecnológico prometedor que abarca multitud de campos de aplicación.

Desde la dinastía Sung (1100 d.C.) en China, Wu San Kang, una personalidad famosa, notó que el shiitake crecía en los troncos de madera muerta caídos, a partir de entonces, el cultivo de los hongos comestibles se ha considerado importante para la economía familiar, no solamente en China o Europa, sino en todas aquellas latitudes del mundo en donde se consumen hongos. Además, existe el interés para mejorar la tecnología del cultivo, que ha ganado una atención considerable en los últimos años (Ma *et al.*, 2018; Romero-Arenas *et al.*, 2018; Annepu *et al.*, 2019).

El Shiitake es el segundo hongo basidiomiceto más cultivado en el mundo, con más de 1188 millones de toneladas producidas en China durante 2020 (CEFA, 2023). La producción mundial de Shiitake representa casi el 22% de la producción total del hongo. Este tipo de hongo utiliza varias enzimas (lacasa y carboximetilcelulosa) para degradar fuentes complejas de carbono como celulosa, hemicelulosa y lignina, que son esenciales para su nutrición (De Andrade *et al.* 2013), y existe un gran número de investigaciones donde destacan los efectos inmodulares que produce el polisacárido denominado *lentinano*, este compuesto junto con otros como los β -glucanos, permiten aumentar la esperanza de vida de pacientes con cáncer y ayudan a mejorar su calidad de vida, debido a su comprobado valor nutricional y antioxidante (Zhuang *et al.*, 2017). El Shiitake es como la gran mayoría de los hongos comestibles, bajo en calorías, alto en proteínas, hierro, fibra dietética, minerales y vitaminas. Contiene vitaminas B1, B2, B6, B12 y D2, con altas cantidades de riboflavina y niacina; en resumen, es definitivamente un alimento excelente con propiedades medicinales (Rivera *et al.*, 2017). El consumo de este hongo es una buena forma de prevenir las enfermedades y de tener buena salud, se cree que puede aumentar la longevidad y que posee propiedades afrodisiacas (Ma *et al.*, 2018).

La parte comestible de *Lentinula edodes* consiste en un tallo y som-

brero (estípite y píleo, respectivamente), en una proporción aproximada de 75% y 25% del hongo en base seca respectivamente. Los análisis de la composición nutrimental muestran que las dos partes estructurales del hongo son muy diferentes en su contenido químico. El contenido de humedad de todo el hongo es de 89-92%. Aunque lo que más importa de esta composición es que cuenta con 22-23% de proteína, 64% de carbohidratos totales y 7-8 % de grasa cruda (Rivera *et al.*, 2017).

Materiales y Métodos

Aislamiento y selección del hongo

Para el aislamiento de las cepas de *Lentinula edodes* se utilizaron dos procedimientos diferentes:

Aislamiento vegetativo: la parte comestible del hongo se cortó utilizando un bisturí estéril, en cuadritos de aproximadamente 1 cm², mismos que fueron lavados en agua destilada con 1% de hipoclorito de sodio durante cinco minutos, en condiciones estériles, y se colocaron en cajas Petri de vidrio esterilizadas con calor seco (a 200°C por 1 h); como siguiente paso, se prepararon cajas Petri con medios de cultivo: agar extracto de malta, agar de papa y dextrosa y agar Sabouraud, fueron esterilizados a 15 libras de presión por espacio de 15 minutos en una autoclave posteriormente se les adicionaron 300mg/L de ampicilina para evitar contaminación por crecimiento bacteriano con la ayuda de una jeringa con filtro millipore. Enseguida, se incubaron a 26°C por un lapso de siete días, en total oscuridad, observando y midiendo su crecimiento. Una vez logrado el crecimiento en todo el agar se almacenaron en refrigeración y para mantener por mucho mayor tiempo las cepas en refrigeración, se realizaron resiembras en tubo de ensaye inclinado con los medios de cultivo utilizados previamente en las cajas de Petri (López-Sánchez *et al.*, 2019a; López-Sánchez *et al.*, 2020a).

Aislamiento mediante las esporas del hongo: para ello se cortaron círculos de papel filtro blanco previamente esterilizado con calor húmedo y secado en estufa y se colocaron en el interior de cajas de Petri de vidrio estériles; a continuación y con la ayuda de un bisturí esterilizado, se cortaron pequeños trozos de la porción comestible del Shiitake y se colocaron sobre el papel filtro con las láminas hacia abajo; después, se cubrieron con un vaso de precipitados y se sellaron para evitar ser contaminados y de esa forma se incubaron a 26°C por espacio de cinco días, hasta que fue notoria la presencia de esporas,

debido al cambio de color del papel filtro; poco después de ello, el papel filtro se cortó en cuadros pequeños de cuatro centímetros cuadrados, los cuales se colocaron en el interior de un tubo de ensayo con 5 mL con agua destilada estéril, y se hicieron diluciones seriadas, tomándose 1 mL de la dilución 1×10^{-6} , distribuyéndose en cada una de las cajas de Petri conteniendo agar extracto de malta, por duplicado, en las que se hicieron germinar y crecer. A continuación, se incubaron a 26°C durante 48 h o hasta que se logró el crecimiento del tejido del hongo en toda la superficie de la caja de Petri (López-Sánchez *et al.*, 2019b; López-Sánchez *et al.*, 2020b).

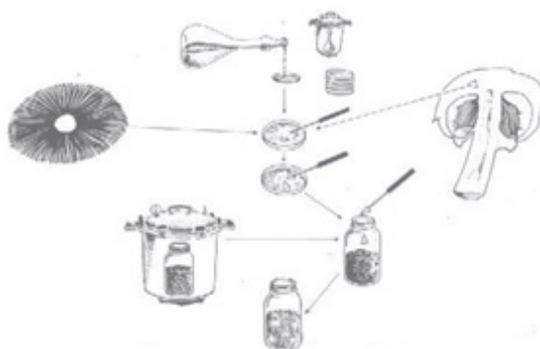


Figura 1.
Aislamiento y
selección de shiitake

Activación del tejido de Shiitake (micelio primario)

La activación de las cepas de *Lentinula edodes* se realizó en cajas Petri conteniendo 20 mL de agar de dextrosa y papa (PDA); cada caja, fue inoculada con un trozo circular de 0.8 mm de diámetro del cultivo inicial con el que se aisló el hongo; las cajas para la activación, se incubaron a 26°C y se realizó una cinética del crecimiento radial, misma que fue determinada como el diámetro alcanzado por el hongo con el paso del tiempo (cm), para lo cual se hicieron mediciones cada 24 h por espacio de 10 días.



Figura 2.
Activación del
tejido de shiitake

Como siguiente fase del proceso, el tejido de Shiitake (micelio primario) desarrollado en las cajas de Petri, fue utilizado como inóculo en semillas de trigo con cascarilla previamente remojadas y desinfectadas, mismas que se colocaron en frascos de vidrio estériles con capacidad de 500 mL. Y una vez que el tejido de Shiitake (micelio primario) cubrió en su totalidad a las semillas de trigo, se utilizaron como fuente de inoculación para lograr la siguiente fase.

Figura 3. Semillas de trigo para la activación micelial



Producción del micelio secundario en semillas de trigo

A partir del micelio primario, se prosiguió con la activación micelial de las cepas de *Lentinula edodes*, mediante su resiembra en semillas de trigo previamente desinfectadas con hipoclorito de sodio al 1% durante 5 minutos, y posteriormente llevadas a su cocción en agua en ebullición por espacio de 15 minutos. Posteriormente, el trigo fue vertido en frascos previamente esterilizados, hasta completar tres cuartas partes de su capacidad. Para finalizar el procedimiento, los frascos producidos, se incubaron a 26°C por un lapso de 120h.

Figura 4. Activación micelio secundario



Producción de bio-cilindros

Los biocilindros se produjeron a partir de tiras cilíndricas de madera de pino, para lo cual se cortaron en pequeños trozos de aproximadamente 3 cm de longitud x 1 cm de diámetro; 200g en peso húmedo de estos trozos, se remojaron en agua de la llave durante 48 h, hasta lograr una humedad del 70% o mayor, para lo cual se registraron el peso inicial y final del conjunto de cilindros. Enseguida, los cilindros de madera ya embebidos en agua se colocaron en frascos de vidrio y se esterilizaron a 15 libras de presión durante 50 minutos. Como paso siguiente y con los frascos conteniendo los cilindros ya estériles y fríos, se les adicionaron 10 a 15 gramos del micelio secundario y se incubaron a 26°C por espacio de 30 días o hasta que se observó que los cilindros estuvieron completamente colonizados por el tejido del Shiitake (micelio secundario) y es el momento en el que se les designó como bio-cilindros. Por último, los frascos con los bio-cilindros, se conservaron en refrigeración a 4 – 7 °C hasta ser utilizados para la siembra en troncos de encino (López-Sánchez et al., 2020b).

Siembra en troncos de encino (Quercus spp.)

Es importante destacar que, para realizar esta fase del procedimiento, los comuneros de Analco recibieron una capacitación previa principalmente práctica con la finalidad de que tuvieran claridad sobre el proceso realizado; para ello, se utilizó el laboratorio de una de las escuelas de la población, en donde se entrenaron paso a paso en las actividades más delicadas de la producción del micelio primario y secundario, y su inoculación en los troncos de encino; con ello se pudieron producir los hongos cultivados de buena calidad, todo ello, se fortaleció la confianza de los comuneros en su participación en estas tareas.

Para esta fase del cultivo, se utilizaron pequeños troncos de 6 a 20 cm de diámetro y 0.95-1.20 metros de largo, los cuales se obtuvieron de árboles vivos, sanos, libres de pudriciones, rectos y uniformes, que fueron cortados en el otoño y en tiempo frío o cuando el árbol comenzó a almacenar los productos de la fotosíntesis para la época seca, ya que el alto contenido de azúcar de la savia (el floema), beneficia al Shiitake y las bajas temperaturas retardan el crecimiento de hongos oportunistas. Los troncos cortados, se mantuvieron en el bosque con buena circulación de aire hasta el momento de la inoculación (de 2 a 3 semanas). Antes de la inoculación, los troncos fueron limpiados con agua corriente y un cepillo de cerdas, hasta que se eliminaron las impurezas.

Fue de suma importancia conservar intacta la corteza de los troncos, toda vez que fue ella quien permitió mantener aislada el área interna del tronco en donde se desarrolló el hongo hasta que lo colonizó en su totalidad, porque solo así se aseguró la fructificación del hongo, es decir de la producción de la porción comestible del Shiitake. Los troncos con corteza fina fueron más susceptibles a la pérdida de humedad, por lo que fue indispensable poner especial atención en su monitoreo (Chang, 1977).

Figura 5. Troncos de encino, listos para ser inoculados



Inoculación con los biocilindros

El inóculo, contenido en los biocilindros totalmente cubiertos por el tejido del hongo, se introdujo en los troncos después de 2 a 3 semanas de haber sido cortados, este período provocó que las células del árbol murieran antes de la inoculación. Para la inoculación, se hicieron perforaciones de 0.6-0.7 cm de diámetro por 3.5-4 cm de profundidad en los troncos con ayuda de un taladro, a una distancia de 10 a 20 cm distribuidas en espiral alrededor del tronco, procurando que el tamaño de las perforaciones no excediera al del biocilindro inoculante, y para lograrlo, se puso un freno al taladro que limitó la profundidad a la cual penetró; ya que el biocilindro inoculante, se colocó como si fuera un tapón. Terminada la inoculación, las perforaciones se sellaron con cera de abeja para proteger al Shiitake contenido en los biocilindros contra otros microorganismos competitivos en los orificios.

Figura 6. Perforación de los troncos de encino



Incubación de los troncos inoculados con Shiitake

Para fomentar el crecimiento del micelio a través de los troncos, estos fueron colocados en un área sombreada, en posición horizontal, formando camas y los conjuntos de 4 a 6 camas, quedaron entrecruzadas con lo cual se favorecieron la adecuada aireación y el buen drenaje y con ello se evitó la desecación o la humedad excesiva provocada por la lluvia, además se evitó la contaminación de los troncos inoculados por otros microorganismos. Cuando el contenido de humedad estuvo por debajo del 30%, los troncos inoculados, tuvieron que humedecerse por periodos de 1 a 3 días; la humedad recomendable para la adecuada incubación de los troncos es de 80% a 85%, junto con una temperatura de 15 a 28 °C y una sombra de 60% - 85%. La incubación para la producción de las partes comestibles del hongo se prolongó por un poco más de un año y durante este periodo de tiempo, los troncos se revisaron periódicamente hasta asegurar mantenerlos húmedos y el tejido del hongo (el micelio), logró su pleno desarrollo en buenas condiciones.

Figura 7. Incubación de troncos de encino



Fructificación o producción de las partes comestibles del Shiitake

El Shiitake solo fue capaz de fructificar después de que el hongo colonizó completamente el interior del tronco, lo cual sucedió después de un poco más de un año. A partir de ese periodo de tiempo, las condiciones fueron cambiadas para

favorecer la fructificación o producción de las partes comestibles del Shiitake, para lo cual se elevó la humedad relativa hasta un 85% - 90%, paralelamente los troncos se cambiaron de posición para propiciar que tuvieran suficiente aire, se expusieran a la luz sin dejar de estar bajo la sombra y para seguir incubándose a temperaturas de entre 8 y 22 °C, durante las noches y el día, respectivamente.

Para facilitar la cosecha de las partes comestibles del Shiitake propiamente dicho de los hongos, los troncos se acomodaron en filas sobre tablas en posición

vertical, cada tronco estuvo separado del otro contiguo por la anchura de otro tronco, de tal manera que el espacio entre ellos permitió el libre desarrollo de los hongos. Una vez iniciada la fructificación, es decir de la cosecha de las partes comestibles del Shiitake, ésta puede continuarse por espacio de 3 a 7 años más. Para estimular la fructificación, los troncos incubados por más de un año fueron remojados en agua fría durante 1 a 3 días.

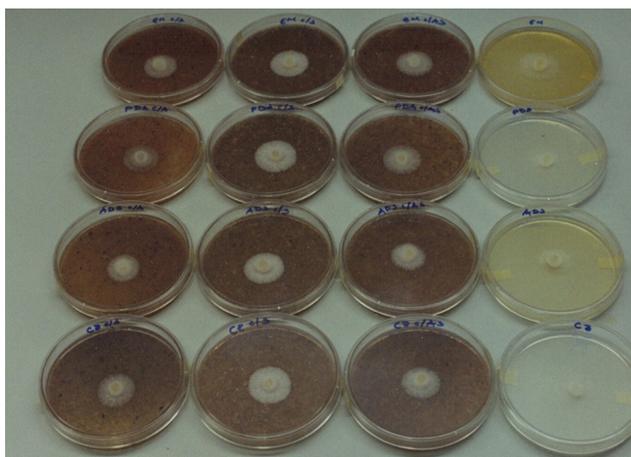
Cosecha y almacenaje de las partes comestibles del Shiitake

Los hongos producidos se cosecharon cuando el velo que cubre parcialmente la parte inferior del sombrero del hongo se hubo desprendido completamente del tallo o estípite, que además es cuando el sombrero se abre y se expande completamente, lo cual ocurrió en lapsos de 2 a 7 días. La cosecha se hizo a diario y los hongos se colocaron en canastas, teniendo el cuidado de minimizar las magulladuras, ya que esto disminuye la calidad del hongo y desde luego su costo. Para su venta, el hongo fresco se almacenó en refrigeración, utilizando charolas metálicas con ranuras para permitir la ventilación. En algunos casos, los compradores prefirieron al Shiitake deshidratado, por la facilidad de su almacenaje y por su sabor característico. La deshidratación se llevó a cabo en estantes a 30 °C inicialmente, incrementando gradualmente 1 o 2 °C por hora hasta que se alcanzaron los 50 °C y finalmente fueron calentados a 60 °C por una hora. El calentamiento final desarrolló el reconocido sabor característico del Shiitake y dio al sombrero un atractivo lustre.

Resultados

Desde los primeros procedimientos, desde el aislamiento y selección del hongo, hasta la producción de los biocilindros inoculados con el tejido (micelio) del Shiitake, se llevaron a cabo en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Oaxaca y el laboratorio comunitario de la Unión de Pueblos Zapotecos y Chinantecos de la Sierra Norte de Oaxaca (UZACHI), ubicado en La Trinidad, distrito de Ixtlán. Y el resto del trabajo, se llevó a cabo en la comunidad de San Juan Bautista Anasco, distrito de Ixtlán, con un grupo de campesinos productores, cuya finalidad consistió en la producción del Shiitake para diversificar su producción agrícola, pecuaria y forestal, la cual convencionalmente consiste en cultivar alimentos básicos en las milpas, diversas frutas, verduras y hortalizas en los huertos familiares y la crianza de animales de traspatio para la subsistencia. Respecto a la producción forestal, consiste en el manejo comunitario de especies maderables, plantas comestibles y medicinales y la recolección de hongos comestibles y medicinales silvestres.

Figura 8. Producción de shiitake en el laboratorio de la uzachi



Aislamiento y selección del hongo

Después de utilizar pequeños trozos del sombrero del Shiitake (*Lentinula edodes*), así como de sus esporas y después de realizar varias re- siembras siguiendo la estrategia experimental descrita, se obtuvieron

cultivos puros, libres de otros microorganismos, llamados axénicos, con los cuales se procedió a la activación del micelio primario.

Figura 9. Obtención de las cepas de shiitake



Activación del tejido de Shiitake (micelio primario)

La mayor proporción del micelio primario se realizó en frascos con semillas de trigo totalmente colonizadas por el Shiitake, se realizó en el laboratorio comunitario de la UZACHI, en La Trinidad, distrito de Ixtlán. Y como se dijo, fueron la materia prima básica para continuar hacia la siguiente fase del proceso.

Producción del micelio secundario en semillas de trigo

La activación micelial o del tejido de Shiitake tuvo su mejor velocidad de colonización en semillas de trigo con cascarilla y remojado con lo que se evitaron posibles contaminaciones por microorganismos oportunistas; y cuando se logró la colonización íntegra del trigo, se continuó con el siguiente paso que es la producción los biocilindros de madera.

Producción de biocilindros

La producción de los biocilindros fue la parte del proceso con el que culminó el arduo trabajo en el laboratorio, ya que estas estructuras

totalmente cubiertas por el tejido de Shiitake (micelio secundario), constituyó el material esencial para dar paso a la producción de las partes comestibles del hongo, en los troncos de encino.

Haciendo un recuento de los logros alcanzados en estas cuatro fases del proceso, encontramos que con 10 frascos de 500 mL conteniendo 30 gr del trigo inoculado con el micelio primario, se produjeron 100 frascos de 500 mL que contuvieron 300 gr de trigo cubierto por el micelio secundario; y con ellos, se produjeron 100 bolsas de plástico albergando cada una a un kilogramo de bio-cilindros totalmente cubiertos por el hongo, y que sirvieron para inocular a los troncos de encino.

Figura 10. Producción de los bio-cilindros cubiertos con shiitake



Siembra en troncos de encino (Quercus spp.) e Inoculación con los biocilindros

En el patio de la casa de uno de los comuneros de San Juan Evangelista Analco, los troncos de encino cortados fueron acomodados y se perforaron con la ayuda de un taladro y una broca de un cuarto de pulgada. Cada tronco contó con 30-35 perforaciones. Con el auxilio de pinzas de laboratorio y guantes, se tomaron uno por uno los bio-cilindros totalmente cubiertos por el hongo y se introdujeron en las perforaciones practicadas a los troncos; después de lo cual, se utilizó cera de abeja como sellador de las perforaciones llenadas por los bio-cilindros, con el fin de evitar la desecación y la infestación por microorganismos oportunistas.

En seguida, los troncos inoculados fueron trasladados a una cañada angosta al sur de la población, con un flujo permanente de agua, proporcionada por la presencia de un pequeño arroyo permanente. En dicho sitio, los troncos inoculados, fueron acomodados formando camas, hasta formar conjuntos de cuatro a diez camas de altura.

Incubación de los troncos inoculados con Shiitake

En las condiciones descritas anteriormente, los conjuntos de troncos inoculados permanecieron por espacio de 12 a 18 meses, cuidando siempre de que la humedad relativa se mantuviera por arriba del 60%. En las ocasiones en las que la humedad disminuyó, se restableció mediante riegos periódicos y también las camas de troncos fueron cubiertas con plástico.

Figura 11. Incubación de los troncos de encino inoculados en condiciones naturales”



Fructificación o producción de las partes comestibles del Shiitake

Después del periodo de incubación, y como se mencionó, los troncos fueron sometidos a un choque térmico con agua fría con el objeto de inducir la fructificación, es decir, la producción de las partes comestibles del hongo. Este fenómeno se logró inducir a principios del verano y a finales del otoño, más o menos con tres meses de diferencia; en cada suceso de fructificación, cada uno de los troncos produjo en promedio 1.5 kg, es decir 3 kg por año. Esta condición de fructificación se pudo mantener por otros cinco años más, manteniendo en todo

momento las condiciones de humedad y temperatura propias de la incubación; aunque a partir del segundo año, la producción de las partes comestibles del hongo disminuyó a 2 kg por año en promedio.

Figura 12. Producción de las partes comestibles de shiitake”



Cosecha y almacenaje de las partes comestibles del Shiitake

La cosecha de los cuerpos fructíferos, es decir de las partes comestibles del hongo, se logró utilizando una cuchilla de acero perfectamente afilada y limpia; y cada vez que se cortó un hongo, la cuchilla se volvió a limpiar para evitar cualquier problema de sanidad. Los hongos cosechados, se colocaron en canastas y rejas de plásticos para ser transportados en fresco o para refrigerarlos hasta su venta y consumo. A solicitud de uno de los clientes, los hongos cosechados se deshidrataron en estufas eléctricas diseñadas para este propósito.

Es importante mencionar que los comuneros de San Juan Bautista Analco, hasta ese momento, no habían cultivado ningún tipo de hongo comestible o medicinal; así que desde el inicio de las actividades para la producción del shiitake, mostraron alguna resistencia que se fue disipando con la capacitación, pero sobre todo con el hecho de ser ellos mismos quienes manejaron todas y cada una de las etapas de la producción de los hongos, y como sucede con los procesos que tienen grandes lapsos de tiempo sin que se observen los resultados, el periodo de incubación y desarrollo del hongo inoculado dentro de los troncos, desmotivó a un sector de los comuneros, mismos que renunciaron al proyecto, sin embargo los que continuaron, al final del proceso productivo tuvieron importantes ingresos por concepto de la venta de los shiitakes cultivados.

Conclusiones

Es importante reconocer que los procesos productivos tienen que diversificarse para fortalecer la economía de las comunidades campesinas, tomando en cuenta la vocación agro-productiva que convencionalmente se desarrolla en los pueblos. Con este trabajo, se logró incidir en la referida diversificación, utilizando parte del recurso forestal con el que cuenta la comunidad zapoteca de San Juan Bautista Analco, distrito de Ixtlán en la Sierra Norte de Oaxaca. La transferencia tecnológica fue exitosa e incluso el proceso para la producción de hongos comestibles, posteriormente se diversificó a otras especies de hongos, sobre todo por considerar que el tiempo requerido para cultivar el Shiitake, es demasiado prolongado para los esquemas productivos a los que los pueblos originarios están acostumbrados.

Bibliografía

- Annepu Sudheer Kumar, Sharma, V. P., Kumar Satish and Barh Anupam. (2019). Cultivation Techniques of Shiitake (A Medicinal Mushroom with Culinary Delight), ICAR-Directorate of Mushroom Research, Chambaghat, Solan- 173213 (HP), Technical Bulletin. 71 p.
- Bell, V., Silva, C. R. P. G., Guina, J., and Fernandes, T. H. (2022). Mushrooms as future generation healthy foods. *Frontiers in Nutrition*, 9:1050099. doi: 10.3389/fnut.2022.1050099
- CEFA (2023) Carta de la Asociación de Hongos Comestibles de China sobre la realización de la encuesta estadística de la producción nacional de hongos comestibles y el valor de la producción en 2023. Consultada el 07 de agosto de 2024 <http://www.cefa.org.cn>
- Chang, S. (1977). The origin and early development of straw mushroom cultivation. *Economic Botany*, 31(3): 374-376.
- Finimundy, T. C., Dillon, A. J. P., Henriques, J. A. P. and Ely, M. R. (2014). A Review on General Nutritional Compounds and Pharmacological Properties of the *Lentinula edodes* Mushroom. *Food and Nutrition Sciences*, 5, 1095-1105. <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2014.512119>
- Gupta, S., Summuna, B., Gupta, M. and Annepu, S. K. (2018). Edible Mushrooms: Cultivation, Bioactive Molecules. *Bioactive Molecules in Food. Reference Series in Phytochemistry*, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 1-34. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-78030-6_86.
- López Sánchez, C., Reyes, R.E. y Palma Cruz, F. J. (2019a). Bagazo de

- Agave angustifolia* y totomoxtle, como suplemento forrajero enriquecido con *Pleurotus ostreatus*. Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca. No. Especial "Agave-Mezcal". 30-36.
- López Sánchez, C., Reyes, R. y Palma Cruz, F. J. (2019b). Cultivo, aislamiento, caracterización y preservación micelial de *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler en medio enriquecido. Journal Coloquio de Investigación Multidisciplinaria CIM. 7 (1): 1397-1402.
- López Sánchez C., Juárez E., León Enríquez B. L., Reyes E., y Palma Cruz, F. J. (2020a). Establecimiento de dos sistemas de producción de *Ganoderma lucidum* P. Karst. con fines medicinales. Revista del Centro de Graduados e Investigación. Instituto Tecnológico de Mérida. 35 (83): 102-106.
- López Sánchez, C., Reyes, E., y Palma Cruz, F. J. (2020b). Biocilindros de Shiitake para siembra en tronco de encino a nivel comunitario en Oaxaca. Revista del centro de graduados e investigación. Instituto Tecnológico de Mérida. 35 (81): 6-9.
- Ma, G., Yang, W., Zhao, L., Pei, F., Fang, D., and Hua, Q. (2018). A critical review on the health promoting effects of mushrooms nutraceuticals, Food Science and Human Wellness, 7: 125–133.
- Okuda, Y. (2022). Sustainability perspectives for future continuity of mushroom production: The bright and dark sides, Frontiers in Sustainable Food Systems, 6:1026508. doi: 10.3389/fsu-fs.2022.1026508
- Rivera, O.A., Albarracín, W., Lares, M. (2017). Componentes Bioactivos del Shiitake (*Lentinula edodes* Berk. Pegler) y su impacto en la salud. Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica. 36 (3): 67-71.
- Vetter, J. (2019). Biological values of cultivated mushrooms – a review, Acta Alimentaria, 48 (2): 229–240. DOI: 10.1556 / 066.2019.48.2.11.
- Wang, X. M., Zhang, J., Wu, L. H., Zhao, Y. L., Li, T., Li, J. Q., Wang, Y. Z. and Liu, H. G. (2014). A minireview of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China, Food Chemistry, 151: 279-285. DOI: 10.1016 / j. foodchem.2013.11.062.
- Zhuang, H., Chen, Z., Feng, T., Yang, Y., Zhang, J., Liu, G., Li, Z., Ye, R. (2017). Characterization of *Lentinus edodes* b-glucan influencing the in vitro starch digestibility of wheat starch gel, Food Chemistry, 224: 294–301. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.12.087.

Capítulo 4

Modelo de transferencia al sector acuícola pesquero: producto ostión

Isabel Araceli Amaro Espejo, María del Refugio Castañeda Chávez, Fabiola Lango Reynoso, Paula Zúñiga Ruíz & Rosa Elena Zamudio Alemán

Resumen

El sector acuícola y pesquero aporta productos con alto valor nutricional, principalmente de tipo proteico. Se requiere contar con productos elaborados bajo las normas de calidad e inocuidad necesarias para su comercialización que permita fortalecer los beneficios sociales y económicos en el sector para el aprovechamiento de sus recursos. El objetivo del presente trabajo consistió en aportar un modelo de transferencia de tecnología al sector pesquero y acuícola para obtener procesos de conservación de productos a partir del recurso ostión y así impulsar su producción, calidad y valor económico. Se diseñó un modelo de conservera para cooperativas en el municipio de Pueblo Viejo, Veracruz. Se diseñó y adaptó un área destinada para implementar una planta conservera de ostión, donde se destinaron áreas necesarias para el flujo correcto de las etapas de conservación. Posteriormente se desarrollaron y estandarizaron tres procesos de conservación 1) ostión cocido en salmuera, 2) ostión sabor a humo y 3) *dip* de ostión, a los cuales se le realizaron análisis bromatológicos y microbiológicos. Se desarrolló el proceso y se identificaron los riesgos físicos, químicos y biológicos y puntos críticos de control para garantizar la inocuidad de los productos finales. Se realizó una encuesta a 100 per-

sonas para identificar preferencias del consumo de ostión y posibles clientes potenciales. Después de esto, para realizar la transferencia tecnológica se impartió un curso-taller dirigida a los socios con apoyo de material didáctico. Se puede concluir que la implementación de este modelo de transferencia demuestra la factibilidad de la elaboración de conserveras para dar valor agregado a los recursos del sector acuícola y pesqueros, y el interés de los productores para desarrollar esta estrategia de transformación y comercialización para aumentar el valor económico de los recursos acuícolas y pesqueros.

Introducción

En México, los retos en el sector agroalimentario son considerables, en el desarrollo agropecuario y pesquero es fundamental que cumpla con las más estrictas normas de calidad e inocuidad que estipula la normatividad nacional mexicana. Aplicar técnicas de calidad e inocuidad en los procesos de producción, distribución y comercialización, es indispensable en la cadena de valor. Las actividades de capacitación y asistencia técnica oportuna fortalecen a productores para mejorar el aprovechamiento de los recursos y su capacidad socioeconómica (Plan Nacional de Desarrollo, 2018).

Actualmente existen alternativas de transformación para la comercialización de los recursos acuícolas y pesqueros, en su mayoría se desarrollan como resultado de los procesos industriales sistemáticos, bajo un esquema que asegura su calidad, valor comercial y su distribución en cadenas nacionales e internacionales en países como Canadá, Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea. El alto valor comercial de los productos acuícolas y pesqueros se debe a su contenido de proteínas, vitaminas, minerales y ácidos grasos insaturados, que aportan beneficios para la salud. No obstante, son alimentos altamente perecederos que requiere una adecuada transformación para mantener su calidad y seguridad (Cortés-Sánchez et al., 2024). Los métodos de transformación como enlatados en salmuera, ahumados, secos salados, liofilizados y fresco-congelados garantizan la calidad e inocuidad al consumidor. Todas estas presentaciones para su elaboración requieren equipos especializados, que involucran el diseño de procesos industriales definidos, con inversiones importantes en infraestructura y personal capacitado (CONAPESCA-SAGARPA, 2018).

Las inversiones financieras públicas y privadas, en México, reflejan una disminución en los procesos de transformación para la comercialización de los recursos acuícolas y pesqueros. Se justifica

entre algunas causas, los cambios en la demanda del mercado por el consumo de estos recursos, y la sobreexplotación de ellos. Ante la necesidad que tienen las cooperativas pesqueras y el sector acuícola de incrementar la producción de alimentos, se requiere apoyar a estas cooperativas para fortalecer el desarrollo de procesos tecnológicos de conservación, que cumplan con las normas de calidad e inocuidad para su comercialización en los diferentes centros de consumo. El lograr un mejor aprovechamiento de los recursos acuícolas y pesqueros para obtener beneficios económicos que fortalezcan a las cooperativas y productores acuícolas debe dirigirse hacia procesos de mayor tecnología y de certificación de calidad. Actualmente no existe, un paquete tecnológico que impacte la cadena de comercialización de los principales productos que actualmente se producen en el Golfo de México.

La carencia de apoyo al sector se observa en el escaso desarrollo de tecnologías que incrementen el valor agregado a través de procesos eficientes con el propósito de lograr una cadena comercial competitiva e introducir y comercializar productos de calidad en el mercado de consumo (Beltrán, 2017). Una estrategia es la instalación de conserveras modelo para productos acuícolas y pesqueros; que se ubiquen en las zonas de extracción y producción para innovar y generar alternativas tecnológicas en la transformación de los recursos. Además, inducir el trabajo participativo, la capacitación y apoyos financieros para lograr una calidad e inocuidad que fortalezca la cadena de valor e impulse beneficios económicos para las familias que integran las cooperativas. Así, el sector productivo acuícola y pesquero funja como el actor principal, mientras que el profesional actúe como facilitador y certificador del proceso para la conservación de los recursos. Lo que dará como resultado la generación de empleos directos e indirectos a través de generar oportunidades de autoempleo para mejorar la calidad de vida de las unidades familiares comprometidas con la transformación, y aprovechamiento eficiente de los recursos pesqueros y acuícolas. En estas conserveras se implementan procesos de conservación de los productos acuícolas y pesqueros, seleccionados con un interés del mercado local, que mediante un diagnóstico se conocen la percepción y preferencias de los consumidores potenciales que determina la oferta y demanda de los productos (Figueroa et al., 2022).

Una consecuencia del crecimiento activo en la generación de alimentos, se observa en la producción acuícola que ha crecido en los últimos 50 años, y ahora representa más del 50% del suministro mundial. El ostión se destaca entre los cultivos de mayor demanda

en todo el mundo y su producción ha aumentado rápidamente en las últimas décadas (Botta et al., 2020). La especie *Crassostrea virginica* es un organismo nativo de las costas del Atlántico de Canadá, Golfo de México, América Central y el Caribe y que se comercializa principalmente en México (Betanzos-Vega et al., 2016). El 90% de la producción nacional de ostión americano se genera principalmente en lagunas costeras del Golfo de México, es capturado en los estados de Veracruz, Tabasco, Tamaulipas y Campeche (Mayorga et al., 2021). En el área del Pacífico proviene principalmente de las granjas de cultivo que representan la mayor parte de la producción ostrícola en México y aportan cerca del 50% anual (Hernández-Mendoza et al., 2021). El consumo nacional aparente de ostión fue de 20,286.77 ton y un consumo per cápita de 0.16 kg (CONAPESCA, 2021). De acuerdo con su comercialización, el 96.20 % es destinado para consumo humano directo y 1.13 % para indirecto, mientras que el 2.60 % es para uso industrial (SADR, 2021).

La transferencia de tecnología al sector agroalimentario en las zonas rurales es indispensable para la conservación y aprovechamiento sostenible de sus recursos. Aunado a lo anterior, la aplicación de las buenas prácticas de manufactura en la elaboración de nuevos productos puede garantizar la inocuidad de los alimentos y seguridad para los consumidores. El objetivo del presente trabajo fue aportar un modelo de transferencia de la tecnología al sector acuícola y pesquero para la elaboración y proceso de conservación de productos alimenticios a partir del recurso ostión, impulsar su producción, calidad y valor económico.

Materiales y Métodos

El presente estudio se desarrolló en el municipio de Pueblo Viejo, ubicado en la zona norte del Estado de Veracruz. Las coordenadas 22°11" latitud norte y 97°50" longitud oeste, a una altura de 10 msnm. Limita al norte con Tampico, Tamaulipas y Pánuco, al este con el Golfo de México; al sur con Tampico Alto; al oeste con Pánuco.

Diseño de la planta conservera

El modelo de conservera se desarrolló para la Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera Única Regional de ostricultores de este municipio. La cooperativa está conformada por 361 pescadores ostioneros agrupados en 4 cooperativas y cuentan con permiso de pesca en

la laguna. La cooperativa cuenta con un área de 60.3 m² y se ubica a 50 m de la Laguna de Pueblo Viejo. Para el diseño de la conservera, se analizó la distribución de los espacios de acuerdo a las dimensiones de la edificación y se consideraron las áreas necesarias para realizar los procesos de transformación y la transferencia tecnológica, se incluyó el área de recepción de materia prima que es donde ingresa principalmente el recurso pesquero y se ubica en dirección al lado de la laguna. Se destinó un área donde se desarrollarán los procesos de conservación, es decir, donde se hace la preparación de los productos. Así mismo, se destinó un área de almacenamiento de la materia prima, y una sección del producto terminado. Esta área se habilitó el sistema eléctrico e hidráulico. De igual manera, se consideró un área de vestidores y sanitarios de acuerdo con las normas de higiene y sanidad de establecimientos y con relación a la seguridad e higiene de instalación con la NOM-093-SSA1-1994 y la NOM-001-STPS-1993.

Desarrollo de los procesos de conservación

El desarrolló la implementación de tres procesos de conservación los cuales son 1) ostión cocido en salmuera, 2) ostión sabor a humo y 3) dip de ostión, estos procesos desarrollados diseñados son prácticos y alternativos para incrementar su valor comercial. Estos procesos y su conservación fueron estandarizados con relación a las formulaciones y/o concentraciones de los condimentos, tiempos y temperaturas del proceso de cocción y esterilización, así como el tipo de empaque y conservación. Se diseñó la etiqueta para cada producto de acuerdo con la NOM-051-SCFI/SSA1-2010. Los procesos se basaron en el cumplimiento del manejo higiénico de los alimentos como se establece en la NOM-251-SSA1-2009.

Los productos terminados se analizaron al laboratorio de investigación de recursos acuáticos (LIRA) del ITBOCA en donde se realizaron pruebas bromatológicas por el método oficial, Methods of Analysis of AOAC Internacional que incluyen: determinación de proteínas (A.O.A.C. 920.103-1920), determinación de grasa mediante extracción por Soxhlet (A.O.A.C. 923.2002), determinación de fibra dietética (A.O.A.C. 2001.03-2004) y determinación de carbohidratos (A.O.A.C. 906.03-1906). También se realizaron los análisis microbiológicos de mesófilos aerobios (NOM-092-SSA1-1994), Coliformes totales y fecales (NOM-210-SSA1-2014), Salmonella sp (NOM-114-SSA1-1994) y Vibrio cholerae (NOM-031-SSA1-1994).

Identificación de riesgos y puntos críticos

Para el presente proyecto se identificaron los riesgos físicos, químicos y biológicos asociados a cada proceso, esto de acuerdo al Sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP) referida en la NOM-251-SSA1-2009 (Figueroa et al., 2022).

La implementación de un sistema HACCP, genera un conjunto de información por cada una de las etapas de los procesos, a través de la identificación de los riesgos físicos, químicos y biológicos de los alimentos y de las materias primas con las que se elaboran. La metodología del presente siguió algunos de los principios del sistema HACCP de acuerdo al Codex Alimentarius (Bou et al., 2004). La metodología consistió en realizar el diagrama de flujo del proceso de cada uno de los productos, además de fueron describiendo detalladamente las etapas de los procesos, que incluía desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del producto final. Posteriormente se fueron identificando los riesgos físicos, químicos y biológicos en cada uno de las etapas del proceso. Para la identificación de los riesgos se utilizaron las regulaciones de normas oficiales mexicanas o aquellas que asocian los límites de peligros físicos, químicos y biológicos y se definieron las acciones preventivas y correctivas que puedan realizarse en caso de una desviación.

Posteriormente se identificaron los puntos críticos de control (PCC) de acuerdo al árbol de decisión actualizado del Codex Alimentarios con la finalidad de establecer las medidas preventivas y los límites críticos. Estos se basaron en parámetros cuantificables para asegurar la eficiencia de los procesos para reducir el riesgo al consumidor.

Cursos y talleres de capacitación

La transferencia tecnológica se realizó directamente a los productores, esposas e hijos en edad productiva. Los mecanismos de transferencia fueron cursos y talleres de capacitación participativa para cada proceso, de acuerdo con las diferentes actividades necesarias en la conservera, desde la extracción del recurso, recepción en la planta conservera y hasta lograr un producto terminado por los productores. Los cursos elaborados a los productores consistieron en una plática de los procesos y el uso de las buenas prácticas y posteriormente se desarrollaba la capacitación técnica, donde se explicaba y se iban desarrollando los procesos. Estos se fueron impartieron durante 2 semanas donde hubo participación de productores y familia de estos.

Para una mejor comprensión de los cursos se diseñaron manuales de apoyo e infografías, donde se describieron detalladamente cada uno de los procesos de conservación, y se incluyó el manejo higiénico de los alimentos.

Análisis de mercado

Se realizó un estudio de mercado para obtener información en cuanto a la oferta y la demanda del producto ostión, encaminada a evaluar la percepción de los consumidores potenciales (Figueroa et al., 2022). De acuerdo a lo anterior, se estimó el volumen de comercialización a nivel local, mediante la obtención de datos a través de encuestas aplicadas a 100 personas del municipio de Pueblo Viejo, Ver. Para obtener estos datos, se realizaron entrevistas completamente aleatorias al tamaño de muestra representativo de la zona, a personas económicamente activas y que consuman este molusco bivalvo. Para determinar el tamaño de la muestra, se utilizó una muestra probabilística de acuerdo con Galván (2006). Se identificó la frecuencia del consumo de este recurso, así como las preferencias del consumo del ostión. Asimismo, se preguntó a los entrevistados si existía un interés en el consumo de los productos desarrollados.

Resultados y Discusiones

La conservera fue ubicada cercana a la Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera Única Regional de ostricultores del municipio de Pueblo Viejo. Se realizó el acondicionamiento de las áreas de proceso como se especifican en la NOM-242-SSA1-2009. La distribución de las áreas de la conservera se presenta en la Figura 1. Se habilitó el suministro de agua potable, sistema hidráulico y suministro de gas, acondicionado a las áreas destinadas de recepción de materia prima, donde se reciben los ostiones de las cooperativas. Un área de producción donde se realizarán los procesos de conservación, el área de almacenamiento de la materia prima en lo referente a condimentos y empaques. El área de producto terminado, cercano a la sección donde se realiza la venta al menudeo. Se consideró un área para sanitarios y vestidores de los trabajadores. Se realizó la adquisición de los insumos, materiales y equipos necesarios para los procesos que incluyen refrigeradores, congeladores, mobiliario, utensilios, entre otros.

Figura 1. Distribución interior de las áreas de la planta conservera de ostión.



El cultivo de moluscos es una actividad de importancia económica y social a nivel mundial, y es una alternativa para empresas pesqueras y cooperativas regionales que mediante métodos de cultivo potencializan la sostenibilidad del recurso con beneficios a la población de las zonas costeras con el fin de obtener una capacidad de resiliencia social y economía (Rojas-Viguera, 2021; Betanzos-Vega et al. 2022). El valor agregado tiene la finalidad de incrementar el valor comercial de la materia prima a través su transformación, ofreciendo al consumidor alternativas de productos inocuos de precios accesibles y con ingredientes naturales que proporcionan características nutritivas y funcionales (Guerra y García, 2022). En ese sentido, se desarrollaron tres productos de conservación, y se basaron en la demanda del recurso y preferencias del consumidor, como es 1) ostión cocido en salmuera, 2) ostión sabor a humo y 3) dip de ostión.

La FAO (2006) ha reportado que el ostión se comercializa a nivel mundial, el 59% fresco refrigerado sin concha y el 41% congelado; donde las preferencias del consumidor muestran un interés por los productos frescos refrigerados que los adquieren directamente de los pescadores o de restaurantes de la región. No obstante, los procesos seleccionados, se aplicaron procesos térmicos para la conservación con el fin de la eliminación de bacterias patógenas. Esto se debe a que los ostiones, son organismos que por sus características fisiológicas en el medio acuático pueden bioacumular por filtración diversas bacterias presentes en el agua (López-Hernández et al., 2022). Existen muchos reportes de enfermedades gastrointestinales graves y agudas causadas por el consumo de ostiones, principalmente debido a que se consume preferentemente crudo en su concha, o cuando no se

conserva correctamente en temperatura de refrigeración o congelación (Jiang et al., 2018). Los moluscos están asociados a riesgos para la salud cuando consumen crudos o ligeramente cocidos, en este caso, la familia Enterobacteriaceae como los coliformes y *Salmonella* puede estar presentes en la fauna marina, especialmente en los ostiones y los mejillones se asocian con brotes mundiales de salmonelosis (De Abreu et al., 2007; Silva et al., 2020). Con este propósito se determinó la aplicación del proceso térmico para la eliminación de cualquier microorganismo patógeno presente, por lo que se establecieron los tiempos y temperaturas estandarizadas como se refieren en la NOM-242-SSA1-2011, que indica que los productos de la pesca donde el centro térmico debe ser de 82-93°C con adición de 5% de cloruro de sodio.

De los procesos desarrollados dos de ellos son productos que mostraron ser competitivos para el mercado local y regional, el ostión con sabor a humo y dip de ostión. Los anterior se basó en que estos productos con valor agregado, no se comercializan comúnmente y al presentar una propuesta diferente a los consumidores se pueden obtener ventajas competitivas y preferencias que aumenten la venta de estos productos. El ostión es uno de los muchos recursos pesqueros y acuícolas que mejor se comercializan, donde se aplican procesos con valor agregado que les permita competir y destacar en el mercado. Las principales presentaciones son fresco, ahumado, salsa de ostión, envasados al alto vacío, entre otros (Malpica, 2018). La Global New Products Database reportó que en el mercado internacional los ostiones se comercializan principalmente como productos ahumados, en galletas, ensaladas, sopas y salsas de ostión y se distribuyen principalmente en México, EUA, Tailandia, Singapur, China y Japón (PMNO, 2008).

En la Tabla 1, se presenta la descripción detallada de los productos estandarizados, donde se especifica la materia prima utilizada, el empaque, embalaje y el método de conservación; en este mismo se presentan los resultados microbiológicos de mesófilos aerobios, coliformes fecales, *Salmonella* y *Vibrio cholerae* 01 de acuerdo con la NOM-242-SSA1-2009. Los resultados bromatológicos de cada uno de los productos elaborados fueron presentados en las etiquetas para cada producto (figura 2). Se desarrolló el diagrama de flujo de cada proceso, que cumple y especifica las concentraciones, tiempos y temperaturas de cada etapa de producción hasta su almacenamiento, y comercialización de acuerdo como se establece en la NMX-FF-001-SCFI-2011 (figura 3).

Tabla 1. Descripción de la composición de los productos desarrollados de los tres procesos de conservación de ostión, tipo de empaque y sus resultados microbiológicos

Producto	Descripción del producto	Contenido	Tipo de Empaque
Ostión Sabor a humo	Especie: <i>Crassostrea virginica</i> Ostión cocido y con sabor a humo, al 10%, utilizando aceite vegetal como líquido de cobertura. Consumo directo o en preparaciones Sin adición de conservadores Conservación a temperatura ambiente Especificaciones: Después de abierto el envase se deberá conservar en refrigeración a 5°C. Producto con <10 UFC/g de mesófilos aerobios y coliformes fecales, con ausencia en 25g de Salmonella y ausencia en 50 g de <i>Vibrio cholerae</i> 01.	-Ostiones -Sal -Sabor a humo líquido -Aceite vegetal	Frascos de vidrio de 100 g Embalaje en cajas de cartón para 12 pzas.
Ostión cocido y conservado en salmuera	Especie: <i>Crassostrea virginica</i> Ostión cocido con hierbas aromáticas y presentado salmuera al 20% como líquido de cobertura. Consumo directo o en preparaciones Sin adición de conservadores Conservación a temperatura ambiente Especificaciones: Después de abierto el envase se deberá conservar en refrigeración a 5°C. Producto con <10 UFC/g de mesófilos aerobios y coliformes fecales, con ausencia en 25g de Salmonella y ausencia en 50 g de <i>Vibrio cholerae</i> 01.	-Ostiones -Agua -Sal -Laurel -Orégano -Cebolla -Ajo	Frascos de vidrio de 100 g Embalaje en cajas de cartón para 12 pzas.

<p>Dip de ostión</p>	<p>Especie: <i>Crassostrea virginica</i> Producto untable elaborado con ostión cocido con hierbas aromáticas y mezclado con queso crema y chile chipotle. Consumo directo Sin adición de conservadores Conservación a temperatura de refrigeración a 5°C. Producto con <10 UFC/g de mesófilos aerobios y coliformes fecales, con ausencia en 25g de Salmonella y ausencia en 50 g de <i>Vibrio cholerae</i> 01.</p>	<p>-Ostiones -Agua -Sal -Laurel -Orégano -Cebolla -Ajo -Queso crema -Chile chipotle</p>	<p>Frascos de polietileno de 150 g Embalaje en cajas de cartón para 12 pzas.</p>
----------------------	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

Se identificaron los riesgos físicos, químicos y biológicos en cada etapa del proceso para cada producto con la finalidad de garantizar la inocuidad y la calidad de los alimentos. De cada etapa, en los procesos de ostión con sabor a humo y ostión cocido y conservado en salmuera, la etapa que mostró un punto crítico de control fue la esterilización, y en el proceso de dip de ostión la etapa identificada fue la cocción (Tabla 2). Con la identificación de los puntos críticos de control y los riesgos asociados se establecieron los límites críticos; este límite se basó en lo establecido por la normatividad mexicana. Asimismo, se presentaron las acciones preventivas y correctivas en caso de la ocurrencia de una desviación del cumplimiento en la etapa del proceso. Cabe destacar que, los programas de prerrequisitos son necesarios para reducir la probabilidad de ocurrencia de los peligros que se basan en la capacitación al personal sobre las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), y en la aplicación correcta de los Procesos Operativos Estandarizados de Saneamiento (POES), primordiales para reducir los riesgos durante la producción (Jaramillo et al., 2020). En este sentido, se cumplieron las condiciones de operación como son higiene y sanitización de los materiales y equipos de trabajo, así como la higiene del área operativa; se dio capacitación en las buenas prácticas de higiene y con el uso correcto de equipo de protección como fueron mandiles, gorro, cubrebocas, todo esto permitió reducir riesgos de contaminación.

La identificación de los riesgos asociados a los productos alimentarios debe cumplirse en todos los niveles de producción desde los sistemas de producción primaria, secundaria hasta el consumidor, esto dará como resultado un alimento inocuo y seguro, para los consumidores y resolver una necesidad social (Montesdeoca et al., 2020). Los riesgos significativos para los procesos de ostión con sabor a humo y ostiones cocidos y conservados en salmuera se observaron en la etapa de esterilización que deben cumplir con el tiempo y la temperatura para eliminar los posibles microorganismos presentes (Ngaje et al., 2021), indicaron que cerca de 36 mil personas son hospitalizadas anualmente en EUA a causa de brotes por patógenos en los alimentos y 5 mil personas mueren aproximadamente; además de esto, un brote podría costarle a la industria alimentaria cientos de millones de dólares. Es por eso que, las desviaciones de los parámetros establecidos en los procesos de esterilización, es decir, cuando no se cumple el tiempo y temperatura establecidos para la conservación, llevan a la posible supervivencia de las bacterias patógenas lo que tiene como consecuencia problemas en salud pública (Mureşan et al., 2020).

Por su parte, Kamboj et al. (2020), mencionaron que, para reducir el riesgo de la presencia de patógenos durante el proceso de conservación, es necesario la aplicación estricta de las normas de limpieza y desinfección que pueden causar contaminación cruzada, cuando se mezclan alimentos crudos y cocidos.

Figura 2. Presentación de productos elaborados: ostión cocido en salmuera, dip de ostión y ostiones sabor a humo, donde se presentan los resultados bromatológicos





Figura 3. Diagrama de flujo de los procesos de conservación ostión sabor a humo, dip de ostión y ostión cocido y conservado en salmuera

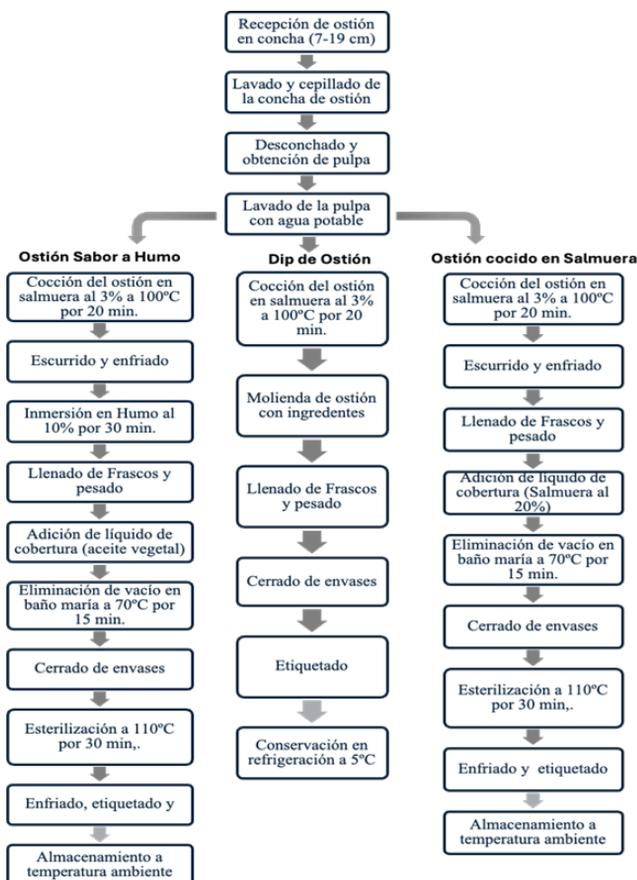


Tabla 2. Identificación de los riesgos físicos, químicos y biológicos y puntos críticos de control (PCC) de las etapas identificadas para cada uno de los procesos elaborados.

Ostión con sabor a humo y ostión cocido y conservado en salmuera			
Etapa del proceso	Riesgos / Límite crítico	Acciones Preventivas	Acciones Correctivas
Esterilización	<p>Riesgos Físicos Temperatura: 100°C/30 min Ruptura de frascos</p> <p>Riesgos Químicos - na</p> <p>Riesgos Biológicos <i>Vibrio cholerae</i> O:1: Ausentes en 50 g Coliformes fecales: < 10 UFC/ g <i>Salmonella spp</i>: Ausente en 25 g <i>Listeria monocytogenes</i>: Ausente en 25 g Enterotoxinas: Negativo <i>Clostridium botulinum</i>: Ausente</p>	<p>Cumplir con el tiempo y temperatura de proceso para eliminación de microorganismos patógenos.</p> <p>Revisar si el termómetro alcanza la temperatura</p>	<p>Controlar la temperatura del proceso de cocción, así como el cumplimiento del tiempo.</p>

Dip de ostión			
Cocción	<p>Riesgos Físicos Temperatura: 100°C/20 min</p> <p>Riesgos Químicos na</p> <p>Riesgos Biológicos <i>Vibrio cholerae</i> O1: Ausentes en 50 g Coliformes fecales: < 10 UFC/ g <i>Salmonella spp</i>: Ausente en 25 g <i>Listeria monocytogenes</i>: Ausente en 25 g Enterotoxinas: Negativo <i>Clostridium botulinum</i>: Ausente</p>	<p>Cumplir con el tiempo y temperatura de proceso para eliminación de microorganismos patógenos.</p> <p>Revisar si el termómetro alcanza la temperatura</p>	<p>Controlar la temperatura del proceso de cocción, así como el cumplimiento del tiempo.</p>

Fuente: elaboración propia.

La capacitación tuvo la participación de cada socio de la cooperativa y se integraron algunos familiares; esta se realizó en las instalaciones de la conservera durante 2 semanas (Figura 4). Este inició con la plática de las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), y su importancia para la reducción de riesgos a los consumidores. Posteriormente se realizó la capacitación mediante un curso-taller demostrativo con participación de los asistentes, el cual se realizó por cada proceso. El material didáctico elaborado (manuales e infografías) se otorgó a los participantes, el cual fue explicado con detalle y permitió una mayor comprensión de los procesos, y de las formulaciones. Pérez et al. (2020), mencionaron que la etapa de asimilación de tecnologías debe ser adaptada para los territorios, utilizando el potencial del conocimiento para su transferencia y los recursos disponibles para el desarrollo de productos de alto valor agregado. Se observó que los participantes tuvieron un cambio en la percepción en el manejo higiénico de los alimentos procesados, así como adquirieron el conocimiento y las habilidades en el desarrollo de los procesos de conservación, ya que fueron aplicando la tecnología en cada una de las etapas. Esto demostró que la participación comunitaria es parte esencial en la transferencia tecnológica.

Figura 4. Etapa de capacitación para la transferencia tecnológica



Los resultados de las encuestas realizadas a 100 personas aleatorias, indicaron la frecuencia del consumo del ostión, se observó que el 35% de los entrevistados consume más de una vez por semana, el 55% consume dos veces por semana y el 10% más de 3 veces por semana (Figura 5). Las preferencias de consumo de ostión indicaron que las personas prefieren 35% el ostión preparado o guisado, 24% en cóctel, 6% en botana y 35% fresco en su concha (Figura 6). De igual manera, se preguntó a los posibles consumidores si existía un interés por cada uno de los productos desarrollados y se observó que existe un alto interés por el consumo de ostión sabor a humo (95%), *dip* de ostión (95%) y ostiones cocidos en salmuera (80%) (Figura 7). Esto permitió descubrir un nicho de mercado potencial para la comercialización de los productos a nivel local, ya que los posibles consumidores expresaron su interés en la compra de los tres productos.

Figura 5. Frecuencia del consumo de ostión

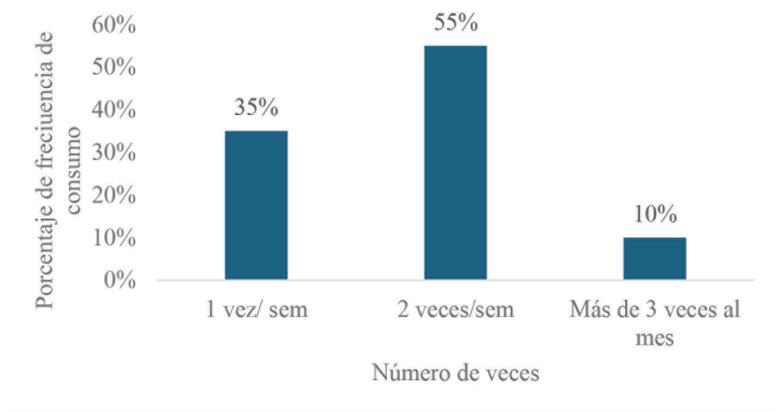


Figura 6. Preferencia del consumo de ostión

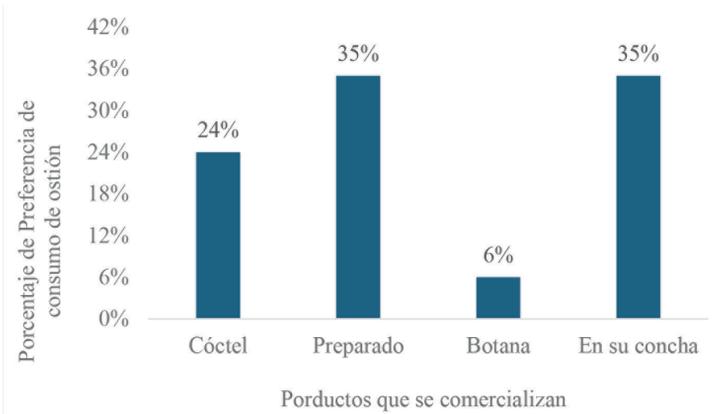
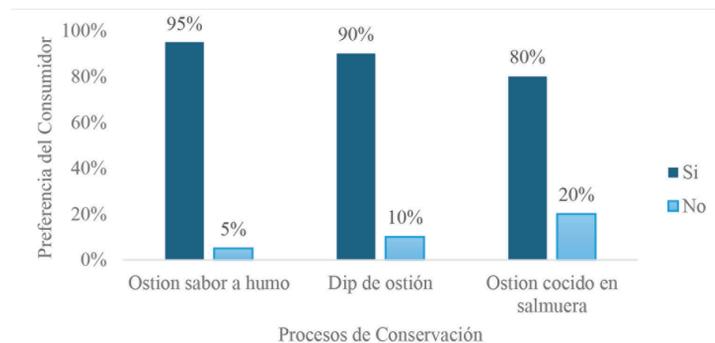


Figura 7. Preferencia del consumidor potencial en relación a cada producto



Conclusiones

El diseño e implementación de una planta conservera de ostión es una alternativa para otorgar oportunidad a las sociedades cooperativas para la conservación de los recursos y para incrementar el valor agregado de estos, mediante la elaboración de procesos de conservación. Se desarrollaron tres procesos de conservación prácticos a partir del recurso pesquero ostión 1) ostión cocido en salmuera, 2) ostión sabor a humo y 3) *dip* de ostión elaborados para aumentar su vida de anaquel y valor comercial. El análisis de mercado mostró un alto interés de consumidores potenciales de los tres productos seleccionados, por lo que su comercialización puede iniciar en el mercado local.

La transferencia de tecnología al sector productivo se realizó con el fin de contribuir a mejorar la calidad de vida de los socios de las cooperativas del municipio de Pueblo Viejo, Veracruz y con beneficios para la región, mostró un interés de estos en aprender y aplicar los conocimientos adquiridos.

Se hace énfasis en que los procesos desarrollados son prácticos, se incluye todo el paquete tecnológico, de bajo costo, aptos para grupos de pescadores o particulares de baja escala, aplicables en cualquier sistema. Los beneficios pueden ser extensivos a todos los productores de ostión del litoral del Golfo de México, en el cual existen 65 Sociedades cooperativas que cuentan con permiso, con más de 8000 socios. Es necesario consolidar un centro de capacitación permanente, sobre las diferentes áreas que integran la actividad ostrícola, incluyendo aspectos administrativos, de producción, transformación y comercialización. En México, es un importante reto para en el sector agroalimentario.

Bibliografía

- Ávila, M. V., & Azpeitia, L. G. (2021). Estandarización y mejoras en la producción artesanal de jamoncillo de leche en implementación de HACCP. *Avances de Investigación en Inocuidad de Alimentos*, 4, 6-6.
- Beltrán Meza , M. C., (2017). Innovación en el sector acuícola. *Ra Ximhai*, 13(3),351-364.[fecha de Consulta 29 de Abril de 2024]. ISSN: 1665-0441. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46154070020>
- Betanzos-Vega, A., Lodeiros, C., Espinosa-Sáez, J. y Mazón-Suástegui, J.M. 2016. Identificación del ostión americano *Crassostrea virginica* (Mollusca: Bivalvia: Ostreidae) como recurso natural en las

- Antillas Mayores: Cuba. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 87(4): 1342-1347. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/1176/1/PUB-ARTICULO-3490.PDF>
- Betanzos-Vega A, Tripp-Quezada A, Macías-Aguilera E, Leyva-Segura A, Arencibia-Carballo G, Mazón-Suástegui JM (2022) Valorando bienes y servicios ambientales (BSA) del manglar en la ostricultura artesanal: Las Tunas, Cuba. *Ecosis- temas y Recursos Agropecuarios* 9(1): e2829. DOI: 10.19136/era.a9n1.2829
- Botta R, Asche F, Borsum JS, Camp E (2020). A review of global oyster aquaculture production and consumption. *Marine Policy* 117: 103952.
- Bou Rached, L., Ascanio, N., & Hernández, P. (2004). Diseño de un plan de análisis de peligros y puntos críticos de control (HACCP) para el aseguramiento de la inocuidad de la mortadela elaborada por una empresa de productos cárnicos. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 54(1), 72-80.
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca. [Consultado 24 abril 2024]. Disponible en: <http://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. Dirección General de Planeación, Programación y Evaluación. [Consultado 24 abril 2024]. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_PESCA03_02&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*
- Cortés-Sánchez, Alejandro De Jesús, Mayra Diaz-Ramírez, Erika Torres-Ochoa, Luis Daniel Espinosa-Chaurand, Adolfo Armando Rayas-Amor, Rosy G. Cruz-Monterrosa, José Eleazar Aguilar-Toalá, and Ma. de la Paz Salgado-Cruz. (2024). Processing, Quality and Elemental Safety of Fish” *Applied Sciences* 14, no. 7: 2903. <https://doi.org/10.3390/app14072903>
- De Abreu Corrêa, A., Albarnaz, J. D., Moresco, V., Poli, C. R., Teixeira, A. L., Simões, C. M. O., & Barardi, C. R. M. (2007). Depuration dynamics of oysters (*Crassostrea gigas*) artificially contaminated by *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *Marine environmental research*, 63(5), 479-489.
- Figueroa, M., G. L., Paladines, M.J. P., Paladines M. J. N., & Pin, G., L. J. (2022). Factibilidad de aplicación de minería de procesos para el análisis de procesos del Sistema HACCP. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 15(3), 13-29.

- Galván, J., Romero, M., Rodríguez, E. M., Durand, A., Colmenares, E., & Saldivar, G. (2006). La importancia del apoyo social para el bienestar físico y mental de las mujeres reclusas. *Salud mental*, 29(3), 68-74.
- Guerra, T., I. E. & García, J. I. (2022). Diseño de un plan de marketing estratégico para el emprendimiento de productos alimenticios con valor agregado. *Revista Imaginario Social*, 5(1).
- Hernández-Mendoza, D.M., San Martín-del Ángel, P., Jiménez-Torres, C. y Hernández-Herrera, R.I. 2021. Monitoreo de *Vibrio* spp. en ostiones *Crassostrea virginica* de las lagunas de Tamiahua y Tampamachoco, Veracruz, México. *Biológico Agropecuaria Tuxpan*. 9(1): 122-141. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v9i1.346>
- Jaramillo Recalde, M. A., Ramos Paucar, L. D. P., & Oyaque Mora, S. M. (2020). Design of an evaluation system based on HACCP standards aimed at strengthening the Ecuadorian food industry-miller sector. *Universidad Ciencia Y Tecnología*, 24(103), 51-56. <https://doi.org/10.47460/uct.v24i103.357>
- Jiang, F., Bi, R., Deng, L., Kang, H., Gu, B. y Ma, P. 2018. Virulence-associated genes and molecular characteristics of non-O1/ non-O139 *Vibrio cholerae* isolated from hepatitis B cirrhosis patients in China. *International Journal of Infectious Diseases*. 74: 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2018.06.021>
- Kamboj, S., Gupta, N., Bandral, J. D., Gandotra, G., & Anjum, N. (2020). Food safety and hygiene: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(2), 358-368. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2f.8794>
- López Jiménez, L.N., Maldonado Romo, A., Álvarez-González, C.A., Peña Marín, E.S., Fernández-Montes de Oca, A., 2020. Participación comunitaria en la transferencia tecnológica de un sistema acuícola de peces nativos. *JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático*, 2(1): 31-46. doi 10.26359/52462.032
- Malpica, J. (2018). La captura y acuicultura de ostión, crece a un gran ritmo en Mexico donde es pesquería fundamental. *Mexico ambiental*. Consultado el 16/12/2019 a las 15:44 hrs de: <https://www.mexicoambiental.com/la-captura-y-acuicultura-de-ostion-crece-a-un-gran-ritmo-en-mexico-donde-es-pesqueria-fundamental>.
- Mayorga, C.J.C., Brito-Manzano, N.P., Vargas-Falcón, P.M. y Perera, G.M.A. 2021. Aspectos de la dinámica poblacional del ostión del ostión *Crassostrea virginica* en tres lagunas costeras de Tabasco, México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*. 4(4): 6003-6011. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-093>

- Montesdeoca, P. R. R., Piloso, C. K. J., Macías, A., E. F., & Demera, L., F. M. (2020). Evaluación del sistema HACCP en el proceso de elaboración del queso fresco pasteurizado. *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal*, 4(3), 18-30.
- Mouwens, J. & Prieto, M. (1998) Aplicación del sistema ARICPC-HACCP a la industria cárnica application of HACCP system to meat industry aplicación do sistema ARICPC-HACCP na industria cárnica, *CYTA - Journal of Food*, 2:1, 42-46, DOI: 10.1080/11358129809487582
- NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados-Información comercial y sanitaria.
- NOM-251-SSA1-2009, prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios
- NOM-093-SSA1-1994 Prácticas de Higiene y Sanidad en la preparación de alimentos que se ofrecen en establecimientos fijos.
- NOM-001-STPS-1993 Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los edificios, locales, instalaciones y áreas de los centros de trabajo.
- NMX-FF-001-SCFI-2011 Productos de la pesca - ostión en concha vivo, y pulpa envasada - refrigerada (Litoral Atlántico) – Especificaciones. [Consultado 23 abril 2024]. Disponible en: <http://www.economia.gob.mx/>
- NOM-242-SSA1-2009, productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba. [Consultado 23 abril 2024]. Disponible en: <http://portal.salud.gob.mx>
- Palma, D. J. 2008. Estructura de la población comercial del ostión americano *Crassostrea virginica* (1791) en la laguna el Ostión Coatzacoalcos, Veracruz, durante un periodo intensivo de Abril a Agosto del 2008. Tesis de Licenciatura (Biología), Facultad de Biología, UV, México. 46 p.
- Pérez Navarro, O., González Suárez, E., Ley Chong, N., & Concepción Toledo, D. N. (2020). El desarrollo de procesos y la asimilación de tecnologías en el perfeccionamiento de la industria agroalimentaria., *Universidad y Sociedad*. 12(3), 364-369. <https://rus.ucf.edu/cu/index.php/rus/article/view/1892>
- Plan Maestro Nacional de Ostión de Baja California. 2008. Programa maestro sistema producto ostión, Baja California. https://cadenas-productivas.conapesca.gob.mx/pdf_documentos/comites/csp/Programa_Maestro_Estatal_Ostion_BC.pdf
- Rojas-Viguera, D. (2021). Procedimiento de comunicación para el po-

sicionamiento del producto ostión de la Empresa Pesquera Holguín como oferta gastronómica innovadora en el desarrollo local y prospectivo del turismo. *Revista Transdisciplinaria de Estudios Sociales y Tecnológicos*, 1(2), 20-25.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ostras y ostiones, fuente de vitaminas y minerales que está disponible para su consumo la mayor parte del año. [Consultado 16 agosto 2022] 2021. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/>

Silva, O. L. L., Veríssimo, S. M. M., da Rosa, A. M. B. P., Iguchi, Y. B., de Lima, E. D. S. C., de Moraes, C. M., ... & da Rocha, R. M. (2020). Effect of environmental factors on microbiological quality of oyster farming in Amazon estuaries. *Aquaculture Reports*, 18, 100437.

Zamudio Chimal, B. F., García Rodríguez, J. F., & Armenta Ramírez, A. B. (2021). Agroindustria alimentaria ostrícola para el fortalecimiento del desarrollo local del municipio de Paraíso, Tabasco, México.

Capítulo 5

Experiencia de vinculación Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco-Tecnológico de Celaya-CEH

Aurea Bernardino Nicanor, Edgar Iván Roldán Cruz & Leopoldo González Cruz

Resumen

Una de las principales problemáticas del sector agroalimentario en el país es la dispersión de áreas de cultivo dado por el modelo de propiedad privada o parcelario. Esta característica de distribución de las áreas de cultivo, además de la vocación productiva de las regiones, la variedad de climas y el tipo de riego, hacen necesario la búsqueda de mecanismos para incrementar el valor agregado los productos del sector primario, por lo que en el presente proyecto realizado en el invernadero que se encuentra ubicado en San Mateo Tlajomulco, en el municipio de Zempoala, Estado de Hidalgo. Nos enfocamos en la atención de una de las principales problemáticas que presentan actualmente la mayoría de las comunidades rurales del país, que es la generación de Redes de producción de alto valor agregado, lo cual no se ha logrado solventar, debido a que no se incorpora a los miembros de las regiones en la identificación de las problemáticas. Por lo anterior, en el presente proyecto, uno de los pilares fue la continua comunicación entre el grupo de productores de chinicuil (miembros de la comunidad de San Mateo Tlajomulco), el sector académico (Investigadores del TecNM/ IT de Celaya y del Colegio del Estado de Hidalgo) y el sector productivo (Sociedad de Producción Rural AGROINNOVA), quienes de manera coordinada trabajaron para detectar los problemas que enfrentan los productores de chinicuil, se evaluó la situación actual de la comunidad respecto a la colecta del insecto y se plantearon los retos y alternativas de atención, para que el grupo de emprende-

dores puedan a mediano plazo, desarrollar procesos que generen valor agregado al chinicuil por medio de la elaboración de un condimento tipo gourmet, así como su conservación por medio de secado y con ello generar un polo de desarrollo en la región productora del gusano rojo.

Introducción

El consumo de insectos conocido como “entomofagia”, es una práctica que en la actualidad está tomando auge a nivel mundial debido a su alto contenido de proteínas, así como sus propiedades nutraceuticas que se han reportado en diferentes especies de insectos; a la vez, se considera una alternativa para contribuir a la seguridad alimentaria, al tiempo de disminuir las emisiones de CO₂ al generar menos desechos derivado de su proceso metabólico. Además de disminuir la deforestación, ya que se ha reportado que muchas regiones han sido deforestadas con la finalidad de utilizar las tierras para la crianza de ganado al no encontrar un beneficio económico de los hospederos del chinicuil. A nivel mundial, los insectos del orden Coleoptera (a la que pertenecen los escarabajos) son los que se consumen en mayor medida, ya que 659 especies se consideran adecuadas para el consumo humano, en segundo lugar se encuentran los insectos del orden Lepidoptera (de la que forman parte las orugas) de la cual se consumen 362 especies, seguidos de los organismos del orden Hymenoptera (donde se encuentran las hormigas, abejas y avispas) de la cual se consumen 321 especies y finalmente las especies del orden Orthoptera (a la que pertenece el saltamontes) con 278 especies para consumo humano (Durán-Galdo y Saavedra-García, 2021).

De manera específica en nuestro país, muchos de los insectos forman parte de la tradición alimentaria, ya que desde tiempos ancestrales han representado una fuente adicional de proteínas, grasas y minerales (principalmente hierro, zinc, magnesio, fósforo, selenio y zinc) (López et al., 2011; Rostro et al., 2012; Vera 2022; Collantes et al., 2024). En este sentido, en la región central de México, uno de los insectos que llaman la atención de manera particular es el chinicuil o gusano rojo del maguey (*Comadia redtenbacheri* Hamm), el cual, es utilizado para consumo directo o acompañado de algún otro platillo, asimismo, representa una fuente de ingresos para los productores de maguey y es considerado un símbolo del mezcal embotellado, (Hernández-Livera et al., 2005; Briones-Santoyo et al., 2022; Montes et al., 2023).

Sin embargo, para su consumo, es de suma importancia que se en-

cuentre en un estado larvario óptimo, parámetro que aún no está bien definido, por lo que, algunos investigadores han dirigido sus trabajos al estudio de las diferentes fases de la larva, reportando que pueden ser diferenciadas considerando las dimensiones de su cápsula cefálica, diferenciando 7 fases o estados larvarios, con dimensiones de 437 μ m para la primera fase llegando hasta los 3450 μ m para la séptima y última fase (Hernández-Livera et al., 2005). Por otra parte, de acuerdo con lo reportado por Jiménez-Vásquez et al., (2022), dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad relativa, será el número de larvas en estado adulto. Las condiciones de desarrollo que se reportan adecuadas para su consumo son: temperatura de 17.8°C y una humedad relativa de 47.1%, condiciones bajo las cuales se reportó una mayor proporción de especímenes adultos, con una proporción de 1:14 de hembras: machos en la producción.

Actualmente, algunos estudios han demostrado que la fase larvaria no solo influye en las características fenotípicas del chinicuil, sino que influye en su composición química. En este contexto se ha reportado que la composición del chinicuil se encuentra relacionado directamente con la dieta del mismo, por lo que el contenido de humedad puede variar de 52% hasta 61% dependiendo su procedencia (Escamilla, 2019). Por otra parte, se ha reportado que los componentes mayoritarios en el chinicuil son; lípidos (entre 18 y 24.3%) y proteínas (entre 9.79 y 16.3%), cuyos valores varían de acuerdo a la mezcla de fases larvarias analizadas en cada caso, así como por el tipo de Maguey, ubicación y época en la que se extraen (Escamilla-Rosales et al., 2021). Sin embargo, cuando se habla de proteína, no solo la concentración es relevante sino también su digestibilidad y en el caso de la proteína del chinicuil, se ha reportado que su digestibilidad puede ser de hasta el 83.5%, lo que da un indicio de la buena calidad de su proteína (Ocampo et al., 2024).

Dentro de los factores externos que pueden afectar el desarrollo de los chinicuiles, se encuentra su posible contaminación con *Penicillium* sp, *Mucor* sp. y *Rhizopus* sp., lo cual, puede generar disminución de la población, por la interacción tipo parasitismo que estos microorganismos generan en la cutícula del gusano, disminuyendo la población del mismo. Este es un problema que actualmente está siendo analizado para lograr evitar la contaminación y mantener la población del chinicuil (Delgado et al., 2022).

Asimismo, otro de los parámetros de importancia para el desarrollo del chinicuil es su hospedero, el cual principalmente es el *Agave appianata* y en algunos casos el *Agave salmiana*, de los primeros, sus poblaciones actualmente están siendo amenazadas y se encuentran en

peligro de extinción, debido a que no se realizan prácticas adecuadas de resiembra durante la recolección del chinicuil, mientras que en el caso de *A. salmiana*, su sobre explotación, ya sea para el uso de las pencas para la elaboración de barbacoa, obtención de la cutícula o mixiote o bien por la recolección del chinicuil, provocando en los últimos años la disminución del hospedero, lo que ha traído como consecuencia la disminución de la población de chinicuil, de acuerdo a lo indicado por Montes et al., (2023).

Aunado a todo ello, con el proyecto se pretende contribuir a los objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, específicamente a los objetivos (6, 8, 12, 13 y 15).

En el caso del objetivo 6 (agua limpia y saneamiento), la crianza del chinicuil podría contribuir a disminuir la cantidad de agua requerida para la obtención de proteína de origen animal. El objetivo 8, se refiere al “trabajo decente y crecimiento económico”, en este sentido, el impulso al consumo del chinicuil contribuirá a generar una fuente de ingresos para las “Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco”, dándoles la posibilidad de contar con su producto durante todo el año y no solo por temporadas, así mismo, una vez que se obtenga el producto se pretende replicar su elaboración y comercialización en otras zonas productoras de chinicuil del país, para ofrecer a más productores un modelo de negocios adecuado, esto mismo, va ligado al objetivo 12, que se refiere a la “producción y consumo responsable”, ya que al obtener un producto, permitirá un adecuado control de su producción y consumo, difundiendo sus beneficios y su consumo, de manera responsable, de tal manera que se fomentará el cultivo y cuidado de los hospederos (magueyes), logrando a su vez su protección, lo cual aporta al objetivo 15 que se refiere a la “vida de ecosistemas terrestres”. Finalmente, en el todo lo anterior, de alguna manera contribuye al objetivo 13 “acción por el clima”, ya que la crianza del chinicuil al igual que la de todos los insectos, provoca un menor impacto sobre el medio ambiente al generar un efecto insignificante en la huella de carbono, ya que requiere menor cantidad de agua, espacio y alimento en comparación con la cría de ganado tradicional, así mismo, se disminuye la contaminación del agua, emisión de CO₂, favorece el cuidado y mantenimiento de una de las especies importantes de nuestro ecosistema como lo es el Maguey (Vera 2022).

Con base en lo indicado anteriormente, se consideró relevante determinar la posibilidad de generar chinicuiles, bajo condiciones controladas, debido a que además de tener una mayor certeza de fases de desarrollo en las que se encuentran al momento de su recolección, se evitaría la

contaminación de los mismos por hongos al tiempo de que se puede mantener la población de los mismos, evitando la pérdida de la especie, así como de sus hospederos (Magueyes). Toda esta problemática fue la base para el desarrollo del proyecto que se indica en el presente capítulo, el cual, fue financiado por el CONACYT y desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/IT de Celaya, con apoyo técnico de la Sociedad de Producción Rural AGROINNOVA, las muestras fueron obtenidas de San Mateo Tlajomulco con apoyo de las Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco.

Antecedentes

Durante el año 2020, se generó el primer acercamiento entre los investigadores del Tecnológico Nacional de México/IT de Celaya y la Sociedad de Producción Rural AGROINNOVA, esta última colaboraba con una asociación de mujeres denominada “Las Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco”, quienes se dedican a la colecta y producción de chinicuil; en ese tiempo, el grupo de mujeres se encontraba buscando una forma de incrementar el valor agregado de su producto. A partir del primer acercamiento, se inició la obtención de datos sobre la forma de recolectar y producir el chinicuil, métodos de almacenamiento, así como mecanismos de comercialización. Con lo cual, las Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco en coordinación con AGROINNOVA, desarrollaron el proyecto de investigación, titulado *Validación de las condiciones favorables para el desarrollo de la planta piloto para la reproducción intensiva de gusano rojo de maguey en dos variedades de agave*, el cual fue apoyado por el Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Hidalgo, a través de la Fundación México Estados Unidos para la Ciencia y bajo la estrategia “Modelo para el fortalecimiento, desarrollo e Innovación Tecnológica- Empresarial del Estado de Hidalgo” en el año 2020. Con los recursos obtenidos, se estableció una unidad de producción de chinicuil bajo condiciones controladas y áreas de cultivo de *Agave applanata*. Más tarde, en el año 2021, los participantes en el proyecto del chinicuil, sometimos una propuesta ante CONACYT en la convocatoria “Elaboración de Protocolos de Investigación e Incidencia en Materia de Soberanía Alimentaria 2021”, titulada “Evaluación de los cambios en la composición nutrimental del chinicuil por efecto de un manejo controlado y diferentes procesos de secado” con número de Folio 316261, el cual nos fue autorizado para el desarrollo del protocolo. Para este proyecto, se adhirió al grupo un investigador del Colegio del Estado de Hidalgo (CEH), con la finalidad de trabajar en el contexto social del proyecto.

En la propuesta del protocolo, se establecieron las premisas que permitirían generar las Redes de producción de alto valor agregado, tratando de evitar la pérdida de las características nutrimentales, nutracéuticas, y sobre todo las sensoriales del chinicuil, así como asegurar su comercialización y consumo durante todo el año. En una primera etapa del desarrollo del protocolo, se consideró la caracterización y establecimiento de las diferencias existentes entre los chinicuiles obtenidos a partir del maguey silvestre y los chinicuiles obtenidos a partir del maguey desarrollado bajo condiciones controladas, así mismo, se consideró realizar pruebas para la obtención de un condimento gourmet a partir del chinicuil, con la finalidad de que se pueda distribuir inicialmente en los restaurantes del Estado de Hidalgo, para después cubrir todo el país e incluso exportarlo.

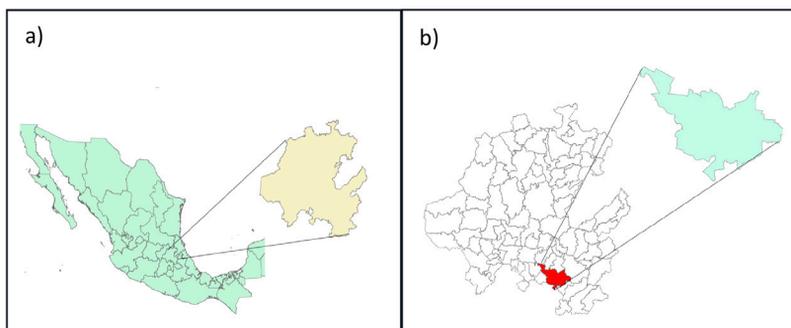
En esta primera etapa, también se consideró realizar un documento con los estudios de preservación, transformación y divulgación de los beneficios del maguey (hospedero del chinicuil), con base en los saberes con los que cuentan la Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco, quienes se dedican a adquirir conocimientos y tecnología para el aprovechamiento sostenible del maguey, así como en la reforestación de áreas comunes y alrededores de la localidad, y junto con la Sociedad de Producción Rural AGROINNOVA, encabezan los esfuerzos para la producción de chinicuil bajo condiciones controladas.

La segunda etapa fue participar en la convocatoria “Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia para la Soberanía Alimentaria” emitida por el CONACYT, con el proyecto titulado “Estrategias para incrementar el valor agregado del chinicuil, como mecanismo de desarrollo en una región productora, bajo condiciones controladas”, con un número de solicitud 321284, el cual fue el resultado de la primera etapa. Es importante mencionar, que aun cuando no fue elegido el proyecto para acceder al apoyo económico por CONACYT, se continúa hasta el momento trabajando con el grupo de las Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco, con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados inicialmente en el proyecto, para lo cual, actualmente se están realizando las evaluaciones necesarias para determinar los cambios que se generan en las características físicas, nutrimentales y sensoriales del chinicuil, por efecto de los tiempos de almacenamiento, así como el desarrollo de la tecnología necesaria para incrementar la vida de anaquel del chinicuil, preservando su valor nutrimental y gastronómico y ofrecer a las Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco una alternativa viable para el aprovechamiento del chinicuil que obtienen de sus invernaderos.

Metodología

El invernadero donde los productores tienen la plantación de maguey para la producción controlada de los chinicuiles, se encuentra ubicado en San Mateo Tlajomulco, en el municipio de Zempoala, el cual está considerado como un Pueblo Mágico y se encuentra ubicado al centro del Estado de Hidalgo formando parte de la Zona Metropolitana de Pachuca. Las coordenadas geográficas que delimitan el territorio del municipio de Zempoala son; latitud Norte 20° 12' 30", latitud Sur 19° 48' 30", longitud Este 98° 31' 30", y longitud Oeste 98° 51' 00" (figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica de a) Zempoala y b) San Mateo Tlajomulco.



Se identificó la problemática de la producción del chinicuil, la cual es una especie que se produce únicamente durante los meses de junio a septiembre, lo que lleva a que los pobladores de San Mateo Tlajomulco comercialicen el chinicuil fresco solo en esa temporada, lo fríen o lo congelan, para su comercialización en el resto del año, generando cambios físicos que disminuyen su valor de comercialización. Problemáticas que fueron detectadas por medio de reuniones de trabajo que los investigadores realizaron con los productores de chinicuil, de las cuales se derivaron las acciones a realizar.

De manera paralela se realizaron encuestas en restaurantes de los municipios que comercializan el chinicuil como platillo de temporada, para determinar la forma de presentación más común, el precio de comercialización y las alternativas para tener disponibilidad del producto por un mayor tiempo.

En coordinación con la empresa AGROINNOVA Centro Impulsor de Negocios SPR de RL., se realizó el monitoreo de las zonas de producción del chinicuil, para lo cual, se capacitó a los productores de chinicuil, con el propósito de que comprendieran la forma de realizar y registrar las observaciones y el monitoreo en las zonas de producción, lo mismo se realizó para el área de producción bajo condiciones controladas registrando, la cantidad de chinicuiles por planta, etapa de crecimiento en la que se encontraba, color, olor, peso y sabor (Figura 2).

Figura 2: Registro de las características y cantidad de los chinicuiles obtenidos en; a) Bajo condiciones silvestres



Figura 2: Registro de las características y cantidad de los chinicuiles obtenidos en; b) y c) Bajo condiciones controladas (invernadero)



Para incrementar el valor agregado del chinicuil se evaluaron dos procesos de secado (liofilización y convección forzada), con la finalidad de determinar, el método que alterara en menor proporción las características fisicoquímicas, nutraceuticas y sensoriales del chinicuil, con la finalidad de ofrecer un producto no perecedero y accesible en cualquier época del año. Actualmente, con los datos obtenidos, se inició con el desarrollo de una formulación para la elaboración de un condimento a partir de la pasta del chinicuil seco (utilizando la pasta del chinicuil fresco como control), se realizó la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas, nutrimentales, nutraceuticas y sensoriales y se seleccionará la formulación más adecuada para su preservación por un tiempo superior a 12 meses, realizando pruebas con dos empaques diferentes.

Resultados y discusión

De acuerdo con las reuniones de trabajo que se llevaron a cabo con el grupo productor de chinicuil y derivado de las encuestas realizadas, se detectaron básicamente 3 problemáticas a las que se enfrentan los pobladores de San Mateo Tlajomulco, las cuales en términos generales son las siguientes:

1. No cuentan con un proceso que permita conservar el producto por un periodo de al menos un año.
2. Carecen de un referente de calidad que les permita establecer estándares de precio, para ofrecer a los propietarios de restaurantes.
3. Existe una competencia desigual con personas que comercializan chinicuil de manera ilegal.

La primera problemática, fue detectada después de las reuniones que se llevaron a cabo con los productores de chinicuil del grupo Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco, en estas reuniones, los productores plantearon que han realizado algunos experimentos para tratar de preservar el producto, los cuales han incluido el secado y el envasado al vacío, sin embargo, al no contar con la experiencia técnica y el equipamiento adecuado, los resultados no han sido favorables, obteniendo un producto con características sensoriales alteradas, con respecto a los chinicuales frescos, por lo que fue necesario establecer algún proceso de conservación viable a realizarse en la zona de producción. Es importante

destacar que, de manera inicial, lo que se buscaba era mantener el olor y color característico del chinicuil, sin embargo, también se consideró relevante determinar los cambios que podrían estar ocurriendo desde el punto de vista químico y nutracéutico.

De los procesos de secado evaluados se determinó que la liofilización fue el método que mantiene tanto las características nutrimentales y nutracéuticas como el olor del chinicuil en mayor proporción, sin embargo, se obtiene una pasta más homogénea cuando el chinicuil es secado en un secador de convección forzada. Asimismo, existe mayor pérdida de las grasas en este caso, lo cual, podría ser un factor determinante en el sabor y olor del producto final. Es por ello, que se realizó una primera formulación del condimento, para lo cual se utilizó la pasta del chinicuil secado por convección, combinación de algunas especias y se realizó un primer empaque en una bolsa con cierre hermético. Las pruebas preliminares han mostrado que es viable la elaboración de un condimento tipo gourmet a partir del chinicuil, con una vida de anaquel de al menos 12 meses. Actualmente, se están realizando las pruebas para la generación del condimento considerando el tipo de empaque, y que cumpla con las normativas de nuestro país, así como de la FDA, pensando que a largo plazo podría ser exportado al extranjero.

Para abordar la segunda y tercera problemáticas, se realizaron encuestas a los dueños de los restaurantes que comercializan platillos de chinicuil, solo 50 de ellos aceptaron contestar la encuesta, debido a que la extracción y comercialización del chinicuil no está regulada y en algunos casos, una gran parte de los proveedores, que les proporcionan el chinicuil lo obtienen de magueyes que no son de su propiedad y puede ser considerada como comercialización ilegal, por lo que no cuentan con los datos de los proveedores.

Por otra parte, se encontró que el 75% de los restaurantes que contienen en su menú platillos con chinicuil, lo adquieren con proveedores que lo comercializan en presentación de litro, mientras que en el 25% de los dueños de restaurantes, lo adquieren en presentaciones de kilogramo, lo cual no les permite determinar el número total de gusanos que están adquiriendo, sin embargo, el 50% de los platillos que se ofrecen en los distintos restaurantes colocan en cada plato una docena de chinicuiles, mientras que en el otro 50% de los platillos, la cantidad servida son 100 g. Recordemos que en el caso de los chinicuiles silvestres (desarrollados en campo abierto), no se cuenta con una homogeneidad en el producto, por lo que en ocasiones para el comensal es mejor solicitar los 100g que los 12 chinicuiles s o bien a la inversa,

ya que 12 chinicuiles podrían contener chinicuiles de dimensiones muy pequeñas, o bien los 100g podrían representar menos de 12 chinicuiles cuando éstos son muy grandes.

La cantidad de chinicuil adquirido por temporada por la mayoría de los propietarios de los restaurantes (50%) está en el intervalo de 2 a 3 litros o kilogramos, mientras que un 25% adquiere entre 8 y 10 litros o kilogramos y el 25% restante sólo adquieren entre 1 y 2 litros o kilogramos. Lo anterior se deriva de que al ser un producto tradicional de temporada, la totalidad de los propietarios de los restaurantes adquieren el chinicuil vivo, por lo que dependiendo del nivel de tecnología de conservación con el que cuente el restaurante, será el tiempo de comercialización de platillos con chinicuil, así sólo el 25% de los restaurantes ofrecen todo el año estos platillos, mientras que el 75% restante, solo lo ofrecen entre 1 y 4 meses al año (junio-septiembre), es decir, cuando se encuentra fresco (Figura 2a, 2b).

Por otra parte, se observó que los principales mecanismos de conservación del chinicuil en los restaurantes son mediante un proceso de congelación (50%), o bien por medio de su transformación en salsa (50%), sin embargo, estos procesos logran tiempos de conservación relativamente cortos, por esta razón, el 25% de los propietarios de los restaurantes indicaron que solo logran conservar el producto por 8 días, mientras que el 50% de ellos logra conservar el chinicuil entre 2 y 3 meses y solo un 25% ha logrado hacer eficiente su proceso de conservación, alcanzando hasta un año.

Además de la temporalidad, en la comercialización del chinicuil, otro de los problemas que enfrentan los propietarios de los restaurantes durante la adquisición del chinicuil, es la baja disponibilidad del producto que un solo proveedor puede ofrecerles, por esta razón se identificó que en 75% de los restaurantes, no se cuenta con un proveedor específico y pueden ser entre 2 (50%) y 3 (25%) proveedores por temporada y sólo el 25% de los restaurantes tienen un proveedor fijo, esto deriva en que el 75% de los propietarios de los restaurantes que ofrecen platillos de chinicuil, desconocen su procedencia.

Los resultados de las encuestas, también permitieron identificar que existe una competencia desleal al momento de comercializar el chinicuil, ya que algunos de los proveedores recurren a prácticas ilegales de obtención del producto, lo que en la actualidad ha traído como consecuencia la disminución de la población tanto del Maguey como del chinicuil, debido a que al realizar la extracción ilegal, los colectores, solo “levantan” el maguey e sin el cuidado que requiere para

evitar dañar la raíz, por lo que el maguey no puede volver a sembrarse, generando una pérdida constante de ambos; tanto del maguey (hábitat del chinicuil) como del chinicuil.

Respecto al precio de comercialización, la totalidad de las personas entrevistadas, indicaron que es un producto caro, pero rentable, ya que en promedio un platillo de chinicuil en el cual se emplea una docena de gusanos, tiene un precio que oscila entre los \$150.00 y \$250.00 pesos mexicanos. Asimismo, el chinicuil se comercializa por vaso, litro o kilogramo (Figura 2c).

Figura 3. Comercialización del chinicuil a) Como parte del menú en uno de los restaurantes que lo ofrece, b) Chinicuil frito, una de las formas como se ofrece en restaurantes c) Forma de venta por kg, litro o vaso.



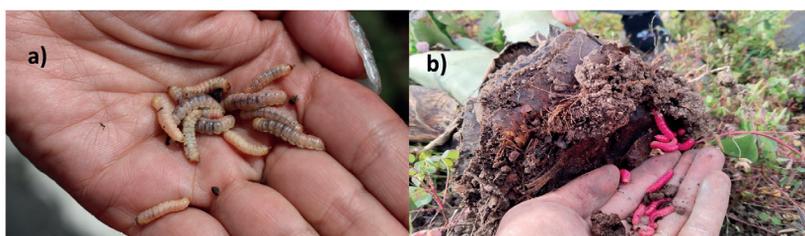
Con todo lo anteriormente mencionado, se pudo llegar a la conclusión de que la comercialización del chinicuil tiene un alto potencial económico, por lo que puede servir como un mecanismo de desarrollo de las poblaciones rurales, en el caso específico de las “Triunfadoras

de San Mateo Tlajomulco”, se espera que los resultados del proyecto les permita acceder a una mejor situación económica al tiempo de contribuir en el cuidado del medio ambiente y de las tradiciones culinarias e nuestro país.

1. Los resultados obtenidos, permitieron detectar las principales problemáticas que enfrentan en los restaurantes que comercializan platillos de chinicuil, los cuales son;
2. Falta de uniformidad en el tamaño del gusano que adquieren los propietarios de los restaurantes.
3. No contar con procesos adecuados para conservar el chinicuil por periodos prolongados de tiempo.
4. No poder ofrecer platillos con chinicuil durante todo el año.
5. No poder ofrecer a sus comensales productos alimenticios a partir del chinicuil, con características sensoriales estandarizadas

Por todo ello, se consideró que una alternativa viable sería el desarrollo del chinicuil bajo condiciones controladas (invernadero), esto permitiría dar solución a las problemáticas establecidas con anterioridad. En el invernadero (Figura 3), se observó que los chinicuiles obtenidos eran en su mayoría de mayores dimensiones (aproximadamente el 60%), mientras que los recolectados de los magueyes silvestres presentaron mayor heterogeneidad en el tamaño. Aunado a ello, se observó que más del 60% de los magueyes silvestres presentaron la presencia de chinicuiles, lo cual podía ser detectado por medio de los daños en las hojas, tamaño del maguey, coloración de la hoja (rojizo-amarillento), sin embargo, al realizar la revisión para llevar a cabo la recolección, el maguey en ocasiones no tenía chinicuiles porque al parecer ya habían sido retirados de la planta con anterioridad, lo que nos llevó a visualizar la competencia desleal.

Figura 3: Chinicuiles obtenidos de; a) Maguey silvestre, es decir desarrollados a campo abierto y b) Maguey desarrollado bajo condiciones controladas



Aunque la producción de chinicuil bajo condiciones controladas, puede ser menor que la obtenida en condiciones silvestres, la distribución de las etapas de desarrollo tienden a ser más homogéneas cuando las condiciones se controlan, distribuidas aproximadamente en tercios (pequeños, medianos y grandes), lo cual pudo ser consecuencia de que el área muestreada es de reciente creación y la infestación se realizó con larvas o chinicuiles procedentes de diferentes parcelas, de áreas de producción natural y adquiridos con personas que los comercializan a pie de carretera. Es necesario continuar con las pruebas, para verificar si la tendencia se mantiene con larvas de la misma región.

Lo anterior, permitió identificar un segundo obstáculo durante el proceso de producción del chinicuil, el cual se refiere a las desviaciones en la producción que puede generar el no controlar el origen de los chinicuiles de resiembra, aunado a una manipulación excesiva antes de un proceso de infestación, generando niveles de estrés alto en los ejemplares inoculados, lo que sin duda impactó en los niveles de producción determinados (Figura 2).

Considerando lo anterior y con base en comentarios de otros productores de chinicuil, el desarrollo heterogéneo de la producción de chinicuil en el año 2021, fue consecuencia del exceso de lluvia, lo que generó que la producción se adelantara, no solo impactando tanto en los chinicuiles silvestres como en los desarrollados en condiciones controladas, por lo que el hecho de haber localizado chinicuiles en estado larvario fue un precedente del adelanto de la producción en el año 2022, la cual inició entre los meses de marzo y abril.

La infestación de los magueyes con chinicuil, se ha realizado hasta el momento en dos ciclos, en el primero, se obtuvieron mejores resultados ya que se detectaron evidencias de reproducción del chinicuil, cuya producción fue baja, pero ha servido como base para obtener especímenes ya adaptados a las condiciones de producción intensiva, los cuales, fueron utilizados para el siguiente ciclo de infestación con ejemplares originados en el mismo invernadero, logrando una segunda producción lo que evidencia la factibilidad de la producción de chinicuil bajo condiciones controladas.

Figura 4. Desarrollo del chinicuil bajo condiciones controladas: a) y b) invernadero, c) y d) infestación de chinicuil



Por otra parte, se realizó la contabilización de los chinicuiles desarrollados a campo abierto (silvestres) con la finalidad de corroborar la posible factibilidad económica de la producción del chinicuil desarrollado bajo condiciones controladas (invernadero), los resultados indicaron que un chinicuil adulto, tiene un tamaño y peso promedio de 3.25 cm y 7.5 g respectivamente cuando son recolectados de los magueyes silvestres, además la cantidad de especímenes que cada uno de ellos puede albergar, varía entre 40 y 80 individuos. La cantidad promedio en peso recolectado para cada maguey es de 36 g. Considerando estos resultados, y el número de magueyes que actualmente se tienen para la producción en condiciones controladas, se espera una producción anual de 180 kg, lo que permitirá contar con una alternativa productiva rentable. Actualmente se encuentra en proceso la tercera reinfestación, sin embargo, las condiciones de sequía y altas temperaturas han generado un alto estrés en los organismos.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de las encuestas, se observó que un área de oportunidad para el grupo comunitario, es fortalecer la reproducción intensiva del chinicuil que actualmente llevan a cabo. Se puede establecer un método de conservación que preserve las características sensoriales, del chinicuil, con características de calidad estandarizadas, lo que, en el mediano plazo, les permitirá a las Triunfadoras de San Mateo Tlajomulco distribuir el chinicuil de manera general en los restaurantes, con un precio estable, lo que sin duda disminuirá la colecta y comercialización no controlada del chinicuil. Por otra parte, al desarrollar un condimento tipo gourmet, se brindan alternativas de desarrollo económico a los productores de chinicuil ya que la comercialización de este gusano podría darse durante todo el año, lo que sin duda favorecerá el desarrollo del sector agroalimentario local y regional.

Bibliografía

- Briones-Santoyo, J. A., Tarango-Arámbula, L. A., Velázquez-Martínez, A., Reyes-Hernández, V. J., Salazar-Borunda, M. A. (2022). Edible insect harvest in Pinos, Zacatecas, Mexico. *Agro Productividad*.
- Collantes G. , R. D., Acosta , A., Jerkovic , M. (2024). Degustación de *sphenarium purpurascens* (orthoptera: acrididae) y comadía *redtenbacheri* (Lepidoptera: cossidae) por panameños en chapingo- Texcoco, México. *Revista Semilla Del Este*, 4(2), 102-110.
- Delgado, L. I. G., Martínez, J. F. R., Rojas, M. G., Juárez, D. R. Incidencia de entomopatógenos en *Comadia redtenbacheri* Hamm. 2022. Libro Científico II, 85.
- Durán-Galdo, R., Saavedra-García, L. (2022). Entomofagia: Una potencial alternativa para la seguridad alimentaria?: Una revisión narrativa. *Rev. Española Nutr. Comunitaria*, 28, 14.
- Escamilla Rosales, M. F. (2019). Análisis de la composición de ácidos grasos de cuatro especies de insectos antes y después del proceso de freído. Tesis de Maestría. Universidad del Estado de Hidalgo.
- Escamilla-Rosales, M. F., Castañeda-Antonio, D., Ramos-Cassellis, M. E., López-Contreras, L., Ramírez-Moreno, E., del S. Cruz-Cansino, N., Vargas-Bello-Pérez, E., Díaz-Reyes, J., Ariza-Ortega, J. A. (2022). Effect of dehydration and butter-frying on chinicuil (*Comadia redtenbacheri* Hammersmidt) and maguey white worm (*Aegiale hesperiaris* Walker). *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(1), 75-84.
- Hernández Livera, Rubén A.; Llanderal Cazáres, Celina; Castillo Márquez, Luis E.; Valdez Carrasco, Jorge; Nieto Hernández, Ramón.

- Identificación de instares larvales de *Comadia redtenbacheri* (HAMM) (Lepidoptera: Cossidae) *Agrociencia*, vol. 39, núm. 5, septiembre-octubre, 2005, pp. 539-544. Colegio de Postgraduados Texcoco, México
- Jiménez-Vásquez, M., Llanderal-Cázares, C., Miranda-Perkins, K., Vargas-Hernández, M., López-Romero, R. M., Campos-Figueroa, M. (2022). Adult population fluctuation of *Comadia redtenbacheri* (Hammerschmidt, 1847)(Lepidoptera: Cossidae). *SHILAP Revista de lepidopterología*, 50(200), 729-738.
- López, P. A., Villarreal, R. L., Gil, M. A., Ramírez, H. C., Hernández, G. J. A., Vargas, L. S., Taboada, G. O. R. (2011). Diversidad de los recursos genéticos. Handall, SA; Cantú, MB; Villarreal, EBOA; López, PA, 195-242.
- Montes, M. A. G., Figueredo-Urbina, C. J., Peña, R. B., Cruz, A. L. L. (2023). Los Chinicuiles o gusanos rojos del maguey: Alimento de origen prehispánico amenazado por su sobreexplotación. *Biología y Sociedad*, 6(12), 41-47.
- Ocampo, C. A. R., Cruz, C. A., Cervantes, L. S., Nava, Y. G., Martín, M. I. Evaluación de la digestibilidad *in vitro* de proteínas de insectos comestibles del valle del mezquital. 2022. *Therorema. Revista Científica*.
- Rostro, B. R., Salazar, B. Q., Ramos-Elorduy, J., Moreno, J. M. P., Campos, S. C. Á., Pérez, Á. G., & García, V. D. B. (2012). Análisis químico y nutricional de tres insectos comestibles de interés comercial en la zona arqueológica del municipio de San Juan Teotihuacán y en Otumba, en el estado de México. *Interciencia*, 37(12), 914-920.
- Vera, W. M. C. (2022). La entomofagia y la industrialización de los insectos: una revisión sistemática. *Revista Estudiantil Agro-Vet*, 6(2), 108-118.



Parte 2

Agroindustria y desarrollo

Capítulo 6

Efectos de diferentes métodos de extracción emergentes en la composición y la capacidad antioxidante de residuos de brócoli

Dolores Gabriela Martínez Vázquez Brayan Flores Elías Julia Rosa Medrano Macías Raúl Rodríguez Herrera Judith Amador Hernández, René Darío Peralta Rodríguez & Lluvia de Abril Alexandra Soriano Melgar

Resumen

Los residuos agroindustriales presentan diversos fitoquímicos con propiedades bioactivas, que pueden generar subproductos valiosos que permitan ser aprovechados e introducidos en la propia cadena de valor del cultivo. Las hojas y los tallos de las crucíferas, como el brócoli (*Brassica oleracea* var. *itálica*) son residuos agroindustriales que representan hasta el 65% de la planta y que no se utilizan para consumo humano, ya que generalmente se descartan generando una fuente de contaminación. Para extraer de manera eficiente los fitoquímicos se utilizan diferentes métodos como alternativas emergentes como el ultrasonido, el microondas y los sistemas híbridos (combinación de

los dos anteriores). Estos métodos ofrecen ventajas sobre los métodos convencionales, como la reducción de tiempo de extracción, el uso de disolventes considerados como seguros, así como rendimientos más elevados. Por esta razón, este trabajo consistió en el uso de tecnologías alternativas para obtener los compuestos fitoquímicos de interés a partir de los residuos de brócoli, utilizando diferentes disolventes, que permitan una extracción eficiente. Se utilizaron tres métodos de extracción y tres disolventes diferentes, analizándose los principales fitoquímicos, tales como: las clorofilas, los carotenoides, la vitamina C, los compuestos fenólicos totales, la capacidad antioxidante total, las proteínas y los glucosinolatos. Los resultados mostraron que el método de microondas generó una mayor extracción de pigmentos (clorofilas y carotenoides), además de compuestos fenólicos en comparación con los otros métodos de extracción. El método de ultrasonido permitió mantener la capacidad antioxidante de los extractos, y el método híbrido permitió una mayor extracción de proteínas y glucosinolatos. El etanol es el componente principal del disolvente que se utilizó y que permitió un mayor acarreo de pigmentos (clorofilas y carotenoides), vitamina C, compuestos fenólicos y glucosinolatos en comparación con los disolventes metanol y agua; mientras que el agua fue el mejor disolvente para la extracción de proteínas. Por lo anterior, se concluye que los métodos de extracción y los disolventes son determinantes para obtener mayor rendimiento, y que los métodos alternativos de ultrasonido y microondas, incluyendo su aplicación de manera híbrida, son técnicas eficientes y rápidas para obtener compuestos fitoquímicos de interés; siendo el método híbrido el que permite mayor obtención de glucosinolatos, el cual es el principal compuesto de interés en los residuos de brócoli con diversas aplicaciones industriales y farmacéuticas.

Introducción

Diversos alimentos de origen vegetal se desperdician a lo largo de la cadena de producción debido a la pérdida de su calidad por lo cual dejan de ser adquiridos por los consumidores, causando pérdidas económicas y contaminación ambiental (Gomes-Araújo *et al.*, 2021). En años recientes se han reportado hasta 1.3 billones de toneladas por año (Bernal-Mercado *et al.*, 2018). Por lo tanto, los residuos generados por la agroindustria son abundantes, pero muy poco valorizados, a pesar de que se pueden obtener una gran cantidad de compuestos y productos de valor agregado a partir de ellos, los cuales pueden

aplicarse en diferentes industrias, incluida la industria alimentaria (Mazumdar *et al.*, 2022). La valorización de estos residuos generará un crecimiento económico basado en bioeconomía (Sharma *et al.*, 2021). Entre los compuestos que se pueden extraer y utilizar se encuentran los carotenoides y otros terpenos, vitaminas (C, E), flavonoides y una cantidad ilimitada de compuestos fenólicos (isoflavonoides, antocianinas, lignanos, ácidos fenólicos, taninos, cumarinas, estilbenos, etc.), fibra dietética, proteínas, carbohidratos, lípidos, entre otros (Favela-González *et al.*, 2020; Gomes-Araújo *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2021). Estos pueden utilizarse como colorantes, aromatizantes, agentes antimicrobianos, aditivos, antioxidantes, etc., cuyas aplicaciones también son numerosas en diferentes industrias que constantemente demandan compuestos bioactivos, incluidas las industrias farmacéutica, alimentaria y química (Mazumdar *et al.*, 2022). El contenido de estos compuestos puede variar debido a diferentes factores, por lo que las técnicas y el método más apropiado para la extracción de estos compuestos son importantes (Zaky *et al.*, 2024). Sin embargo, no es posible establecer metodologías únicas para la obtención de fitoquímicos (Azmir *et al.*, 2013).

Entre los métodos clásicos o convencionales más utilizados para la extracción de fitoquímicos de residuos vegetales se encuentra la maceración, cuya limitación se basa en la alta cantidad de disolvente empleado, el tiempo requerido para la extracción y el problema de escalar la extracción (Fuentes-Arriagada, 2017). Los métodos de extracción modernos avanzan utilizando las propiedades de microondas, ultrasonido y su combinación (método híbrido) para generar procesos más respetuosos con el medio ambiente. El método asistido por ultrasonido es más fácil, eficiente y reproducible, reduce el tiempo de extracción, aumenta el rendimiento y la calidad de los extractos en comparación con las técnicas convencionales (Sharma *et al.*, 2021). Su eficacia se basa en las ondas acústicas que produce, causando cavitación, impactando directamente en las moléculas e intensificando la transferencia de masa entre el disolvente y la matriz vegetal (Azmir *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2021). El método asistido por microondas se basa en la lisis celular generada por calor dentro de la biomasa vegetal producida por rotación dipolar y conducción iónica (Sharma *et al.*, 2021).

Para determinar la eficiencia de los métodos de extracción, la comprensión de la naturaleza y polaridad de los compuestos a extraer es uno de los aspectos más importantes, ya que la naturaleza de los disolventes interferirá en el transporte de los compuestos de interés (Azmir *et al.*, 2013). El uso de disolventes en conjunto con los métodos

de extracción es ampliamente utilizado (Cheng *et al.*, 2020). Entre los disolventes orgánicos más comúnmente utilizados para la extracción de fitoquímicos se encuentran la acetona, los alcoholes (metanol y etanol en diferentes proporciones con agua), el hexano, el benceno, el acetoni-trilo, el acetato de etilo, el éter, el cloroformo, el agua; cuya toxicidad y efectos negativos en la naturaleza deben ser considerados (Gullón *et al.*, 2020; Karanikolopoulou *et al.*, 2021, Lankanayaka *et al.*, 2024)).

Los principales residuos utilizados para obtener compuestos fitoquímicos de interés se centran en: uva, granada, plátano, manzana, oliva, cítricos, mango, tabaco, etc. (Panzella *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2021); siendo el brócoli un producto poco valorado como fuente de este tipo de compuestos. A nivel global en 2019, se produjeron 70,150,406 toneladas de vegetales de crucíferas (incluido el brócoli) (FAOSTAT, 2022), lo que genera entre el 60 y el 75 % de residuos en la cosecha con un total de 15 millones de toneladas por año (Petkowicz and Williams, 2020). Se ha reportado que el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) es una de las crucíferas y productos de origen vegetal que contiene la mayor cantidad de glucosinolatos, con un rango desde los 47 a los 806 mg/100 g de peso fresco de glucosinolatos totales, lo que representa entre el 0.2 al 2% del peso seco de la inflorescencia del brócoli (Ali Redna *et al.*, 2023). Se pueden obtener una gran cantidad de elementos y compuestos fitoquímicos de interés a partir de residuos de brócoli, como minerales, compuestos con actividad antimicrobiana, compuestos fenólicos y antioxidantes, pigmentos, carotenoides y glucosinolatos (Azeez *et al.*, 2017; Zinoviadou and Galanakis, 2017; Karanikolopoulou *et al.*, 2021).

Los glucosinolatos han sido el foco de atención en los últimos años debido a sus propiedades antimicrobianas y beneficiosas para la salud humana, cuyos compuestos se encuentran en la familia Brassicaceae. Wang *et al.* (2023) mencionan que los glucosinolatos, junto con sus derivados bioactivos como los isotiocianatos y los ácidos fenólicos obtenidos de crucíferas, han demostrado tener propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. Además, los brotes de plantas de crucíferas contienen una variedad de nutrientes esenciales, como la vitamina C, los carotenoides y los polifenoles, que pueden prevenir diversas enfermedades, prevenir el cáncer, reducir la inflamación y promover la salud cardiovascular y metabólica. Se menciona específicamente el sulforafano, un isotiocianato derivado de la glucorafanina, el cual ha demostrado tener efectos anticancerígenos y protectores del hígado, así como la capacidad de mejorar la resistencia a la leptina y reducir la obesidad. Sin embargo, los glucosinolatos se degradan rápidamente por la acción de la enzima mirosinasa que se desactiva con baños de

calor o nitrógeno líquido, por lo que los métodos de extracción para estos compuestos son importantes (Zinoviadou and Galanakis, 2017; Devkota, 2020). El disolvente más comúnmente utilizado en la extracción de glucosinolatos es el metanol (o soluciones de agua-metanol) junto con la extracción por métodos convencionales, por lo que se requieren más estudios utilizando métodos alternativos o emergentes para la optimización y comprensión del comportamiento de estos compuestos fitoquímicos (Karanikolopoulou *et al.*, 2021). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo se centra en el uso de diferentes métodos de extracción alternativos y su combinación, así como en la comparación de diferentes disolventes para optimizar métodos que permitan mayor concentración de compuestos de interés a partir de residuos de brócoli.

Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron aproximadamente 5 Kg de hojas (hojas enteras y/o con nervaduras), consideradas en este estudio como residuos de brócoli, procedentes de la Central de Abastos del estado de Puebla, México. Los residuos fueron lavados, secados, pesados y cortados en trozos más pequeños (solo para facilitar la deshidratación y la molienda) y deshidratados en un horno (horno de temperatura constante, Yamato, China) a 45 °C durante 24 horas. Posteriormente, fueron pulverizados y tamizados hasta alcanzar un tamaño de partícula de $\leq 150 \mu\text{m}$.

Métodos de extracción

Para obtener los extractos, se pesaron 44.44 g de la muestra tamizada de hojas de brócoli, seguido de la inactivación de la enzima mirosinasa calentando el disolvente en una parrilla eléctrica (Talboys, Hotplate/Stirrer, USA) hasta alcanzar y mantener la temperatura a 80 °C durante 20 minutos (Gallaher *et al.* 2012). Los sistemas de extracción utilizados fueron: microondas, ultrasonido e híbrido (microondas/ultrasonido) (Ultrasonic - Microwave Corporative Workstation, Atpio, XO-SM400, Nanjing, China). Los diferentes disolventes utilizados fueron agua, etanol y metanol, por lo que se consideraron nueve extractos diferentes: 1) ultrasonido-agua, 2) ultrasonido-metanol, 3) ultrasonido-etanol, 4) microondas-agua, 5) microondas-metanol, 6) microondas-etanol, 7) híbrido-agua, 8) híbrido-metanol y 9) híbrido-etanol.

Determinaciones

Clorofilas (a, b y totales) y carotenoides

Para la medición de clorofilas (a, b y totales) y carotenoides, se utilizó el método de Sumanta et al. (2014), mediante absorbancia a 652, 665 y 470 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10w UV/visible, Thermo Scientific, USA) de las diluciones correspondientes de cada extracto. La concentración de los diferentes pigmentos se reportó como contenido de clorofila o carotenos en $\mu\text{g mL}^{-1}$ de extracto.

Vitamina C

Se utilizó el método 967.21 de la AOAC (AOAC, 1990), que se basa en el poder reductor del ácido ascórbico, reduciendo a 2,6-diclorofenolindofenol. A una alícuota de los extractos de brócoli se le agregaron 1 mL de solución de metafosfórico/acético y 8 mL de agua destilada. Se agregó gota a gota el reactivo 2,6-diclorofenolindofenol (0.2 %) hasta que cambió de color. El contenido de vitamina C se calculó utilizando una curva de ácido ascórbico, cuyos resultados se reportaron como mg de ácido ascórbico 100 mL^{-1} de extracto.

Compuestos fenólicos totales

Se utilizó el método de Singleton y Rossi (1965), que utiliza el reactivo de Folin-Ciocalteu, para determinar el contenido de compuestos fenólicos totales. La mezcla de reacción consistió en 100 μL del extracto, 500 μL de Folin-Ciocalteu (dilución con agua 1:10 v/v) y 400 μL de carbonato de sodio al 7.5 % (p/v). La absorbancia se midió a 765 nm en el espectrofotómetro (Genesys 10w UV/visible, Thermo Scientific, USA), y se utilizó una curva estándar de ácido gálico (0-100 μg de ácido gálico mL^{-1}) para reportar los resultados como equivalentes de ácido gálico (EAG) en $\mu\text{g mL}^{-1}$ de extracto.

Capacidad antioxidante total

La capacidad antioxidante se determinó mediante la técnica de Brand-Williams et al. (1995), cuya mezcla de reacción consistió en 50 μL del extracto y 950 μL de DPPH, con un tiempo de reacción de 15 minutos. La absorbancia se midió a 515 nm en el espectrofotómetro (Genesys 10w UV/visible, Thermo Scientific, USA). Se utilizó una cur-

va estándar de ácido gálico (0-300 μmoles de ácido gálico mL^{-1}) para informar los resultados como μmoles de EAG mL^{-1} de extracto.

Proteínas

Se homogeneizó un total de 500 μL del extracto con 5 mL de solución de fosfatos (buffer de fosfato, pH 7, 1 M) junto con 25 mg de PVPP frío. La solución se centrifugó (Valedprime, EUA) a 1,200 x g. Se utilizó el kit de Bradford (Bradford, 1976) para la determinación de proteínas totales, utilizando 100 μL de la muestra, 200 μL del colorante de Bradford y 700 μL de agua destilada, utilizando una curva estándar con albúmina sérica bovina. La absorbancia se determinó a 620 nm (Genesys 10w UV/visible, Thermo Scientific, USA) y los resultados se expresaron como mg de proteína mL^{-1} de extracto.

Glucosinolatos

La purificación del extracto se realizó con cartuchos LC-SAX (Supelco®, Analytical Products, USA), activados con 3 mL de metanol, 3 mL de agua, 2.5 mL de acetato de sodio 0.5 M y 2 mL de agua. Se preparó una emulsión con 3 mL de NaCl (0.5 M), recuperando el extracto purificado liofilizado (LabConco, FreeZone 2.5 plus, USA) durante 36 horas. El liofilizado (40 mg) se colocó junto con 700 μL de buffer de acetato (0.2 M, pH 4.2) a temperatura ambiente y se agitó durante 15 minutos. Se añadieron 100 μL de acetato de bario (0.5 M) y se agitó (vortex Genie 1, Touch Mixer, USA). Luego, se añadieron 50 mg de PVPP, se incubaron durante 10 minutos a temperatura ambiente y se añadieron 100 μL de sulfato de sodio (2 M). Para esta solución, se tomaron 0.2 mL y se mezclaron con 0.2 mL de hidróxido de sodio (2 M), se incubaron durante 30 minutos y luego se añadieron 30 μL de ácido clorhídrico concentrado y se centrifugó a 4,000 rpm durante 10 minutos. Para la medición espectrofotométrica, se tomó 100 μL de la solución y se mezcló con 100 μL de ferricianuro 2 mM en buffer de fosfato (0.2 M, pH 7). La absorbancia de la solución se midió a 420 nm (Genesys 10w UV/visible, Thermo Scientific, USA).

Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $p < 0.05$, utilizando la prueba de comparación múltiple de Tukey-Kramer a través del programa estadístico NCSS (2007).

Resultados y discusión

Clorofilas (a, b y totales) y carotenoides

El contenido de los diferentes compuestos varió según el método de extracción y el disolvente, pero principalmente con el tipo de disolvente, siendo el etanol el que permitió una mayor extracción de clorofilas (a, b y totales) ($p < 0.05$, Figura 1a-1c). Los carotenoides se extrajeron con éxito con etanol; sin embargo, utilizando el método de ultrasonido (solo) no fue posible determinar estos compuestos, mientras que el uso de microondas permitió la cuantificación del contenido más alto de carotenoides, que disminuyó al usar el método híbrido ($p < 0.05$, Figura 1d). Cheng et al. (2020) mencionaron que el tamaño de partícula es importante para que los disolventes puedan penetrar en la biomasa vegetal y garantizar una mejor extracción. De igual manera, la naturaleza y la polaridad de los compuestos a extraer y los disolventes que se emplean durante dicha extracción, son las principales consideraciones que se deben enfatizar al emplear diferentes métodos de extracción. Por lo tanto, los residuos de brócoli fueron pulverizados y tamizados, además de utilizar diferentes disolventes que permitieran una mejor extracción de compuestos, siendo el etanol el mejor disolvente para la extracción de pigmentos. El método de ultrasonido resulta ser una técnica más rápida y económica, que ha demostrado ser una excelente opción para la extracción de carotenoides, ya que estos compuestos son muy sensibles a la oxidación enzimática y no enzimática, y son sensibles a la temperatura, por lo que pueden degradarse fácilmente (Cheng et al., 2020). Sin embargo, en los resultados obtenidos en la extracción de carotenoides se encontró que el ultrasonido produce su degradación, siendo más efectivos el método de microondas y el híbrido para la extracción de estos compuestos. Kumar et al. (2021) indicaron que el ultrasonido causa cavitación, lo cual tiene un impacto directo en las moléculas; así, este método puede estar causando la degradación de los carotenoides. Por lo tanto, la energía y el tiempo utilizados durante la extracción empleando ultrasonido podrían afectar el contenido de los carotenoides al utilizar este método. Por otro lado, Karanikolopoulou et al. (2021) mencionan que la elección de los disolventes a utilizar junto con el método de microondas es el principal desafío, ya que no todos los disolventes son capaces de ser calentados por microondas; el etanol y el agua son los disolventes más efectivos junto con la técnica de microondas. Zaky et al. (2024) mencionan que la extracción asistida

por ultrasonido (UAE) se ha utilizado con éxito para extraer una variedad de compuestos, como clorogénico, ácido carotenoico y otros carotenoides como luteína y β -caroteno de la espinaca; mientras que la extracción asistida por microondas (MAE) ha demostrado ser eficaz para extraer fitoquímicos como alcaloides y fenoles. Ambas técnicas ofrecen mayores rendimientos de extracción y tiempos de extracción más cortos en comparación con los métodos convencionales.

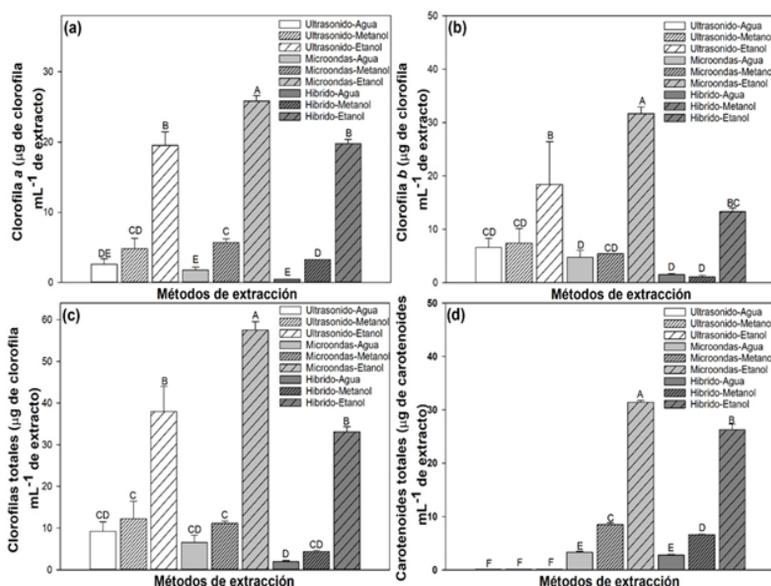


Figura 1. (A) Clorofila a ($\mu\text{g mL}^{-1}$), (B) clorofila b ($\mu\text{g mL}^{-1}$), (C) clorofilas totales ($\mu\text{g mL}^{-1}$) y carotenoides totales ($\mu\text{g mL}^{-1}$) en extractos a base de residuos de brócoli obtenidos por tres métodos diferentes (ultrasonido, microondas e híbrido), y disolventes (agua, metanol y etanol). Las barras indican el valor promedio ($n=3$) \pm error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los extractos ($p \leq 0.05$) mediante ANOVA y la prueba de Tukey.

Vitamina C

La vitamina C muestra concentraciones muy similares cuando se utiliza el método de ultrasonido y el método de microondas, sin embargo, al usar el método híbrido (la combinación de ultrasonido y microondas), la concentración de vitamina C se reduce significativamente ($p < 0.05$; Figura 2a). El tipo de disolvente también ejerce un efecto sobre la concentración de vitamina C que se puede obtener a

partir de los residuos de brócoli, donde principalmente al usar etanol es posible obtener un mayor contenido de vitamina C, seguido de metanol y, finalmente, con agua en los tres sistemas de extracción diferentes ($p < 0.05$; Figura 2a). El disolvente proporciona el medio para transferir los compuestos fitoquímicos de interés y, por lo tanto, es importante considerar el disolvente a utilizar para cada extracción deseada (Cheng et al., 2020). La efectividad de las microondas depende de muchos factores; al respecto, Rezende et al. (2017) observaron que el método de ultrasonido generaba la mayor obtención de compuestos fitoquímicos en residuos de acerola porque mejoraba la transferencia de masa al disolvente mediante la acción de cavitación. En el caso de los extractos de residuos de brócoli, el método de microondas es mejor en comparación con el ultrasonido, siendo extremo el tratamiento híbrido que produjo una reducción significativa del contenido de vitamina C, probablemente debido a su labilidad térmica. Sharma et al. (2021) obtuvieron resultados similares utilizando el método de microondas, resaltando un mayor contenido de vitamina C en la mitad del tiempo a partir de la cáscara de mango.

Compuestos fenólicos totales

El método de microondas y ultrasonido de manera independiente permite una extracción más alta de compuestos fenólicos totales en comparación con el método híbrido ($p < 0.05$), por lo que el método híbrido parece afectar la presencia de los compuestos fenólicos en los extractos de brócoli (Figura 2b). El etanol es el disolvente que permite una mayor extracción de compuestos fenólicos empleando microondas y ultrasonido, en comparación con el uso de metanol y agua ($p < 0.05$; Figura 2b). Thangaiyah et al. (2024) emplearon hojas de moringa secas sometidas a ultrasonido con etanol al 70% en una proporción de 1:10 (peso de la muestra: volumen del disolvente) en modo de pulsos (intervalos de 5 segundos), bajo condiciones de frío para evitar la degradación. Los resultados optimizados indican la obtención de entre 100.12 a 149.22 mg EAG/g de compuestos fenólicos totales y de entre 58.87 a 85.08% para la actividad contra radicales libres. En este sentido, los disolventes como el etanol o las mezclas de etanol y agua, con una polaridad más alta, generan un mayor rendimiento en la extracción de compuestos fenólicos. Kumar et al. (2021) indicaron que la exposición prolongada a microondas con alta potencia genera la degradación de compuestos fenólicos, por lo que es importante considerar la potencia, el tiempo y la temperatura del tratamiento,

así como el disolvente y la relación disolvente/biomasa vegetal para obtener un buen rendimiento. Por lo tanto, los tiempos y métodos utilizados en la extracción de compuestos fenólicos en el caso de residuos de brócoli fueron óptimos en comparación con el método híbrido y ultrasonido usando diferentes disolventes. Sharma et al. (2021) obtuvieron un buen rendimiento de extracción de compuestos fenólicos en cáscara de mango empleando disolventes eutécticos y ajustando las condiciones de exposición a microondas de manera optimizada. Karataş et al. (2024) estudiaron el impacto de la extracción asistida por ultrasonido sobre el contenido de los compuestos fenólicos totales del brócoli empleando tejido seco en comparación con los métodos de extracción tradicionales, donde las variables a analizar fueron la concentración del disolvente (1:5-1:20 p/v) y el tiempo de extracción (20-60 min) en la eficiencia del proceso de extracción. Los resultados mostraron rangos de entre 74.44 a 291.73 mg EAG/100 g de peso seco mediante el uso de los diferentes tratamientos con ultrasonido, mientras que el control con métodos convencionales mostró un resultado de 120 mg GAE/100 g de peso seco. El estudio destaca la variabilidad en el contenido fenólico observada bajo diferentes condiciones de extracción, pero no proporciona detalles específicos sobre el efecto del disolvente en este proceso.

Por otro lado, Luque-Alcaraz et al. (2024) emplearon la extracción asistida por ultrasonido utilizando un procesador de ultrasonido de alta intensidad (Ultrasonic Processor Q500), modificando la relación soluto:disolvente (1:18 y 1:42), la potencia ultrasónica (250 y 400 W) y el tiempo de extracción (15 y 20 min). Los autores observaron concentraciones de fenoles totales en extractos de piel de uva en el rango de 50 a 80 μmol EAG/g peso seco. Mientras que un estudio en el que se emplearon pétalos de azafrán secados al vacío y una extracción asistida por ultrasonido (potencia de 0-400 vatios), donde también se modificaron la concentración de los disolventes: etanol (0-96%) y ácido cítrico (0-1%), en el disolvente final, se observó una relación entre la concentración de ácido cítrico y el contenido de antocianinas (3.133-5.444 mg de cianidina-3-glucósido/g de pétalo de azafrán secado al vacío), fenoles totales (11.779-28.423 mg de ácido gálico/g de pétalo de azafrán secado al vacío) y flavonoides (41.152-71.856 mg de quercetina/g de pétalo de azafrán secado al vacío) en el extracto; destacando la importancia de los parámetros del proceso de extracción y los disolventes para la obtención de los compuestos de interés (Jabbari et al. 2024).

Capacidad antioxidante total

La capacidad antioxidante total de los diferentes extractos de residuos de brócoli es mayor cuando se utiliza el método de ultrasonido, así como al utilizar metanol como disolvente; seguido del uso de etanol con ultrasonido y microondas, y metanol con microondas ($p < 0.05$; Figura 2c). El método híbrido, que contiene la menor cantidad de compuestos (pigmentos, fenoles, vitamina C, etc.), presentó la capacidad antioxidante más baja ($p < 0.05$), principalmente con agua como disolvente (Figura 2c). Por lo que la polaridad del disolvente junto con el efecto del ultrasonido, acarrea compuestos con mayor capacidad antioxidante. Rezende et al. (2017) emplearon extracción convencional, para extractos de residuos de acerola para una mejor extracción de antioxidantes. Garrido et al. (2019) emplearon microondas y etanol (48%) para la extracción de antioxidantes en uvas (Chardonnay). Esto denota la importancia de la estandarización de los métodos de extracción para cada uno de los modelos de estudio y/o de los compuestos a obtener.

En un estudio realizado para la obtención de extractos de piel de uva mediante extracción asistida por ultrasonido utilizando un procesador de ultrasonido de alta intensidad (Ultrasonic Processor Q500), modificando la relación soluto:disolvente (1:18 y 1:42), la potencia ultrasónica (250 y 400 W) y el tiempo de extracción (15 y 20 min), los autores reportaron los resultados del ensayo DPPH mostrando una baja capacidad de eliminación de radicales DPPH (%) cuando se probó a una concentración de $781.25 \mu\text{g mL}^{-1}$. Sin embargo, al aumentar la concentración a $1,562.5 \mu\text{g mL}^{-1}$, la capacidad antioxidante de los extractos de todos los tratamientos aumentó, alcanzando aproximadamente un 40-50%. Además, al aumentar aún más la concentración a $3,125 \mu\text{g mL}^{-1}$, se observó una eliminación aún mayor de los radicales DPPH, llegando al 65-80%. Estos resultados indican que los extractos de piel de uva tienen una capacidad antioxidante significativa según el ensayo DPPH y que esta capacidad aumenta con la concentración y varía según las condiciones de extracción utilizadas (Luque-Alcaraz et al. 2024). Por ello, al generar mayor acarreo de compuestos mediante ultrasonido y metanol en los residuos de brócoli, la capacidad antioxidante obtenida fue mayor.

Por su parte, Jabbari et al. (2024) emplearon pétalos de azafrán secados al vacío y una extracción asistida por ultrasonido (potencia de 0-400 vatios), donde también se modificaron la concentración de los disolventes: etanol (0-96%) y ácido cítrico (0-1%), en el disolvente

final. Los resultados mostraron que la actividad antioxidante, medida mediante ensayos de eliminación de radicales DPPH (18.477–31.152%) y poder reductor del hierro (FRAP) (34.496–85.57 mg Fe²⁺/g de pétalo de azafrán secado al vacío), fue influenciada por la concentración de etanol y ácido cítrico en el disolvente final, así como por la potencia del ultrasonido empleada. Phan et al. (2024) estudiaron el método de extracción asistida por ultrasonido y los efectos de diferentes disolventes (cloruro de colina: urea en una proporción de 1:2) de extracción en la recuperación de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante (IC50) en frutas de mirto rosa (*Rhodomyrtus tomentosa*) y con un diseño de Box-Behnken optimizar las condiciones de extracción, las cuales arrojan un contenido de fenoles de 85.19 mg EAG/g y 2.31 mg TE/g de capacidad antioxidante. Los autores resaltan las ventajas del método de extracción asistida por ultrasonido, el cual resulta más eficiente que el procedimiento tradicional (maceración), con tiempos de extracción menores, mayor eficiencia y amigable con el ambiente (consideradas tecnologías verdes). Estos reportes ayudan a reforzar los resultados obtenidos en este estudio, donde el método de ultrasonido permite incrementar la capacidad antioxidante de los extractos de los residuos de brócoli.

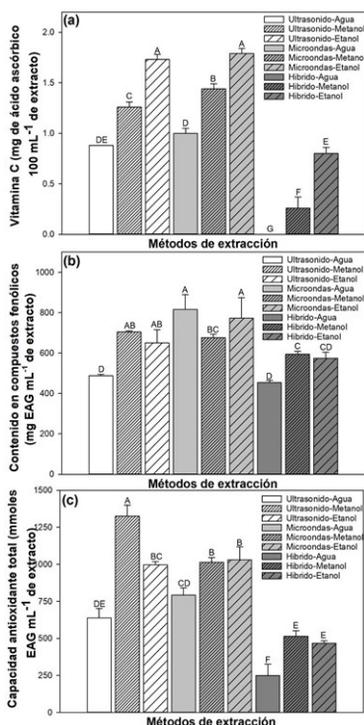


Figura 2. (A) Vitamina C (mg de ácido ascórbico mL⁻¹), (B) contenido total de compuestos fenólicos (µg de equivalente de ácido gálico mL⁻¹), y (C) capacidad antioxidante total (µmoles de equivalente de ácido gálico mL⁻¹) en extractos a base de residuos de brócoli mediante tres métodos diferentes (ultrasonico, microondas e híbrido), y disolventes (agua, metanol y etanol). Las barras indican el valor promedio (n=3) ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los extractos (p≤0.05) mediante ANOVA y la prueba de Tukey.

Proteínas

El contenido de proteínas en los extractos a base de residuos de brócoli se obtuvo utilizando el método híbrido, en comparación principalmente con el método de ultrasonido, donde independientemente del disolvente utilizado, se encontró la menor cantidad de proteínas ($p < 0.05$; Figura 3). El agua fue el mejor disolvente para la extracción de proteínas utilizando los métodos híbrido y microondas, mientras que el etanol y el método de ultrasonido presentaron la mayor cantidad de proteínas en comparación con los otros disolventes ($p < 0.05$; Figura 3). Como mencionaron Zaky et al. (2024), el ultrasonido debe emplearse cuidadosamente en métodos de extracción, especialmente cuando están involucrados compuestos muy sensibles e inestables. El método de ultrasonido junto con técnicas de partición en tres fases mejora la separación de proteínas, reduce el tiempo de extracción y aumenta el rendimiento en comparación con los métodos convencionales (Sharma et al., 2021). Sin embargo, en extractos de residuos de brócoli, se obtuvo un mejor rendimiento al emplear el método de microondas y el método híbrido en comparación con emplear solo el método de ultrasonido. Además, la extracción con agua permite una mayor difusión de proteínas desde la matriz vegetal.

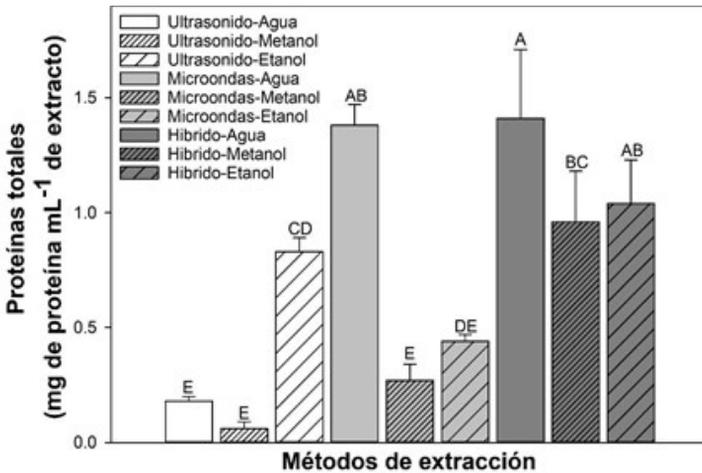


Figura 3. Contenido total de proteínas (mg mL^{-1}) en extractos a base de residuos de brócoli mediante tres métodos diferentes (ultrasonico, microondas e híbrido), y disolventes (agua, metanol y etanol). Las barras indican el valor promedio ($n=3$) \pm error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los extractos ($p \leq 0.05$) mediante ANOVA y la prueba de Tukey.

Glucosinolatos

Las técnicas para el análisis de glucosinolatos y sus productos de degradación son extensas, e incluyen técnicas espectrofotométricas (Karanikolopoulou et al., 2021). Sobre esta base, el contenido de glucosinolatos fue mayor utilizando el sistema híbrido junto con el disolvente de etanol ($p < 0.05$; Figura 4). Kumar et al. (2023) emplearon métodos de extracción asistida por ultrasonido (400 W, 10 min) y por microondas (250 W, 10 min, 80 °C), empleando metanol como disolvente. Los resultados obtenidos fueron de 290.12 $\mu\text{g/g}$ y 250.65 $\mu\text{g/g}$ de glucosinolatos (glucomoringina) en semillas de *Moringa oleífera*. En tanto que, Khan et al. (2019) mencionaron que los métodos de extracción convencionales producen un menor rendimiento en el contenido de glucosinolatos. Además, el método de ultrasonido se ha aplicado como paso de pretratamiento previo a la extracción asistida por microondas para la extracción de compuestos de interés en hojas de repollo (col), donde la combinación de ultrasonido y microondas generó el mayor rendimiento de glucosinolatos en comparación con cada una de las metodologías empleadas de forma independiente (Zinoviadou y Galanakis, 2017), similar a lo observado en este estudio. Jia et al. (2023) determinaron el contenido de diferentes glucosinolatos y componentes volátiles del aroma de las semillas de rábano, donde el tratamiento con microondas modificó de manera negativa el contenido de glucosinolatos oscilando entre el 47.39 y el 67.88%. El contenido de glucosinolatos más concentrados fueron los alifáticos 13.31 a 31.18 $\mu\text{mol/g}$, seguidos por los glucosinolatos indol y los glucosinolatos aromáticos, con concentraciones de 0.75 a 2.44 $\mu\text{mol/g}$ y 0.003 a 0.009 $\mu\text{mol/g}$, respectivamente. Por lo que el tipo de compuesto dentro del grupo de los glucosinolatos puede también influenciar en el resultado final de la extracción de estos compuestos fitoquímicos de interés.

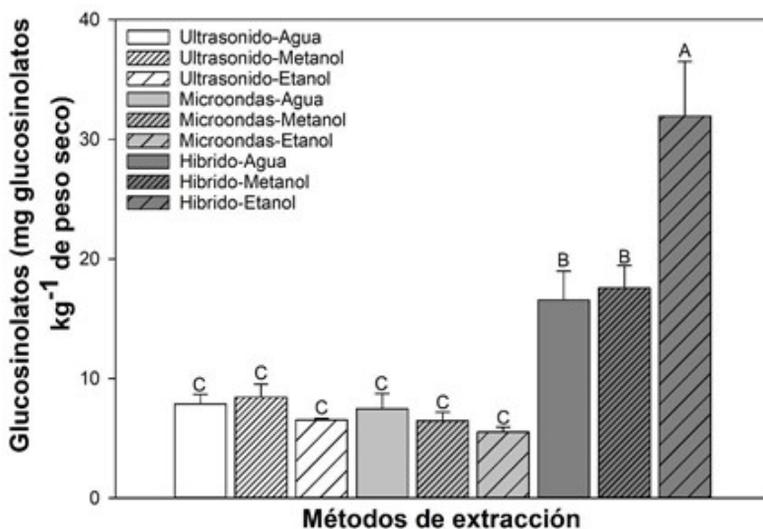


Figura 4. Contenido total de glucosinatos (mg de glucosinatos kg⁻¹ de peso seco de residuos) en extractos a base de residuos de brócoli mediante tres métodos diferentes (ultrasonico, microondas e híbrido), y disolventes (agua, metanol y etanol). Las barras indican el valor promedio (n=3) ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los extractos ($p \leq 0.05$) mediante ANOVA y la prueba de Tukey.

Con base en lo anterior, la elección del disolvente antes de la extracción es importante, ya que es uno de los factores que más modifica el contenido de compuestos presentes en los extractos (Deng et al., 2015). Un punto importante es que el etanol es parte de los disolventes que no están restringidos para su uso en alimentos (Marriott, 2010), por lo que se puede utilizar para la extracción de compuestos fitoquímicos sin problemas en su aplicación. Por lo tanto, los diferentes resultados que se han obtenido durante los últimos años obligan a continuar investigando técnicas no convencionales y su eficacia (Karanikolopoulou et al., 2021). Es necesario entonces estandarizar los métodos de extracción para cada modelo, tejido y compuesto que se desea obtener.

Conclusión

Los métodos alternativos como los métodos de ultrasonido, microondas e híbrido son buenas técnicas para obtener compuestos fitoquímicos de interés con actividad biológica a partir de residuos de brócoli, siendo importante la selección del disolvente a utilizar para obtener mayor contenido del compuesto principal deseado. La capacidad antioxidante de los extractos se ve modificada por el método

de extracción utilizado, siendo el método de ultrasonido junto con el disolvente de metanol el que permite mayor capacidad antioxidante gracias a la sinergia de los compuestos antioxidantes presentes en los extractos.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por su apoyo financiero al estudiante Brayan Flores Elías. Así como a la M.C. Alma Leticia Martínez Herrera, técnica de laboratorio del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Este trabajo fue financiado por el Proyecto CONACyT 316010 titulado: “Residuos agroindustriales como tratamientos para la extensión de la vida de anaquel de productos poscosecha altamente perecederos” a través del fondo FOP08-2021-03 “Desarrollo de Innovaciones Tecnológicas para una Agricultura Mexicana Libre de Agroinsumos Tóxicos».

Bibliografía

- Ali Redha, A., Torquati, L., Langston, F., Nash, G. R., Gidley, M. J., Cozzolino, D. (2023). Determination of glucosinolates and isothiocyanates in glucosinolate-rich vegetables and oilseeds using infrared spectroscopy: A systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2198015>
- AOAC. (1990). *Official methods of analysis* (16th ed.). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Azeez, S., Narayana, C. K., Oberoi, H. S. (2017). Extraction and utilization of bioactive compounds from agricultural waste. In: *Utilization of Bioactive Compounds from Agricultural and Food Waste*. CRC Press, Taylor & Francis. 5, 127–158. <https://doi.org/10.1201/9781315151540-5>
- Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>
- Bernal-Mercado, A. T., Vázquez-Armenta, F. J., González-Aguilar, G. A., Silva-Espinoza, B. A. (2018). Integral exploitation of the plant food

industry: food security and sustainable development. In: Siddiqui, M. W., Fernando Ayala-Zavala, J., González Aguilar, G. A. (eds). *Plant Food By-Products*. Apple Academic Press. pp. 1–24. <https://doi.org/10.1201/b22352-1>

- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 72(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Cheng, S. H., Khoo, H. E., Kong, K. W., Prasad, K. N., Galanakis, C. M. (2020). Extraction of carotenoids and applications. In: Charis M. Galanakis (ed.). *Carotenoids: Properties, Processing, and Applications*, Academic Press, 259–288. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817067-0.00008-7>
- Deng, Q., Zinoviadou, K. G., Galanakis, C. M., Orlien, V., Grimi, N., Vorobiev, E., Lebovka, N., Barba, F. J. (2015). The effects of conventional and non-conventional processing on glucosinolates and its derived forms, Isothiocyanates: extraction, degradation, and applications. *Food Engineering Reviews*. 7(3), 357–381. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9104-9>
- Devkota, H. P. (2020). Analysis of glucosinolates. In: Ana Sanches Silva, Seyed Fazel Nabavi, Mina Saeedi, Seyed Mohammad Nabavi (ed.). *Recent Advances in Natural Products Analysis*. Elsevier. The Netherlands. pp. 651–661. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00020-2>
- FAOSTAT (2022). Food and Agriculture Organization. Statistics. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Favela-González, K. M., Hernández-Almanza, A. Y., de la Fuente-Salcido, N. M. (2020). The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (Brassica) as antimicrobials and antioxidants: A review. *Journal of Food Biochemistry*. 44(10). <https://doi.org/10.1111/jfbc.13414>
- Fuentes-Arriagada, C. S. (2017) Mejoramiento de la extracción de compuestos bioactivos en zumo de uva (*Vitis vinifera*) Proyecto de tesis para optar al título de Ingeniera Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción. Chillán – Chile.
- Gallaher, C. M., Gallaher, D. D., & Peterson, S. (2012). Development

- and validation of a spectrophotometric method for quantification of total glucosinolates in cruciferous vegetables. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(6), 1358-1362. <https://doi.org/10.1021/jf2041142>
- Garrido, T., Gizdavic-Nikolaidis, M., Leceta, I., Urdanpilleta, M., Guerrero, P., de la Caba, K., Kilmartin, P. A. (2019). Optimizing the extraction process of natural antioxidants from chardonnay grape marc using microwave-assisted extraction. *Waste Management*, 88, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.031>
- Gomes-Araújo, R., Martínez-Vázquez, D. G., Charles-Rodríguez, A. V., Rangel-Ortega, S., Robledo-Olivo, A. (2021). Bioactive compounds from agricultural residues, their obtaining techniques, and the antimicrobial effect as postharvest additives. *International Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1155/2021/9936722>
- Gullón, P., Gullón, B., Romani, A., Rocchetti, G., Lorenzo, J.M. (2020). Smart advanced solvents for bioactive compounds recovery from agri-food by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 182-197. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.007>
- Jabbari, N., Goli, M., Shahi, S. (2024). Optimization of bioactive compound extraction from saffron petals using ultrasound-assisted acidified ethanol solvent: adding value to food waste. *Foods*, 13, 542. <https://doi.org/10.3390/foods13040542>
- Jia, X., Yu, P., An, Q., Ren, J., Fan, G., Wei, Z., Pan, S. (2023). Identification of glucosinolates and volatile odor compounds in microwaved radish (*Raphanus sativus* L.) seeds and the corresponding oils by UPLC-IMS-QTOF-MS and GC× GC-qMS analysis. *Food Research International*, 169, 112873. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112873>
- Karanikolopoulou, S., Revelou, P.-K., Xagoraris, M., Kokotou, M. G., Constantinou-Kokotou, V. (2021). Current Methods for the Extraction and Analysis of Isothiocyanates and Indoles in Cruciferous Vegetables. *Analytica*, 2 (4), 93-120. <https://doi.org/10.3390/analytica2040011>
- Karataş, M., Erzen, B., Deniz, Ş., Aydoğmuş, E. (2024). Enhancing Phenolic Content in Dried Broccoli: Insights from Ultrasonic Assisted Extraction and Response Surface Methodology.
- Khan, S. A., Aslam, R., Makroo, H. A. (2019). High pressure extraction and its application in the extraction of bio-active compounds: A review. *Journal of Food Process Engineering*. 42 (1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12896>
- Kumar, M., Dahuja, A., Tiwari, S., Punia, S., Tak, Y., Amarowicz, R.,

- Bhoite, A. G., Singh, S., Joshi, S., Panesar, P. S., Prakash Saini, R., Pihlanto, A., Tomar, M., Sharifi-Rad, J., Kaur, C. (2021). Recent trends in extraction of plant bioactives using green technologies: A review. *Food Chemistry*, 353. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129431>
- Kumar, G.K., Sudagar, I.P., Arulmari, R., Rajkumar, P., Krishnakumar, P., Gurusamy, K., Santhanakrishnan, V.P. (2023). Optimization of oil extraction method for isolation of glucosinolates from *Moringa oleifera*. *The Pharma Innovation Journal*, 12(9), 2801-2806.
- Lankanayaka, A. A. K., Matharage, D. S., Senanayake, C. M., Jayathunge, K. G. L. R., Bandara, P. C., & Manatunga, D. C. (2024). Extraction of bioactive compounds from food waste and their potential applications in the food industry: a review. *Extracção de compostos bioativos de resíduos de alimentos e suas possíveis aplicações na indústria alimentícia: uma revisão* *Extracción de compuestos bioactivos a partir de residuos alimentarios*. *Brazilian Journal of Development*, 10(4), 01-26. <http://DOI:10.34117/bjdv10n4-061>
- Luque-Alcaraz, A.G., Hernández-Téllez, C.N., Graciano-Verdugo, A.Z., Toledo-Guillén, A.R., Hernández-Abril, P.A. (2024). Exploring antioxidant potential and phenolic compound extraction from *Vitis vinifera* L. using ultrasound-assisted extraction. *Green Processing and Synthesis*, 13(1), 20230141. <https://doi.org/10.1515/gps-2023-0141>
- Marriott, R. J. (2010). Greener chemistry preparation of traditional flavour extracts and molecules. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 21(2), 46-48.
- Mazumdar, B., Keshav, A., Sharma, A. (2022). Phytochemical extraction from waste biomass. In: *Utilization of Waste Biomass in Energy, Environment and Catalysis*. CRC Press. pp. 43-76. <https://doi.org/10.1201/9781003196358-3>
- Panzella, L., Moccia, F., Nasti, R., Marzorati, S., Verotta, L., Napolitano, A. (2020). Bioactive phenolic compounds from agri-food wastes: an update on green and sustainable extraction methodologies. *Frontiers in Nutrition*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00060>
- Petkowicz, C. L., Williams, P. A. (2020). Pectins from food waste: Characterization and functional properties of a pectin extracted from broccoli stalk. *Food Hydrocolloids*, 107, 105930. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105930>
- Phan, V.M., Ngo Thi M.S., Pham Ti H.H., Tran, D.D. (2024). Ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of phenolic compounds from rose myrtle. *Latin American Applied Research-An*

- International Journal, 54(2), 263-270. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2024.3211>
- Rezende, Y. R. R. S., Nogueira, J. P., Narain, N. (2017). Comparison and optimization of conventional and ultrasound assisted extraction for bioactive compounds and antioxidant activity from agro-industrial acerola (*Malpighia emarginata* DC) residue. *LWT*, 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.020>
- Sharma, P., Gaur, V.K., Sirohi, R., Varjani, S., Kim, S.H., Wong, J.W. (2021). Sustainable processing of food waste for production of bio-based products for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 325, 124684. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124684>
- 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.
- Sumanta, N., Imranul Haque, C., Nishika, J., Suprakash, R. (2014). Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Journal of Chemical Science*. 4(9). <https://doi.org/10.1055/s-0033-1340072>
- Thangaiyah, A., Gunalan, S., Kulandaivelu Rathnasamy, V., Aruliah, R., AlSalhi, M. S., Devanesan, S., Malik, T. (2024). Optimization of ultrasound-assisted phytomolecules extraction from moringa leaves (*Moringa oleifera* Lam) using response surface methodology. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2309834. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2309834>
- Wang, M., Li, Y., Yang, Y., Tao, H., Mustafa, G., Meng, F., Wang, Q. (2023). Biofortification of health-promoting glucosinolates in cruciferous sprouts along the whole agro-food chain. *Trends in Food Science & Technology*, 104164. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104164>
- Zaky, A.A., Akram, M.U., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., Nowacka, M. (2024). Bioactive compounds from plants and by-products: Novel extraction methods, applications, and limitations. *AIMS Molecular Science*, 11(2), 150-188. <https://doi.org/10.3934/molsci.2024010>
- Zinoviadou, K. G., Galanakis, C. M. (2017). Glucosinolates and respective derivatives (Isothiocyanates) from plants. In: Munish Puri (ed.). *Food bioactives*. Springer, Cham. pp. 3–22. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51639-4_1

Capítulo 7

Pasta alimentaria adicionada con harina de tallos de coliflor e hidrolizados proteicos de frijol: caracterización estructural y potencial antioxidante

*Josefina Porras Saavedra, Nalleli Concepción Pérez Pérez &
Tomás Tovar Benitez*

Resumen

Las pastas alimentarias son valoradas no solo por su versatilidad y sabor. Las características de este tipo de alimentos permiten integrar subproductos agroindustriales como una estrategia innovadora para mejorar tanto la calidad nutricional del producto como la sostenibilidad del proceso productivo. La harina de tallos de coliflor puede ser utilizada como ingrediente en la elaboración de pastas y otros productos de panificación, incrementando su valor nutricional y funcional. Asimismo, para potenciar más su funcionalidad se puede integrar otro tipo de moléculas como los péptidos bioactivos, fragmentos de proteínas que, además de proporcionar nutrientes básicos, tienen efectos beneficiosos específicos sobre la salud como su capacidad antioxidante. De acuerdo con lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar mediante un análisis de perfil de textura una pasta alimentaria adicionada con

hidrolizado proteico de frijol flor de mayo con actividad antioxidantes. Se elaboraron dos formulaciones de pastas a las cuales se les evaluó capacidad antioxidante mediante la decoloración de los radicales DPPH y ABTS, análisis de perfil de textura (APT) y tensión, estas últimas propiedades fueron a las pastas con cocción y sin cocción. La hidrólisis enzimática secuencial con las enzimas pepsina-pancreatina permitió obtener un hidrolizado proteico con péptidos bioactivos con actividad antioxidante. Con base a los resultados obtenidos del APT, se demostró que agregar el hidrolizado proteico de frijol con actividad antioxidante modificó las propiedades estructurales de la pasta cocida. Estos resultados sugieren que la adición del hidrolizado proteico a las pastas alimenticias las convierte en un alimento funcional.

Introducción

Las pastas alimentarias son un componente fundamental en la dieta global, apreciadas por su versatilidad, sabor y por su capacidad para adaptarse a diversas preferencias y restricciones alimentarias (Figueroa, 2020). Tradicionalmente elaboradas a partir de sémola de trigo duro, las pastas han evolucionado para incluir una variedad de ingredientes que mejoran sus propiedades nutricionales y funcionales. Esta evolución es impulsada por la creciente demanda de alimentos más saludables y sostenibles (Marti y Pagani, 2013). En este contexto, la incorporación de subproductos agroindustriales en la formulación de pastas representa una estrategia innovadora para mejorar tanto la calidad nutricional del producto como la sostenibilidad del proceso de producción (Smith y Brown, 2020).

El aprovechamiento de residuos agroindustriales es una práctica cada vez más relevante en la industria alimentaria, motivada por la necesidad de reducir el desperdicio y maximizar la eficiencia en el uso de recursos (Mirabella et al., 2014). Los residuos generados durante la producción y procesamiento de alimentos, como cáscaras, pulpas y tallos, son ricos en nutrientes y compuestos bioactivos que pueden ser recuperados y reutilizados en la fabricación de nuevos productos alimenticios. Este enfoque contribuye a la sostenibilidad ambiental y también puede proporcionar ingredientes funcionales valiosos para mejorar las propiedades nutricionales y sensoriales de los alimentos. (Gómez et al., 2020)

Entre los residuos agroindustriales, los tallos de coliflor representan una fuente prometedora. La coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) es ampliamente cultivada y consumida en todo el mundo, pero su proce-

samiento genera una considerable cantidad de residuos, principalmente en forma de tallos y hojas que generalmente no se aprovechan. Sin embargo, estos tallos contienen una variedad de nutrientes y compuestos bioactivos que pueden ser utilizados para mejorar la calidad de los productos alimentarios. La transformación de estos tallos en harina es una estrategia efectiva para su integración en diversas aplicaciones alimentarias.

La harina de tallos de coliflor se obtiene mediante el secado y la molienda de los tallos, resultando en un producto rico en fibra dietética, minerales y compuestos bioactivos como glucosinolatos y flavonoides. Esta harina puede ser utilizada como ingrediente en la formulación de pastas y otros productos de panificación, mejorando su valor nutricional y funcional. Además, la incorporación de harina de tallos de coliflor en pastas aumenta el contenido de fibra, antioxidantes y contribuye a la reducción del índice glucémico del producto final, beneficiando así a los consumidores que buscan opciones más saludables (Martínez-Villaluenga et al., 2017).

Una línea de investigación adicional en el aprovechamiento de residuos agroindustriales es la producción de hidrolizados proteicos a partir de fuentes vegetales subutilizadas. Los hidrolizados proteicos son productos obtenidos mediante la hidrólisis enzimática de proteínas, que resultan en una mezcla de péptidos y aminoácidos libres (Fernández-López y Pérez-Álvarez, 2020). Estos hidrolizados son fácilmente digeribles, absorbibles y probablemente contienen péptidos bioactivos con diversas propiedades funcionales (Fernández-Tomé et al., 2014). La producción de hidrolizados proteicos a partir de tallos de coliflor es una estrategia innovadora que puede añadir valor a estos residuos, transformándolos en ingredientes funcionales de alto valor añadido.

Los péptidos bioactivos son fragmentos de proteínas que, además de sus funciones nutricionales básicas, tienen efectos beneficiosos específicos sobre la salud. Estos péptidos pueden ejercer una variedad de actividades biológicas, incluyendo propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antihipertensivas y moduladoras del sistema inmune (Mohanty et al., 2014). Por lo tanto, la producción de hidrolizados proteicos puede liberar péptidos con actividad antioxidante, que pueden ser utilizados como ingredientes funcionales en la formulación de pastas y otros productos alimenticios.

La actividad antioxidante de los péptidos bioactivos es especialmente relevante, dado que los antioxidantes juegan un papel crucial en la protección del organismo contra el daño oxidativo causado por los radicales libres (Udensi et al., 2017). El estrés oxidativo está aso-

ciado con el desarrollo de diversas enfermedades crónicas, incluyendo enfermedades cardiovasculares, diabetes y cáncer (Sies, 2015). Por lo tanto, la incorporación de ingredientes con actividad antioxidante en los alimentos puede contribuir a la prevención de estas enfermedades y promover la salud general.

La integración de residuos agroindustriales como los tallos de coliflor en la formulación de pastas alimentarias ofrece una solución sostenible para la gestión de residuos, mejora la calidad nutricional y funcional del producto final. La producción de harina de tallos de coliflor y la obtención de hidrolizados proteicos con péptidos bioactivos y actividad antioxidante son enfoques prometedores que pueden transformar estos subproductos en ingredientes de alto valor añadido. Estos desarrollos no solo responden a las demandas de los consumidores por alimentos más saludables y funcionales, sino que también contribuyen a la sostenibilidad de la cadena de suministro alimentaria, alineándose con los principios de la economía circular y la valorización de residuos.

Con base en lo anterior el objetivo de esta investigación fue evaluar el perfil de textura y potencial antioxidante de una pasta alimentaria incorporando harina de coliflor y adicionada con hidrolizado proteico de frijol flor de mayo.

Materiales y métodos

Materiales

Las semillas de Frijol Flor de Mayo (*P. vulgaris*) se obtuvieron de un mercado local en el estado de Hidalgo, México. Los tallos de coliflor (*Brassica oleracea* var. botrytis) fueron proporcionados por la empresa Agrícola Escamilla. Todos los reactivos químicos fueron adquiridos a J.T. Baker (Phillipsburg, NJ, EE. UU.) y Sigma-Aldrich (Sigma-Aldrich Chemical Co., St. Louis, MO, EE. UU.).

Preparación de la harina de frijol

Los granos de Frijol Flor de Mayo seleccionados se sometieron a un secado a 65 °C en un horno de convección durante 4 h. Posteriormente, se molieron en un molino de rodillos manual y se separaron las partículas con aire comprimido para eliminar la cascara del grano. Finalmente, la harina resultante se molió en un molino de cuchillas para reducir su tamaño de partícula.

Preparación del concentrado proteico

El concentrado proteico (CP) se preparó utilizando un método de fraccionamiento en húmedo (Ruiz-Ruiz et al., 2012). Inicialmente, la harina entera se suspendió en agua destilada en una proporción de 1:10 (p/v), se ajustó a un pH de 11.0 con NaOH 1.0 N y la dispersión se agitó a temperatura ambiente durante 1 h a 400 rpm. Esta suspensión se pasó a través de un tamiz de 100 y 150 μm . El pH del filtrado se ajustó al punto isoeléctrico de la proteína (4.5) con HCl 1.0 N. La suspensión se centrifugó a 5000 rpm durante 15 min y el precipitado se almacenó en congelación hasta su uso.

Hidrólisis enzimática

La hidrólisis se realizó bajo condiciones controladas en un recipiente de reacción de 1000 mL equipado con agitador (300 rpm), control de temperatura (37 °C) y electrodo de pH (2.0 – 7.5) (Pedroche et al., 2002). El CP fue suspendido en agua destilada para producir una solución de proteína al 10% (p/v) la cual fue equilibrada a la temperatura y pH óptimos para cada proteasa antes de añadirse. La hidrólisis se realizó mediante un sistema secuencial pepsina-pancreatina. Inicialmente se realizó una predigestión con pepsina durante 45 minutos seguido de una incubación con pancreatina durante 45 minutos. Los parámetros de hidrólisis fueron relación enzima/sustrato 1:10; pH 2.0 para pepsina; pH 7.5 para pancreatina; y 37 °C (Megías et al., 2004; Yang et al., 2003). Durante la hidrólisis el pH se mantuvo constante mediante la adición de NaOH 1.0 N o HCl 1.0 N. La reacción se detuvo por calentamiento a 80 °C durante 20 minutos, seguido de centrifugación a 9880 g durante 20 min para eliminar la porción insoluble.

Preparación de la harina de tallos de coliflor

Los tallos frescos de Coliflor fueron lavados con agua potable para eliminar cualquier residuo de tierra o impurezas. Posteriormente, se cortaron en trozos pequeños y se sometieron a un proceso de deshidratación utilizando un horno de secado a una temperatura de 60 °C durante 24 h hasta obtener una humedad residual inferior al 10%. Una vez deshidratados, los trozos se molieron utilizando un molino de cuchillas hasta obtener un polvo fino. La harina obtenida se tamizó a través de un tamiz de 150 μm para garantizar una textura homogénea y se almacenó en recipientes herméticos a temperatura ambiente hasta su posterior uso.

Preparación de las pastas

Las formulaciones de pasta consistieron en mezclas de harina de trigo, harina de tallos de coliflor e hidrolizado proteico de frijol en proporciones de 100:0 (solo harina de trigo, Blanco), 80:20:20 y 80:20:30 (harina de trigo, coliflor e hidrolizado proteico), estas formulaciones fueron codificadas como PACF01 y PACF02 respectivamente. Los ingredientes se amasaron de forma manual durante 10 min para eliminar burbujas de aire y obtener una masa elástica y suave. La masa se dejó reposar en una bolsa de polietileno herméticamente cerrada a 5 °C durante 10 min antes de proceder al primer laminado en un procesador de pastas. Posteriormente, la masa laminada se cortó en fragmentos de 30 cm y se pasó por los rodillos acanalados del procesador para formar el espagueti. Las formulaciones de pasta se secaron en un horno de secado a 45 °C durante 4 h hasta alcanzar un contenido de humedad final del 12 %. Las formulaciones de pasta se almacenaron en contenedores plásticos sellados hasta su análisis posterior.

Caracterización de las pastas

Ensayo de decoloración del radical DPPH

Se determinó utilizando el método descrito por Zhang et al., (2011) con algunas modificaciones. Se mezclaron 100 µl de la muestra con 100 µl de DPPH (0.1 mM) en etanol al 99.7 %. La mezcla se agitó durante 10 s y se incubó durante 30 min en una habitación oscura a temperatura ambiente. Se utilizó etanol en lugar de DPPH para el blanco, mientras que agua destilada en lugar de muestra para el control. La capacidad de eliminación se midió espectrofotométricamente (espectrofotómetro UV/VIS UV mini 1240, SHIMDZU, Kyoto, Japón) monitorizando la disminución en la absorbancia a 515 nm. La capacidad de eliminación de radicales DPPH se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Actividad de eliminación-radical DPPH \%} = \frac{A_{\text{Blanco}} - A_{\text{Muestra}}}{A_{\text{Control}}} \times 100$$

Donde A Muestra, A Blanco y A Control son las absorbancias de la muestra, el blanco y el control, respectivamente.

Ensayo de decoloración del radical ABTS^{•+}

El radical catión ABTS^{•+} fue producido mediante la reacción del ácido 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS) con persulfato de potasio (Pukalskas et al., 2002). Se preparó una solución madre del reactivo ABTS a una concentración 2 mM en 50 mL de una solución salina tamponada con fosfato (PBS) preparada a partir de 4.0908 g de NaCl, 0.1347 g de KH₂PO₄, 0.7098 g de Na₂HPO₄ y 0.0749 g de KCl disueltos en 500 mL de agua destilada. El catión radical ABTS^{•+} se produjo mediante la reacción de 10 mL de la solución madre de ABTS con 40 µL de una solución de K₂S₂O₈ a 70 mM y permitiendo que la mezcla se mantuviera en oscuridad a temperatura ambiente durante 16-17 h antes de su uso. El contenido de compuestos antioxidantes en la muestra se analizó diluyendo la solución ABTS^{•+} con PBS hasta una absorbancia de 0.800 ± 0.030 UA a 734 nm. Después de añadir 990 µL de la solución ABTS diluida ($A_{734 \text{ nm}} = 0.800 \pm 0.030$) a 10 µL de ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico (TROLOX) como estándar (concentración final de 0.5–3.5 mM) en PBS, la absorbancia se leyó a temperatura ambiente exactamente 6 minutos después de la mezcla inicial. La disminución porcentual en la absorbancia a 734 nm se calculó y se representó como función de la concentración de antioxidante en la muestra, o de Trolox para los datos de referencia estándar. Para calcular el coeficiente antioxidante equivalente de Trolox (TEAC), la pendiente del porcentaje de inhibición de la absorbancia versus la concentración de antioxidante se dividió por la pendiente del gráfico de Trolox.

Perfil de textura

Para el análisis de perfil de textura de la pasta cocida y sin cocer se obtuvieron datos dimensionales como longitud, ancho y espesor utilizando un vernier automático. Posteriormente, se preparó una solución salina (NaCl) a 0.1 N, y se cocieron las diferentes formulaciones de pasta durante 5 min a 95 °C en una parrilla de calentamiento. Enseguida, se escurrieron en un tamiz y se dejaron enfriar durante 10 min. Finalmente, se llevó a cabo el análisis de perfil de textura utilizando un texturómetro (Brookfield, pro CT3 V1, USA), con la geometría TA-53, tanto en las muestras de pasta cocidas como en las no cocidas, a una velocidad de 1 mm/s, con una carga de activación de 3 g y un total de dos ciclos. Todas las formulaciones se analizaron por quintuplicado.

Determinación de tensión

Para la determinación de tensión de la pasta cocida y sin cocer se obtuvieron datos dimensionales como longitud, ancho y espesor utilizando un vernier automático. Posteriormente, se preparó una solución salina (NaCl) a 0.1 N, y se cocieron las diferentes formulaciones de pasta durante 5 min a 95 °C en una parrilla de calentamiento. Enseguida, se escurrieron en un tamiz marca y se dejaron enfriar durante 10 min. Finalmente, se determinó la tensión en un texturómetro pro CT3 V1, marca Brookfield, utilizando la geometría TA DGF, en las muestras de pasta coccidas y sin cocción a una velocidad de 1mm/s, con una carga de activación de 5g, a un ciclo. Todas las formulaciones se analizaron por cuadruplicado.

Análisis estadístico

Todos los resultados se expresaron como la media \pm desviación estándar. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, utilizando el software Minitab 17 statistical. Se empleó la prueba de Tukey para la comparación por pares con un nivel de confianza del 95%.

Resultados

Actividad antioxidante en el hidrolizado proteico

El hidrolizado proteico de frijol flor de mayo (HPFFM) obtenido mediante la hidrólisis secuencial con las enzimas pepsina y pancreatina presentó una significativa actividad captadora de radicales libres DPPH (Tabla 1). Este resultado sugiere la capacidad de los péptidos bioactivos generados para actuar como compuestos antioxidantes debido a la presencia de ciertos aminoácidos que actúan como donadores de hidrógeno (Singh et al., 2023; Zhu et al., 2022). Asimismo, el proceso de hidrólisis enzimática utilizado libero péptidos pequeños con una estructura adecuada para interactuar con radicales libres. Además, la hidrólisis secuencial podría estar mejorando la exposición de sitios activos en los péptidos, lo cual incrementa su capacidad antioxidante. Algunos estudios han demostrado el efecto de la secuencia de hidrólisis sobre la composición y actividad de los péptidos generados por este proceso, por lo tanto, la metodología empleada fue crucial para optimizar la actividad antioxidante (Castro et al., 2018).

El hidrolizado proteico de fríjol obtenido mediante la hidrólisis secuencial con pepsina y pancreatina mostró un valor TEAC de 1.71 ± 0.07 mM/mg de proteína. Este resultado sugiere que los péptidos liberados de las proteínas del frijol flor de mayo mediante este proceso son los responsables de la actividad antioxidante observada. La presencia de aminoácidos específicos como tirosina, histidina y cisteína, conocidos por sus propiedades antioxidantes, es fundamental. Estos péptidos pueden donar átomos de hidrógeno o electrones a los radicales libres, estabilizándolos y deteniendo la reacción en cadena de oxidación (Czelej et al., 2022).

Actividad antioxidante en las pastas

La actividad promedio de captación de radicales DPPH y ABTS fue mayor en general en los tratamientos de pasta seca en comparación con los valores obtenidos por el hidrolizado proteico de frijol flor de mayo (Tabla 1). La inclusión del HPFFM aumentó los porcentajes de DPPH y valores de TEAC en los tratamientos de pasta, lo que sugiere que el HPFFM fue responsable de la mayor actividad biológica residual. Los valores en las pastas sugieren la interacción de los péptidos bioactivos con el radical en los ensayos de decoloración DPPH y ABTS, en otras palabras, las proteínas contienen péptidos bioactivos con actividad antioxidante (Castro et al., 2018).

Tabla 1. Actividad antioxidante del hidrolizado proteico y formulaciones de pastas

	Ensayo de Decoloración del Radical DPPH (%)	Ensayo de Decoloración del Radical ABTS•+ (TEac)
HPFFM	83.96 + 0.88 ^a	1.71 + 0.07 ^a
PACF01	82.59 + 0.81 ^a	1.89 + 0.05 ^a
PACF02	94.13 + 0.21 ^b	2.09 + 0.14 ^a

HPFFM: Hidrolizado proteico de fríjol flor de mayo,

PACF01: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 20 % p/p de hidrolizados proteicos de fríjol flor de mayo.

PACF02: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 30 % p/p de hidrolizados proteicos de fríjol flor de mayo.

Resultados expresados como media ± desviación estándar de 5 mediciones.

Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

El análisis estadístico de varianza (ANOVA) para el perfil de textura de las pastas sin cocción se presenta en la Tabla 2. Estos resultados indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en las características de dureza, fracturabilidad, adhesividad y gomosidad. En términos de dureza, no se presentó diferencia estadísticamente significativa entre formulaciones. Estos resultados, son similares a lo reportado por Granito et al., (2014) en pastas parcialmente sustituidas con harinas de leguminosas. Estos autores atribuyeron la dureza al incremento del contenido de proteínas. Zhao et al., (2005), reportaron un incremento en la dureza de pastas sustituidas parcialmente (5, 10, 20 y 30 %) con harinas de lentejas, arvejas y garbanzos. Rosa-Sibakov et al., (2016) también encontraron un incremento en la dureza de pastas elaboradas con leguminosas.

La fracturabilidad es un parámetro que indica la resistencia de la pasta a fracturarse, por ejemplo, al ser manipulada durante una operación de cocción (Martínez, 2010). Los resultados del análisis de varianza no mostraron una tendencia significativa a ser más frágil. A partir de los datos obtenidos, se interpretó que la adición del hidrolizado proteico, hasta cierto límite, contribuyó a una estructura más firme en las formulaciones PACF01 y PACF02 en comparación con la pasta elaborada solo con harina de trigo (Blanco). La adhesividad, o pegajosidad, de la pasta está relacionada con la cantidad y gelatinización del almidón, y desde un punto de vista sensorial, se define como la fuerza requerida para eliminar el material adherido a la boca (generalmente al paladar) durante el proceso de ingestión de alimentos. Por otro lado, la gomosidad se refiere a la energía requerida para desintegrar un alimento semisólido a un estado listo para ser deglutido, combinando baja dureza y alta cohesividad (González et al., 2015).

En cuanto a los parámetros de textura como dureza y cohesividad, las formulaciones PACF01 y PACF02, que contienen al hidrolizado proteico, tendrían una mayor aceptabilidad entre los consumidores finales, en estas formulaciones no existen diferencias estadísticamente significativas en el análisis de varianza del perfil de textura.

Tabla 2. Análisis de perfil de textura en pastas sin cocción

Formulación	Dureza (gf)	Adhesividad (mJ)	Fracturabilidad (gf)	Cohesividad	Elasticidad (mm)	Gomosidad (gf)	Masticabilidad (mJ)
Blanco	172 ± 94.3b	0.0±0.0a	174.4±100.7 b	0.79 ± .0212 a	2.106±3.887 a	138.6± 75.2 b	3.50±6.83 a
PACF01	997.4±1021b	0.0±0.0 a	1060±1128 b	0.89±0.1552 a	3.934± 7.210 a	911.4± 999.1 b	41.92±79.12 a
PACF02	26.4±14.62b	0.0±0.0 a	3.8±0447 b	0.67±0.5411 a	0.766±0.0477 a	11.4±7.797 b	0.1±0.1 a

PACF01: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 20 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
PACF02: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 30 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
 Resultados expresados como media ± desviación estándar de 25 mediciones.
 Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa (p<0.05).

Determinación de la textura en pastas con cocimiento

Los parámetros de textura desempeñan un papel crucial en la calidad después de la cocción de las pastas alimentarias (Sozer et al., 2007). La calidad óptima de la pasta se caracteriza por una firmeza y elasticidad superiores, comúnmente conocidas como “al dente”. La evaluación precisa de la calidad de cocción de la pasta incluye parámetros primarios, como dureza, cohesión, elasticidad y adhesividad, y parámetros secundarios como fracturabilidad, masticabilidad y gomosidad (Torres et al., 2015). Los resultados del análisis estadístico de varianza ANOVA para el análisis de perfil de textura en pastas cocidas se muestran en la Tabla 3. Estos resultados señalan diferencias estadísticamente significativas en las características de adhesividad, cohesividad y elasticidad.

El análisis del perfil de textura en pasta cocida revela que la formulación PACF01 muestra una diferencia estadísticamente significativa en la variable de adhesividad en comparación con la formulación PACF02, así como con la muestra de control (Blanco). Esto sugiere una relación entre la adhesividad en las pastas alimentarias y la cantidad de almidón y su gelatinización durante la cocción, ya que los cambios en la microestructura de la pasta y la uniformidad de la pasta seca se ven afectados por la difusión de agua (Libres et al., 2013). La gelatinización del almidón y la coagulación de las proteínas son los principales cambios estructurales que ocurren durante la cocción. Estas transformaciones suelen ocurrir a temperaturas y niveles de humedad similares. Varios factores influyen en las características de la pasta cocida, como la calidad y cantidad de proteínas, las condiciones de secado y la composición del agua utilizada durante la cocción (Martínez et al., 2017).

En cuanto a la cohesividad, medida como la velocidad a la que las hebras de pasta se desintegran, se observó que la formulación PACF01 mostró una cohesividad significativamente menor en comparación con las otras formulaciones, aunque no se observaron diferencias tan significativas entre estas últimas. Peña (2019) enfatiza que un secado adecuado confiere estabilidad, fuerza, cohesión y un mejor desempeño durante la cocción a la pasta, además de reducir el riesgo de crecimiento microbiológico y prolongar su vida útil.

Al evaluar la elasticidad, medida como la capacidad del producto para volver a su forma original después de una compresión parcial, se observó que ambas formulaciones (PACF01 y PACF02), mostraron una elasticidad estadísticamente similar. Esto sugiere la capacidad del gluten para proporcionar elasticidad está influenciada por los enlaces disulfuro intermoleculares entre las gluteninas, mientras que la viscosidad está determinada por los enlaces disulfuro intramoleculares de la gliadina (Navarrete, 2013).

Tabla 3. Análisis de perfil de textura en pasta con cocción

Formulación	Dureza (gf)	Adhesividad (mJ)	Fracturabilidad (gf)	Cohesividad	Elasticidad (mm)	Gomosisidad (gf)	Masticabilidad (m)
Blanco	56 ± 33.44 ^a	0.04 ± 0.08 ^a	3.8 ± 1.30 ^a	0.54 ± 0.14 ^{ab}	0.46 ± 0.12 ^c	30.4 ± 17.94 ^a	0.14 ± 0.05 ^a
PACF01	282 ± 289 ^a	0.21 ± 0.09 ^{ab}	231 ± 352 ^a	0.35 ± 0.28 ^b	0.93 ± 0.45 ^a	161 ± 219 ^a	1.47 ± 2.04 ^a
PACF02	655 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.0 ^b	685 ± 0.0 ^a	0.65 ± 0.0 ^{ab}	0.95 ± 0.0 ^a	444 ± 0.0 ^a	4.1 ± 0.00 ^a

PACF01: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 20 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
PACF02: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 30 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
 Resultados expresados como media ± desviación estándar de 25 mediciones.
 Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa (p<0.05).

Determinación de la tensión en pastas sin cocimiento

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la deformación y el trabajo realizado a las diferentes formulaciones de pastas sin cocción. En cuanto a la deformación, los valores no indican diferencias significativas entre las distintas formulaciones. Esto sugiere que las tres pastas presentan un comportamiento similar en términos de su capacidad para deformarse bajo carga debido a la uniformidad en los ingredientes básicos de las pastas, lo que posiblemente ha generado propiedades mecánicas comparables entre las muestras. Por otra parte, se observó una diferencia estadísticamente significativa de la formulación PACF01 con respecto al Blanco y la formulación PACF02. Esta diferencia indica que la formulación PACF01 requiere un trabajo significativamente mayor para deformarse. Este comportamiento se asocia a la presencia de proteínas que permitieron mejorar la estructura o la resistencia de la pasta. Esta mayor resistencia podría requerir una cantidad significativamente mayor de trabajo para lograr la misma deformación que las otras formulaciones (Sumnu y Sahin, 2000).

Tabla 4. Determinación de la tensión en pastas sin cocción

Formulación	Deformación (%)	Trabajo (mJ)
Blanco	11.85 ± 8.29 ^a	3.07 ± 3.40 ^{ab}
PACF01	9.67 ± 0.72 ^a	2.33 ± 0.59 ^a
PACF02	8.93 ± 1.98 ^a	1.75 ± 0.70 ^{ab}

PACF01: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 20 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
PACF02: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 30 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
Resultados expresados como media ± desviación estándar de 25 mediciones.
Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa (p<0.05).

Determinación de la tensión en pastas con cocimiento

La deformación y el trabajo son parámetros importantes en la evaluación de la textura de las pastas, ya que reflejan la resistencia y la extensibilidad del producto durante la masticación (Peressini y Sen-

sidoni, 2009). De acuerdo con los resultados del ANOVA, no hay evidencia suficiente para concluir que las formulaciones con diferentes proporciones de harina de trigo, harina de tallos de coliflor e hidrolizado proteico de frijol tengan un efecto significativo sobre las características mecánicas específicas evaluadas. Este comportamiento podría ser debido a que, en las formulaciones, a pesar de las variaciones en los ingredientes, mantienen una composición estructural similar en términos de proteínas y almidones, componentes principales que influyen en la deformación y el trabajo. Esto podría significar que las cantidades relativas de harina de trigo, harina de tallos de coliflor, junto con el hidrolizado proteico añadido, no alteran sustancialmente la matriz proteica de la pasta (Sumnu y Sahin, 2000).

Tabla 5. Determinación de la tensión en pastas con cocción

Formulación	Deformación (%)	Trabajo (mJ)
Blanco	11.85 ± 8.29 ^a	3.06 ± 3.40 ^a
PACF01	9.67 ± 0.71 ^a	2.33 ± 0.59 ^a
PACF02	8.93 ± 1.97 ^a	1.75 ± 0.70 ^a

PACF01: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 20 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
PACF02: Pasta de harina de trigo adicionada con 20% p/p de harina de coliflor y 30 % p/p de hidrolizados proteicos de frijol flor de mayo.
 Resultados expresados como media ± desviación estándar de 25 mediciones.
 Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa (p<0.05).

Conclusión

La hidrólisis enzimática del concentrado proteico de frijol produjo péptidos bioactivos con actividad antioxidante. Las pastas producidas a partir de una mezcla de harina de trigo, harina de coliflor e hidrolizado proteico fueron funcionalmente viables de acuerdo con los resultados mostrados en el análisis de perfil de textura. La incorporación del hidrolizado proteico permitió la producción de pasta funcional con actividad antioxidante. Por lo tanto, la formulación PACF02 podría ser comercializada debido a que mantiene sus propiedades de textura y actividad antioxidante.

Bibliografía

- Castro, E., Villalón, M., Sáez, A., & Montero, L. (2018). Effect of Enzymatic Hydrolysis on the Antioxidant Activity of Whey Protein Hydrolysates. *Journal of Dairy Science*, 101(11), 9028-9036.
- Czelej, M., Garbacz, K., Czernecki, T., Wawrzykowski, J., & Waśko, A. (2022). Protein Hydrolysates Derived from Animals and Plants—A Review of Production Methods and Antioxidant Activity. *Foods*, 11, 1953.
- Figueroa, J. D. (2020). The Global Pasta Industry: Market Trends and Future Outlook. *Journal of Culinary Science & Technology*, 18(3), 251-267. doi:10.1080/15428052.2020.1724865.
- Fernández-López, J., & Pérez-Álvarez, J. A. (2001). Functional properties of gelatin hydrolysates obtained from different sources and their relation with molecular composition. *Food Chemistry*, 73(4), 461-469. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00353-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00353-8)
- Fernández-Tomé, S., Hernández-Ledesma, B., & Ramos, M. (2014). Bioactive peptides and hydrolysates. *Foods*, 3(4), 450-457. <https://doi.org/10.3390/foods3040450>
- Gómez, B., García, F., & Martínez, E. (2020). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en la elaboración de nuevos productos alimenticios. *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4(2), 112-125.
- González, A., Alvis, A., & Arrázola, G. (2015). Efecto del Recubrimiento Comestible en las Propiedades de Trozos de Batata (*Ipomoea Batatas* Lam) Fritos por Inmersión: Parte 1: Textura. *Información Tecnológica*, 26(1), 95-102. doi:10.4067/s0718-07642015000100011
- Granito, M., Pérez, S., & Valero, S. (2014). Calidad de cocción, aceptabilidad e índice glicémico de pasta larga enriquecida con leguminosas. *Revista Chilena de Nutrición*, 41(4), 425-432.
- Libres, P., Durante, D. E. G., & Proceso, E. L. (2013). Cambios en las características estructurales y reológicas de pastas libres de gluten durante el proceso de cocción. *CyTA - Ciencia y Tecnología - Alimentación*, 11(4), 606-611.
- Marti, A., & Pagani, M. A. (2013). "What can play the role of gluten in gluten free pasta?" *Trends in Food Science & Technology*, 31(1), 63-71.
- Martínez, C. (2010). Utilización De Pastas Como Alimentos Funcionales. *Universidad Nacional De La Plata*, 1, 4-180.
- Martínez, E., Criollo, J., Silverio, C., & Díaz, R. (2017). Pruebas de cocción de pastas alimenticias elaboradas con harina de trigo - almidón de banana Cooking test of food pasta preaped with wheat

- fluor - banana starch - Juliana Criollo Feijoo. *Revista Cumbres*, 4(1), 9–16.
- Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., & Hernández-Ledesma, B. (2017). Bioactive Compounds in Brassica Oleracea L. Var. Italica: Influence of the Food Technological Process. *Current Pharmaceutical Design*, 23(19), 2835-2843. <https://doi.org/10.2174/1381612823666170105155424>
- Megías, C., Yust, M. M., Pedroche, J., Lquarit, T., Giron-Calle, J., Alaíz, M., Millán, F., & Vioque, J. (2004). Purification of an ACE inhibitory peptide after hydrolysis of sunflower (*Helianthus annuus* L.) protein isolates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(7), 1928–1932.
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>
- Mohanty, D. P., Mohapatra, S., Misra, S., & Sahu, P. S. (2014). Bioactive Peptides: Sources, Health Benefits, and Their Potential Applications. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 20(3), 391-424. <https://doi.org/10.1007/s10989-014-9402-4>
- Navarrete, J. A. (2013). Elaboración y caracterización de pasta funcional con adición de harina de bagazo de uva. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México.
- Pedroche, J., Yust, M. M., Girón-Calle, J., Alaiz, M., Millán, F., & Vioque, J. (2002). Utilisation of chickpea protein isolates for production of peptides with angiotensin I-converting enzyme (ACE)-inhibitory activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(9), 960–965.
- Peña, A. (2019). Estandarización de método alternativo para la determinación de humedad en pastas alimenticias secas. (Tesis de grado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia.
- Peressini, C., & Sensidoni, A. (2009). Evaluación de la calidad de la pasta mediante análisis instrumental. *Food Research International*, 42(1), 85-92.
- Pukalskas, A., Teris A., Van Beek, Rimantas, P., Venskutonis, Jozef P.H., Linszen, Albertus van Veldhuizen, & Aede de Groot. (2002). Identification of Radical Scavengers in Sweet Grass (*Hierochloe odorata*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2914-2919.
- Rosa-Sibakov, N., Heiniö, R.-L., Cassan, D., Holopainen-Mantila, U., Micard, V., Lantto, R., y Sozer, N. (2016). Effect of bioprocessing and fractionation on the structural, textural and sensory proper-

- ties of gluten-free faba bean pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 67, 27–36. doi: 10.1016/j.lwt.2015.11.032
- Ruiz-Ruiz, J. C., Dávila-Ortíz, G., Chel-Guerrero, L. A., & Betancur-Ancona, D. A. (2012). Wet fractionation of hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds and characterization of protein, starch and fiber fractions. *Food Bioprocess and Technology*, 5(5), 1531–1540.
- Sies, H. (2015). Oxidative stress: A concept with a history. *Free Radical Biology and Medicine*, 85, 137-149. doi:10.1016/j.freeradbiomed.2015.05.021
- Singh, B. P., Bangar, S. P., Alblooshi, M., Ajayi, F. F., Mudgil, P., & Maqsood, S. (2023). Plant-derived proteins as a sustainable source of bioactive peptides: recent research updates on emerging production methods, bioactivities, and potential application. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(28), 9539–9560.
- Smith, J., & Brown, A. (2020). Innovative Use of Agro-industrial By-products in Food Formulation: Enhancing Nutritional Quality and Sustainability. *Journal of Food Science and Technology*, 57(3), 1205-1216. doi:10.1007/s13197-019-04157-8.
- Sozer, N., Dalgıç, A. C., & Kaya, A. (2007). Thermal, textural and cooking properties of spaghetti enriched with resistant starch. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 476–484. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.11.026.
- Sumu, S. G., & Sahin, S. (2000). Influencia de la composición de la harina y el proceso de elaboración en la textura de la pasta. *Journal of Cereal Science*, 32(3), 219-227.
- Torres, G., David, J., González, M., José, K., Acevedo, C., & Diofanor. (2015). Análisis del Perfil de Textura en Frutas, Productos Cárnicos y Quesos. *Reciteia*, 14(2), 63–75.
- Udensi, P. C., Ogbuewu, I. P., & Aluko, R. E. (2017). Hydrolysates and bioactive peptides from plant sources: Bioprocessing and potential applications in human health. *Journal of Functional Foods*, 37, 113-126. doi:10.1016/j.jff.2017.06.006
- Yang, Y., Marczak, E. D., Yokoo, M., Usui, H., & Yoshikawa, M. (2003). Isolation and antihypertensive effect of angiotensin I-converting enzyme (ACE) inhibitory peptides from spinach Rubisco. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(17), 4897-4902.
- Zhang, L., Ravipati, A. S., Koyyalamudi, S. R., Jeong, S. C., Reddy, N., Smith, P. T., Bartlett, J., Shanmugam, K., Münch, G., & Wu, M. J. (2011). Antioxidant and anti-inflammatory activities of selected medicinal plants containing phenolic and flavonoid compounds.

Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59(23), 12361-12367.
Zhu, Y., Lao, F., Pan, X., & Wu, J. (2022). Food Protein-Derived Antioxidant Peptides: Molecular Mechanism, Stability and Bioavailability. *Biomolecules*, 12(11), 1622.

Capítulo 8

Diseño del sistema IOT para medición de temperatura, PH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y potencial Redox en acuaponía

Luz del Carmen García Rodríguez, Alejandro Espinosa Calderón, Carlos Alberto Flores Gómez, Oscar Mauricio Álvarez Rosas & Juan Francisco Calderón Gutiérrez

Resumen

La acuaponía es un sistema de producción de alimentos que combina el cultivo de peces con el cultivo de plantas sin suelo, en un sistema cerrado. En estos sistemas, los peces producen residuos que se convierten en nutrientes para las plantas, a su vez las plantas filtran y limpian el agua para los peces. Esto permite cultivar plantas y criar peces de manera sostenible. Para que este ciclo sea eficiente, es esencial mantener las condiciones ideales en ambos sistemas. Este capítulo presenta la implementación digital de un sistema que muestra en tiempo real las variables de temperatura, pH, Oxígeno disuelto (OD), Conductividad Eléctrica (CE), Potencial de Oxido-Reducción (ORP) y pH. La finalidad del monitoreo es detectar y corregir cualquier desviación de las condiciones ideales para asegurar que el sistema de acuaponía funcione de manera eficiente, garantizando así el crecimiento óptimo de peces y plantas. En la implementación se utilizó la gama de sensores AtlasScientific para el monitoreo de variables y la tarjeta Raspberry Pi para el control de la información. Como resultado se generó un sistema capaz de

recolectar, analizar y distribuir información que permite visualizar los datos obtenidos de cada sensor, así como su comportamiento gráfico a través de Internet de las Cosas o mediante un monitor serie. Además, es posible almacenar la información en una base de datos de Excel de manera automática. Por lo cual se demuestra la importancia de la electrónica aplicada a biosistemas ya que permite mantener monitorizadas variables importantes para el correcto desarrollo de los peces y plantas, y posteriormente generar su respectivo control.

Introducción

El pescado es una importante fuente de proteína animal de alta calidad y biodisponibilidad, además aporta micronutrientes únicos, como ácidos grasos omega-3, vitaminas y minerales. Estos nutrientes juegan un papel esencial en el desarrollo físico y cognitivo del ser humano, desde el crecimiento fetal, hasta la niñez; así mismo, se recomienda a los adolescentes y adultos consumir pescado, para llevar una nutrición sana (FAO, 2022). La asociación médica americana recomienda comer pescado dos veces por semana.

Tilapia es el nombre genérico de peces que pertenecen a la familia de los cíclidos, donde la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es la más cultivada en la piscicultura actual. Crece en aguas cálidas, aunque pueden consentir cierto rango de salinidad (Mohamed et. al, 2021). Se adaptan bien a crecer en cautiverio y confinadas en estanques y pueden tolerar altas densidades de población. Poseen crecimiento acelerado, y consume alimentos a base de subproductos agrícolas; en comparación a otras especies, resistente enfermedades si crece a condiciones óptimas. Además, su carne blanca goza de aceptación entre los consumidores, ya que tiene buen sabor y textura adecuada, y no tiene espinas intramusculares. Por lo que su cultivo en estanques de acuicultura sigue despertado gran interés en el mundo.

Los sistemas intensivos de acuicultura, son cultivados en zonas donde existe alta disponibilidad de recursos hídricos por grandes productores con acceso al capital y alta tecnología, como por ejemplo “Regal Springs” compañía suiza que tiene importantes instalaciones en Chiapas, México; Honduras y otras partes del mundo.

En contraste, la acuicultura en estanques con agua de pozo y otras fuentes de agua continental, realizada por pequeños productores rurales del centro del país, donde el acceso al recurso hídrico es limitado, se realiza en sistemas de baja intensidad. Para hacer al proceso rentable, eficiente y sostenible, se requiere aumentar el régimen de cultivo a

uno intensivo o semi intensivo. No obstante, en ambos regímenes de operación señalados se presentan desafíos técnicos y operativos, requieren tener acceso a la digitalización y las TICs.

En 2021, en México se importaron 67 mil toneladas de tilapia desde China. De 2021 a julio de 2022, se importaron 400 millones de dólares, que equivalen a casi cuatro veces el presupuesto de CONAPESCA (Miranda, 2022). Por otra parte, la piscicultura ha ayudado a pequeños productores en diversas partes del mundo, a cambiar su forma de vida, y además dan trabajo a muchas otras personas (N’Souvi, 2020).

Lo anterior expuesto, da una idea del potencial que tiene la acuicultura en el territorio nacional, actividad que puede ser realizada por pequeños productores rurales, incluyendo mujeres y personas de la tercera edad, beneficiando a sus familias. No obstante, implementarlo en las regiones bajo, centro y norte del país, representa un desafío adicional, por los bajos niveles de recarga de fuentes de aguas continentales, lo que dirige a implementar metodologías con uso eficiente del recurso hídrico, como el sistema de cultivo acuícola con recirculación de agua (SRA) que incorpora un sistema biofiltración, o bien, el “sistema acuapónico” que acopla la piscicultura con la producción de vegetales en hidroponía (sus raíces absorben los nitratos y “limpian” el agua). Y aunque, por una parte, se presenta el reto de proporcionar apoyos financieros para solventar los altos costos de capital (inversión inicial) y de capacitación específica a los campesinos rurales, por otra parte, facilita la producción eficiente y sostenible de alimentos, posibilitando una fuente importante de ingresos y de nutrientes de alta calidad biológica a poblaciones vulnerables de escasos recursos, quienes tienen un limitado acceso a ello.

La Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO), estima que para 2030 la producción global de alimentos acuáticos aumente un 15%. Para enfatizar en el cuidado de los ecosistemas, la biodiversidad y la equidad social, sugiere la llamada transformación azul: acciones y estrategias innovadoras que mejoren la acuicultura en forma sostenible, aumentando su aportación a dietas saludables y accesibles, que fomenten el crecimiento equitativo. Las TICs y los sistemas inteligentes, juegan un papel preponderante, al utilizar sensores automáticos de calidad del agua, así como de inteligencia artificial para optimizar la conversión de alimento-peíz, mejorar la salud de la población acuática. Además, se pueden utilizar para crear sistemas de alerta temprana que adviertan a los productores sobre eventos críticos que afectan la producción. Los avances tecnológicos permiten, reducir costos de producción, hacer uso eficiente de insumos y recursos, y con las mejores prácticas, generar

operaciones eficientes, resilientes y sostenibles. Sin embargo, para implementar estas soluciones, se requiere de apoyo técnico, transferencia de tecnología, investigación y de asociaciones estratégicas (FAO, 2022).

Factores abióticos que afectan la acuicultura

La temperatura y el potencial de hidrogeno (pH) del agua afectan directamente a los peces y a los microorganismos benéficos presentes en el sistema, por otra parte, también tienen influencia sobre otros parámetros importantes del proceso, como el oxígeno disuelto (OD) en el agua, e incluso determina la toxicidad del nitrógeno amoniacal. La densidad de cultivo (pece/m³) en estanques, está restringida también a factores de importancia crítica. Es necesario monitorear, controlar y mantener el apropiado nivel de ellos, para asegurar tanto la efectividad del sistema productivo, como para hacer uso eficiente de los recursos (Hager et al., 2021).

Para entender el efecto de los diferentes factores abióticos en el sano desarrollo de los organismos acuícolas, y como afecta la variación de sus niveles en el sistema, se describe a continuación una breve revisión.

Temperatura

Factores ambientales como la temperatura pueden afectar la eficiencia de las enzimas digestivas en peces, ocasionando complicaciones en su crecimiento y su salud. Por lo tanto, la temperatura influye directamente en su tasa metabólica. La especie *Oreochromis niloticus* crece de manera óptima a temperaturas entre 22 y 30 °C; por debajo de ese rango, se estresa y se afectan sus funciones vitales. Por ejemplo, está reportado que a 18 °C ya no se reproduce, a los 16 °C deja de alimentarse, la temperatura baja letal para tilapia es de 10°C. Por otra parte, también enfrenta estrés a 37°C y es susceptible enfermedades y presenta mortalidad a temperaturas mayores a los 40°C. En climas templados o fríos, la producción de tilapia se realiza en invernaderos, que mantienen la temperatura adecuada para su desarrollo, evitar el estrés por bajas temperaturas, lo cual les permite el funcionamiento apropiado de su sistema inmune y así resistir agentes patógenos; el cultivo en estanque aislados, asegura además la inocuidad y evita el ataque de depredadores (Dey et al., 2023; Moyo y Rapatsa, 2021).

Oxígeno Disuelto (OD)

La principal limitante en la acuicultura es el oxígeno disuelto disponible, ya que es necesario para la respiración de los peces y de las microalgas durante la noche, así como también para la descomposición por microorganismos de los residuos en el estanque (DBO) y en el biofiltro.

Por naturaleza, la concentración de saturación del O_2 que se disuelve en agua es limitada. Además, el OD tiene una relación inversamente proporcional con la temperatura. Cuando el agua está a $0^\circ C$ (en estado líquido), la solubilidad máxima del O_2 es de $14.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Pero, cuando la temperatura está a condiciones óptimas para tilapia, la máxima solubilidad del O_2 en agua es significativamente menor. Por ejemplo, a $25^\circ C$ o a $32^\circ C$, la máxima concentración posible de OD en agua es de 8.3 y $7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. Mientras que la mayoría de peces requieren una $OD > 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ para su crecimiento óptimo, la tilapia puede vivir a concentraciones de $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, debajo de 3 ppm presenta estrés y su metabolismo se altera significativamente presentando una baja conversión alimenticia. Una concentración menor es letal. Para mantener niveles adecuados de OD en estanques acuícolas, se debe disolver a una razón por lo menos igual a la que demandan los tanto los peces, las bacterias, y las microalgas durante la noche (Castillo Campo, 2012; Mohamed et al., 2021).

Efectos del pH y la temperatura en el Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)

El nitrógeno amoniacal total en el agua, se debe al catabolismo de las proteínas del alimento balanceado suministrado. Los peces lo desechan a través de las branquias y es muy soluble en agua. Además, el NAT también es biosintetizado por bacterias del ecosistema natural en los estanques, que aprovechan los residuos de alimento no ingerido por los peces. Se estima que se produce 1 kg de NAT por cada 34 kg de alimento balanceado, si contiene 32% de proteínas.

El NAT se conforma tanto por amoníaco “neutro” (NH_3), como por el ion amonio (NH_4^+). Ambas formas tienen efectos perjudiciales para los peces, no obstante, se ha demostrado que el amoníaco “sin carga” NH_3 es considerablemente más tóxico.

El equilibrio de la relación NH_3/NH_4^+ en solución acuosa depende tanto del pH, como de la temperatura. Por ejemplo, cuando el agua está a pH neutro, la fracción del ion amonio (NH_4^+) es mayor a 95% , mientras que a $pH > 8.8$ más del 35% del NAT está presente en su forma más tóxica.

Como regla de dedo, en el rango de pH apropiado para peces (de 6.5 a 9), el aumentar una unidad el pH, eleva al NH_3 tóxico 10 veces. Por su parte, el efecto de la temperatura sobre la concentración de NH_3 es directamente proporcional. Niveles altos de NH_3 bloquean el metabolismo del pez, afecta sus branquias, lesiona otros órganos internos, lo torna más susceptible a patógenos, y reduce su crecimiento (Castillo, 2012).

Las bacterias nitrificantes *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* presentes en el estanque de manera natural, utilizan al NAT como como fuente de energía en forma sucesiva, generan como subproductos nitrito y nitrato, respectivamente. Por otra parte, las microalgas también presentes en el agua “madura” del estanque de producción acuícola, utilizan al NAT y sus derivados como fuente de nitrógeno disminuyendo su concentración durante su actividad fotosintética. No obstante, se debe remover el NAT del agua de los estanques de peces a la misma tasa que se generan para asegurar niveles inocuos en la tilapia, por la toxicidad de NH_3 y de nitritos su concentración debe ser menor a $1 \text{ mg}^* \text{L}^{-1}$; en contraste, pueden tolerar hasta $200 \text{ mg}^* \text{L}^{-1}$ de nitratos, no obstante, su nivel casi nunca es tan elevado. Para asegurar su control, en sistemas con recirculación de agua, posterior a los estanques de cultivo, se emplea un “biofiltro” para el tratamiento del agua residual, con actividad simbiótica de *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, que crecen adheridas a la superficie de “empaques” sólidos y convierten al NAT en nitratos. En sistemas acuapónicos, el biofiltro es primordial, ya que las plantas asimilan mejor los nitratos.

Potencial Hidrógeno pH

Como es de esperarse, el pH también tiene efectos significativos tanto en el crecimiento de bacterias del filtro biológico, como en la acuaponía, para el sano desarrollo de los vegetales, que crecen con sus raíces sumergidas en el agua en recirculación (hidroponía). Como se mencionó, el pH del agua afecta muchos otros parámetros de calidad del agua y los procesos biológicos y químicos. Un pH inferior a 4.5 es peligroso para los peces. Además, el pH ácido reduce la actividad metabólica de las bacterias nitrificantes. La conductividad eléctrica y el potencial de óxido-reducción (ORP) aseguran también los objetivos mencionados.

Actualmente, la acuaponía se considera comercialmente como una solución viable para abordar la reciente crisis alimentaria mundial. Sin embargo, solo el 31% de las prácticas comerciales de acuaponía son económicamente viables y rentables debido a la falta de experiencia y

la mala gestión. La mayoría de las revisiones recientes no se han centrado en esfuerzos de investigación sobre técnicas de automatización, plataformas de comunicación o unidades de control dentro de dichos sistemas (Taha et al., 2022).

El rápido desarrollo de la tecnología de sensores, Internet, comunicaciones e informática, el estilo de vida inteligente se convertirá en una tendencia popular en nuestra vida futura (Vegesna et al., 2017). Por lo tanto, es necesario crear nuevas cosas inteligentes que puedan procesar información, autoconfigurarse, automantenerse, autorrepararse, tomar decisiones independientes y eventualmente incluso desempeñar un papel activo en su propia disposición (Pasha et al., 2018).

La tecnología de Internet de las Cosas (IoT) es una arquitectura relacionada con el diseño y desarrollo de sistemas de monitoreo de ecosistemas. Por tanto, IoT es una poderosa herramienta para otorgar a sistemas y máquinas la capacidad de comunicarse entre sí y tomar decisiones basadas en datos sin intervención humana (Taha et al., 2022).

En resumen, por lo mencionado anteriormente, el monitoreo, registro y control del pH es crítico en los sistemas de producción acuícola. Así tecnificar las instalaciones piscícolas, conduce a un menor uso y desperdicio de alimento, una mejor calidad del agua, mejorar la aireación, reducir costos laborales, estableciendo la sostenibilidad ambiental y económica de los sistemas de acuicultura.

Este documento pretende demostrar el diseño de una aplicación de monitorización en tiempo real de las principales variables que influyen en la calidad del agua. Lo anterior con la finalidad de obtener un registro y así poder generar el control de las mismas, proponer acciones para la disminuir la mortalidad, obtener un mejor manejo de los cultivos y obtener mejores resultados en la producción del pez Tilapia.

Materiales y Metodos

En esta sección se describen los materiales utilizados para el desarrollo del sistema, así como la metodología para generar el diseño del sistema de medición de variables para acuaponía basado en temperatura, conductividad eléctrica, ORP, pH y oxígeno.

Sistema de producción de peces

En primera instancia es importante adquirir los conocimientos relacionados a la crianza, sanidad y calidad del agua en el cultivo de peces para determinar factores importantes en el óptimo desarrollo de la

especie a cultivar. Por lo que fue requerido realizar una búsqueda en la literatura acerca de las principales enfermedades ocasionadas por mal manejo de la calidad del agua donde se cultiva el pez, con la finalidad de conocer las principales variables a monitorear. Las variables seleccionadas son pH, oxígeno disuelto en agua, temperatura, ORP y conductividad eléctrica en el agua ya que, si se manejan rangos de valores fuera de los especificados de estas variables para cada especie, el pez puede sufrir de estrés ocasionando vulnerabilidad a enfermedades influenciadas por patógenos que también se desarrollan de manera natural en los estanques que pueden provocar la muerte. (Rivarola, 2011).

Una vez establecidas las variables, se acondicionó el área experimental y se planeó el proceso de experimentación para el análisis del comportamiento de las variables críticas evitando así información sesgada. Finalmente se prosiguió a la medición de estas con aparatos comerciales para obtener una base de datos con los resultados.

Sensores y tarjeta de control para la implementación del sistema

Una vez analizada la información de la recolección de datos se seleccionaron los sensores para el monitoreo y la tarjeta de control para la implementación del sistema. Los sensores utilizados para el monitoreo de variables fueron los de la marca AtlasScientific (Figura 1), la cual maneja una amplia gama de sensores en el monitoreo de variables acuáticas para distintos sistemas. Este fabricante ofrece sensores para el monitoreo de pH, Oxígeno disuelto en agua, conductividad eléctrica, temperatura y ORP (AtlasScientific, 2021).

Figura 1. Sensores para el monitoreo de agua de la marca AtlasScientific



Los sensores de la Figura 1 son compatibles con la tarjeta de control Raspberry Pi, por lo cual se optó por utilizarla, además el mismo fabricante AtlasScientific, ofrece un programa para visualizar los datos de las variables en tiempo real el cual se ejecuta en el sistema operativo de la tarjeta Raspberry Pi (AtlasScientific, 2021). Por consiguiente, se procedió a la calibración y acondicionamiento de los sensores implementados para la adquisición de las variables de entrada. En esta fase es primordial el procesamiento de las señales provenientes de cada uno de los sensores, por lo que es necesario establecer un protocolo de comunicación y sincronización de cada dispositivo para el almacenamiento y transmisión de los datos.

Implementación del sistema de visualización de variables

En la gestión y monitoreo en tiempo real, se requiere de un diseño de transmisión de datos a un servidor, así como el desarrollo de una base de datos usando el administrador MySQL. Por lo tanto, es necesario la creación de una interfaz entre los sensores y la conexión a internet para acceder a las bases de datos locales y remota. En esta fase, se utilizó el Software de monitoreo de IoT Atlas para acceder fácilmente a todos los datos de sus sensores y saber en tiempo real qué está sucediendo, visualizando así la información mediante un monitor serie. Para finalizar esta fase se implementó la herramienta ThingSpeak que es una plataforma de Internet de las Cosas (IoT), que permite visualizar los datos en tiempo real desde cualquier dispositivo, a través de distintas plataformas como aplicaciones Android, nubes de internet, generar un almacenamiento de datos en un archivo de texto o de Excel de Google drive.

Montaje de circuitos

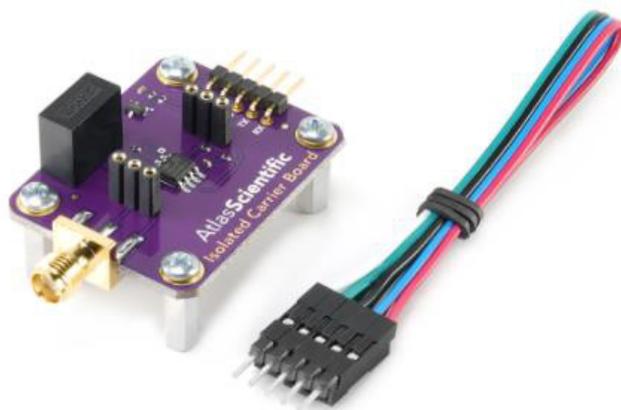
Los sensores utilizados para el monitoreo mencionados en la sección 2.2 disponen de dos tarjetas cada uno. Una tarjeta se utiliza para el acondicionamiento de la señal y la otra se encarga del aislamiento eléctrico entre la etapa de acondicionamiento y la tarjeta de control. En la figura 2 se observa el modelo de la tarjeta de acondicionamiento de señal correspondiente a cada sensor del fabricante EZO.

Figura 2. Tarjeta de acondicionamiento de señal EZO para sensores Atlas Scientific



La tarjeta de aislamiento eléctrico (Figura 3) es esencial para la conexión entre el circuito EZO y la tarjeta de control (Press, 2021)

Figura 3. Tarjeta de aislamiento eléctrico para placas EZO



La integración de las tarjetas de aislamiento eléctrico con los acondicionadores de señal de cada sensor, así como la tarjeta de control es requerida para generar la conexión entre los dispositivos y obtener un sistema capaz de recopilar y almacenar los datos de sensores. En la figura 4 se visualiza el diagrama de conexiones entre la Raspberry Pi y las tarjetas EZO, mientras que en la figura 5 se muestra el montaje final de las conexiones correspondientes a la figura 4.

Figura 4. Diagrama de conexiones entre la Raspberry Pi y las placas EZO

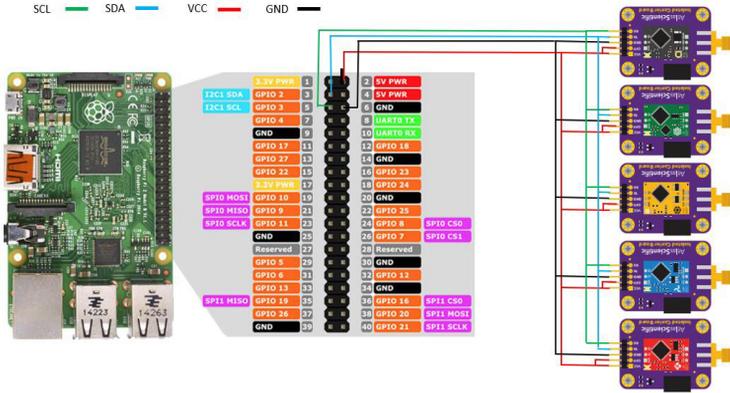


Figura 5. Montaje final de conexiones entre la Raspberry Pi y las placas EZO

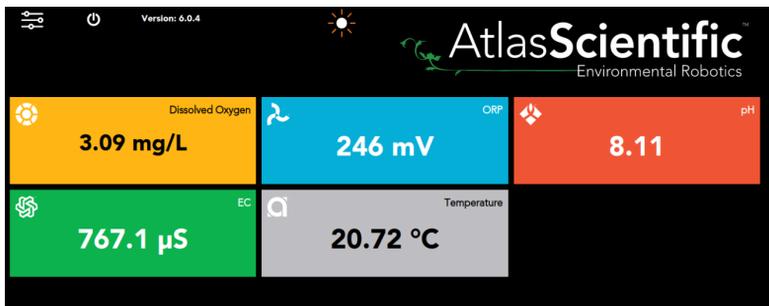


Resultados

Las pruebas del prototipo descrito en este capítulo se realizaron directamente en los estanques de los peces sumergiendo los sensores para verificar su correcto funcionamiento y visualizar los valores de principales variables que influyen en la calidad del agua como la temperatura, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, el ORP y el pH.

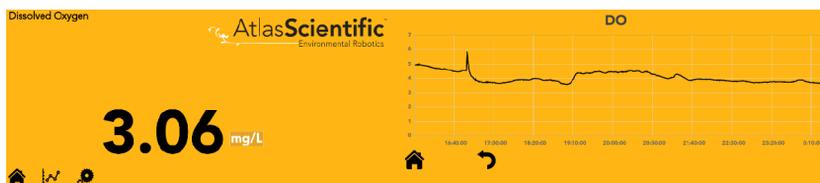
En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de cada sensor implementando el Software de monitoreo de IoT Atlas. Este software nos permite visualizar tanto los valores medidos, así como su comportamiento grafico de cada variable.

Figura 6. Interface del Software de monitoreo de IoT Atlas para visualización de datos.



Se llevó a cabo una serie de mediciones de las variables de interés para determinar su comportamiento y a su vez poder comprobar el correcto funcionamiento del sistema. En la figura 7 se muestra la gráfica y el valor promedio en tiempo real del oxígeno disuelto en agua durante un periodo de 7 horas con 30 minutos. El oxígeno es una variable importante de monitorear, ya que, si el pez es expuesto a niveles elevados de gases atmosféricos especialmente oxígeno, puede generarle la enfermedad de las burbujas. Esta enfermedad genera lesiones que se observan en el interior de los tejidos como pequeñas burbujas, especialmente bajo la piel, en los ojos, o en las aletas. Derivado de esta enfermedad puede producirse mortalidad masiva debido a embolias producidas por las burbujas. Por tal motivo es importante monitorear constantemente este valor.

Figura 7. Valor promedio de oxígeno disuelto en el agua en mg/L y su comportamiento gráfico



En la figura 8 se muestra el valor promedio, así como el comportamiento grafico de la conductividad eléctrica, monitoreado en un periodo de 18 horas. De igual manera en la figura 9 se observa para la variable ORP del agua, monitoreado en un periodo de 9 minutos. Las variables de conductividad eléctrica y ORP son importantes monitorizarlas en tiempo real, ya que al tener una sobre exposición de sales en el ambiente de desarrollo del pez puede influenciar en una baja percepción de oxígeno, provocando que el pez se estrese y posteriormente muera. Otra razón a considerar es que el agua de los estanques se recambia diariamente, aproximadamente un 10% del volumen total del estanque por lo cual el agua “sucía” (con nutrientes por eses de los peces) es reutilizada para regar camas de cultivo. Entonces, tanto la variable ORP como la conductividad eléctrica están directamente relacionadas con el aprovechamiento de las sales y minerales que la tierra ofrece a las plantas regadas.

Figura 8. Valor promedio de la conductividad eléctrica en el agua en micro siemens y su comportamiento gráfico

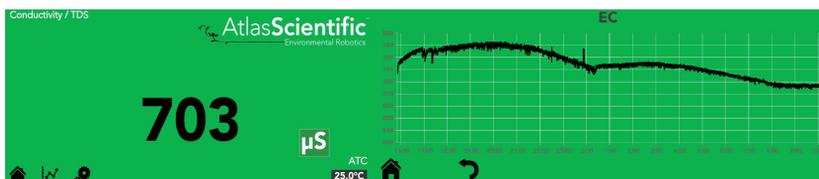
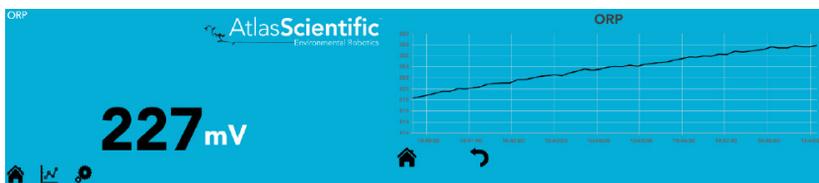
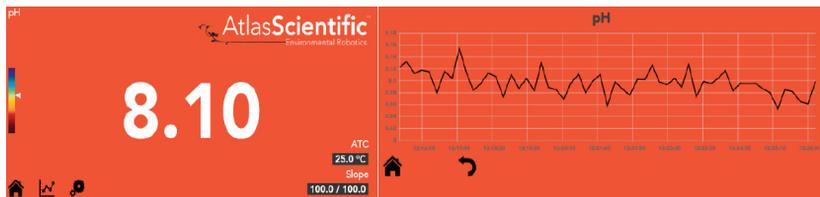


Figura 9. Valor promedio de la ORP en el agua en mili volts y su comportamiento gráfico



En la figura 10, se aprecia el comportamiento gráfico y el valor del potencial de hidrogeno (pH). Es indispensable el monitoreo de pH en el agua para asegurar que el nivel de esta variable siempre se mantenga en un intervalo de 6 a 8, debido a que las especies de peces producidas generan resultados satisfactorios en dicho intervalo de potencial de hidrogeno. En consecuencia, si el pH se encuentra fuera del intervalo antes mencionado, podrían presentarse dificultades y estrés en el pez. Los peces pueden sobrevivir a niveles altos de pH, sin embargo, no toleran cambios bruscos, dichas situaciones ocurren durante lluvias en donde los estanques no disponen de un sistema de control de entrada de agua. Cuando los peces están expuestos de forma crónica a bajos niveles de pH los síntomas se evidencian en las branquias, produciendo una lesión aguda con disfunción respiratoria y muerte, en ocasiones se visualizan daños sobre la piel, aletas y corneas. Así también se observan efectos a largo plazo en la fisiología y bajo crecimiento de los peces.

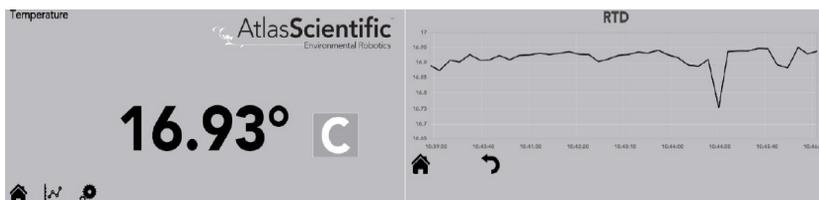
Figura 10. Valor promedio del potencial eléctrico en el agua y su comportamiento gráfico



La temperatura es una de las variables más importantes a monitorizar ya que los peces son especies poiquilotermos, esto quiere decir que son capaces de variar su temperatura corporal de acuerdo a la temperatura del medio en que viven, adaptándose a las variaciones moderadas de temperatura, en un intervalo de tolerancia que depende de cada especie en particular. En el caso de la tilapia el intervalo va desde 18 a 30 °C. Las variaciones bruscas y prolongadas fuera del rango permitido de esta variable producen estrés, disminución en las defensas, los peces tienden a disminuir su apetito y esto puede provocar la muerte o un mal desarrollo. La disminución en las defensas de los peces y la condición de estrés provocan enfermedades causadas por los agentes patógenos presentes, ya que éstos se adaptan con mayor rapidez a los cambios de temperatura en la Figura 11 se muestra el valor promedio

de temperatura monitoreado en un periodo de 8 minutos, así como la variación de su comportamiento.

Figura 11. Valor promedio de la temperatura del agua en °C y su comportamiento gráfico.



A pesar de sus muchos beneficios, la acuaponía es un ecosistema complejo con muchos parámetros críticos que deben monitorearse. Monitorear y mantener manualmente todos estos parámetros es complicado, requiere mucho tiempo y conocimiento experto multidisciplinario. Sin embargo, el Internet de las cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA) pueden ayudar a superar estos desafíos al automatizar el proceso de monitoreo y control, analizar los datos de los sensores e identificar patrones y tendencias que serían difíciles o imposibles de detectar para los humanos. Esto podría conducir al desarrollo de formas nuevas e innovadoras de optimizar los sistemas de acuaponía. La mayor parte de la literatura sobre acuaponía relacionada con la IA se centra en observaciones visuales utilizando visión artificial y procesamiento de imágenes, mientras que el uso de datos de sensores de IoT sigue en gran medida inexplorado (Channa et al., 2024).

Se ha realizado diversos estudios sobre el monitoreo de variables para un sistema de acuaponía relacionados con esta investigación, sin embargo, la mayoría se enfoca en el estudio de otros parámetros, así como el uso de otras herramientas para la aplicación. Pramono y col., se enfocaron en monitorear los parámetros de calidad del agua, incluido el pH, OD, la temperatura del agua y el amoníaco para integrarlas con aplicaciones móviles basadas en Internet. En cuanto al procesamiento de la información utilizaron la tarjeta Arduino Mega, así como los sensores para el pH (pH-4502C), temperatura (DS18B20), oxígeno disuelto (OD Gravity) y un sensor de amoníaco (MQ-135) (Pramono et al., 2023). Por otra parte, Dutta y col. solo se limitaron a monitorear parámetros como el nivel de pH, el nivel del agua, la humedad relativa, y la temperatura de forma continua. Los parámetros del sistema los muestran a través de una pantalla de cristal líquido y mediante el uso de IoT. En esta

investigación aplicaron una tarjeta Raspberry para el procesamiento de la información y los sensores de Temperatura/Humedad (DHT11), el sensor de pH (E-201-C) y el sensor ultrasónico (Dutta et al., 2018). Mientras que Nichani y col. ofrecen un sistema que monitoreará los parámetros básicos como el pH, Luz, temperatura del agua, temperatura del aire y humedad relativa determinando así la salud de las plantas y los peces. Los datos obtenidos se cargan a la nube para visualizarlos en una pantalla dinámica, implementado una transmisión inalámbrica de datos en este proyecto. Para lograr este desarrollo se utilizó la tarjeta Arduino nano y una placa de desarrollo Raspberry Pi, así como los sensores de luz (BH1750), el sensor de temperatura del aire/humedad (DHT11) y el sensor de temperatura en el agua (DS18B20) (Nichani et al., 2017). En comparación con estas investigaciones el resultado del desarrollo descrito en este capítulo, fue un sistema capaz de la recolección, análisis y distribución de la información a través de los sensores de la marca AtlasScientifi, y el uso de la tarjeta Raspberry Pi. Se implementó un monitor serie para el despliegue de los datos obtenidos de cada sensor en tiempo real. De igual manera se hizo uso del IoT para la visualización y comportamiento grafico de los parámetros monitoreados desde cualquier dispositivo, a través de distintas plataformas como aplicaciones Android, nubes de internet y generar un almacenamiento de datos en un archivo de texto o de Excel de Google drive. Los parámetros de interés fueron temperatura, pH, OD, CE y ORP en el agua. Con este desarrollo se demuestra la importancia de la electrónica aplicada a biosistemas ya que permite mantener monitorizadas variables importantes para el correcto desarrollo de los peces y plantas, y posteriormente generar su respectivo control.

De acuerdo con Channa et al., se considera que los sistemas de acuaponía actuales todavía se encuentran en su etapa primitiva y no todos los parámetros de la acuaponía se han investigado a fondo (Channa et al., 2024).

Conclusiones

Este estudio presenta el diseño de un sistema IoT de medición de variables para acuaponía basado en temperatura, pH, OD, CE y ORP. La implementación de este sistema de medición tiene como finalidad el monitoreo de las variables de interés para detectar y corregir cualquier desviación de las condiciones ideales implementando IoT. De esta manera se asegura que el sistema de acuaponía funcione de manera eficiente y garantizando el crecimiento óptimo de peces y plantas.

El resultado de este trabajo permite generar la automatización para el control de las variables de interés, implementando algunos actuadores de control como electroválvulas y bombas para el movimiento de soluciones que corrijan el pH y la conductividad eléctrica. De igual manera se puede generar un control del encendido y apagado del aireador para la oxigenación de los peces de acuerdo a las condiciones del agua haciendo un uso eficiente del dispositivo. En cuanto al control de la temperatura, es posible elevarla con resistencias termoeléctricas o con sistemas de calefacción rudimentarios.

Este desarrollo pretende demostrar el diseño de una aplicación de monitorización en tiempo real de las principales variables que influyen en la calidad del agua para obtener un registro y posteriormente poder generar el control de las mismas. El monitoreo de las variables de interés ayuda a tomar acciones para disminuir la mortalidad, obtener un mejor manejo de los cultivos y mejores resultados en la producción de cualquier pez.

Bibliografía

- AtlasScientific. (27 de Noviembre de 2021). URI: https://atlasscientific.com/?gclid=CjwKCAiA0KmPBhBqEiwAJqKK4wc9WkDKkCYHhap3JrCZUVk-K38eiSScSwU6fHc_wJEe6gytSRwVhRoCOckQAvD_BwE
- Castillo Campo, L. F. (2012). *Tilapia Roja*: Editorial Academica española.
- Dey, B. K., Verdegem, M. C. J., Nederlof, M. A. J., Masagounder, K., Mas-Muñoz, J., & Schrama, J. W. (2023). Effect of temperature on the energy utilization efficiencies of digested protein, fat, and carbohydrates in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 576, 739876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739876>.
- Channa, A. A., Munir, K., Hansen, M., & Tariq, M. F. (2024). Optimisation of Small-Scale Aquaponics Systems Using Artificial Intelligence and the IoT: Current Status, Challenges, and Opportunities. *Encyclopedia*, 4(1), 313-336. DOI: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia4010023>.
- Dey, B. K., Verdegem, M. C. J., Nederlof, M. A. J., Masagounder, K., Mas-Muñoz, J., & Schrama, J. W. (2023). Effect of temperature on the energy utilization efficiencies of digested protein, fat, and carbohydrates in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 576, 739876. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739876>

- Dutta, A., Dahal, P., Prajapati, R., Tamang, P., & Kumar, E. S. (2018, September). IoT based aquaponics monitoring system. In 1st KEC Conference Proceedings (Vol. 1, pp. 75-80). DOI: <https://www.researchgate.net/publication/327953706>.
- FAO. (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Retrieved from Rome: <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Hager, J., Bright, L. A., Dusci, J., & Tidwell, J. (2021). Aquaponics Production Manual. A Practical Handbook for Growers. Frankfort, Kentucky: Kentucky State University. https://www.researchgate.net/publication/355972997_A_Practical_Handbook_for_Growers_AQUAPONICS_Production_Manual
- Miranda, F. (2022, 20/10/2022). Importación de tilapia china es 5 veces más grande que captura de huachinango: Oceana. Milenio. Retrieved from <https://www.milenio.com/politica/sector-pesquero-enfrenta-desigualdad-importacion-tilapia-china>
- Mohamed, N. A., Saad, M. F., Shukry, M., El-Keredy, A. M. S., Nasif, O., Van Doan, H., & Dawood, M. A. O. (2021). Physiological and ion changes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under the effect of salinity stress. *Aquaculture Reports*, 19, 100567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100567>
- Moyo, N. A. G., & Rapatsa, M. M. (2021). A review of the factors affecting tilapia aquaculture production in Southern Africa. *Aquaculture*, 535, 736-386. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736386>
- N'Souvi, K., Sun, C., Egbendewe-Mondzozo, A., Tchakah, K. K., & Alabi-Doku, B. N. (2020). Analysis of the impacts of socioeconomic factors on hiring an external labor force in tilapia farming in Southern Togo. *Aquaculture and Fisheries*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.07.010>.
- Nichani, A., Kumar, A., Iyer, S., & Ramya, M. A. (2017). Environmental parameter monitoring and data acquisition for aquaponics. *Int. J. Emerg. Technol. Comput. Sci. Electron*, 24(9), 29-34.
- Pasha, A. K., Mulyana, E., Hidayat, C., Ramdhani, M. A., Kurahman, O. T., & Adhipradana, M. (2018, July). System design of controlling and monitoring on aquaponic based on Internet of Things. In 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT) (pp. 1-5). IEEE. DOI: [10.1109/ICWT.2018.8527802](https://doi.org/10.1109/ICWT.2018.8527802).
- Pramono, T. B., Qothrunnada, N. I., Asadi, F., Cenggoro, T. W., & Pardamean, B. (2023). Water quality monitoring system for aquaponic technology using the internet of things (IoT). *Commun. Math.*

- Biol. Neurosci., 2023, Article-ID. <https://doi.org/10.28919/cmbn/8221>.
- Press, J. (2024). Electrically Isolated EZO™ Carrier Board. Atlas Scientific. Recuperado de: <https://atlas-scientific.com/carrier-boards/electrically-isolated-ezo-carrier-board-gen-2/> [Septiembre de 2021]
- Rivarola, D. E. (2011). Manual básico de sanidad piscícola. Paraguay: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). URI: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/as830s>
- Taha, M. F., ElMasry, G., Gouda, M., Zhou, L., Liang, N., Abdalla, A., ... & Qiu, Z. (2022). Recent advances of smart systems and internet of things (IoT) for aquaponics automation: A comprehensive overview. *Chemosensors*, 10(8), 303. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080303>
- Vegesna, Vinod Varma and Mathi, S. Charu and M.Kaviya, R. and Arasi, J. Kumariy and Sha, R. Mani and Dhivya, P, Optimization and Control of Hydroponics Agriculture using IOT (2017). *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)* Volume 1, Issue 2, Pages 96-98, March 2017 , Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4520686>

Capítulo 9

Un enfoque evolutivo para modelar la evapotranspiración de referencia diaria con variables comúnmente medibles en una estación climatológica

Francisco Javier Ruiz Ortega, Eddie H. Clemente Torres, Alicia Martínez Rebollar, Dante Mújica Vargas & Manuel Fortis Hernández

Resumen

El propósito de este estudio fue utilizar un enfoque de cómputo evolutivo para modelar la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o). Donde este modelo utilice variables comúnmente medibles en una estación meteorológica, lo anterior como alternativa al modelo de Hargreaves-Samani. Este enfoque reviste una importancia crucial para los productores, ya que les proporciona la capacidad de gestionar eficientemente el recurso hídrico, garantizando un riego preciso y oportuno repercutiendo de manera positiva en una administración del agua más efectiva, lo que, a su vez, se traduce en un aumento significativo en la producción agrícola. Particularmente se empleó Programación Genética (GP) para crear el modelo y se comparó con el modelo de referencia FAO-PM utilizando datos del Sistema de Información para la Gestión de Riego de California (CIMIS). Las variables incluidas en el modelo evolucionado fueron la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. Los resultados revelan que los modelos evolucionados logran mejores estimaciones en términos de precisión de ET_o con respecto al modelo de Hargreaves-Samani bajo un clima árido, y un clima templado. Al ser un enfoque

basado en programación genética es posible obtener una gran variedad de modelos explícitos y cada uno de ellos puede considerarse una alternativa eficaz para la estimación de la ETo. Por tanto, el presente trabajo puede tomarse como una metodología para la creación de modelos de ETo.

Introducción

La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos separados, el primero de los cuales es la pérdida de agua desde la superficie del suelo por evaporación y el segundo es la transpiración de los cultivos. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente, y no hay un método sencillo para distinguir entre estos dos fenómenos. Dado que la ET representa un componente vital del ciclo hidrológico, su adecuada estimación es necesaria para la gestión de los recursos hídricos, el equilibrio hidrológico de las cuencas, y el riego del sistema de drenaje, por mencionar algunas aplicaciones (Allen et al., 1998).

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ETo (Allen et al., 1998). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) recomienda el modelo FAO-Penman-Monteith (FAO56-PM) como único método estándar para estimar la ETo (Allen et al., 1998). Sin embargo, tiene limitaciones significativas. Principalmente, requiere una cantidad sustancial de datos detallados a través del tiempo para obtener resultados confiables, lo que puede ser un desafío en situaciones de disponibilidad irregular de datos. Además, la implementación del modelo puede ser compleja, especialmente en lo que respecta al cálculo de la resistencia superficial, como indican algunos estudios previos (Meraz-Maldonado & Flores-Magdaleno, 2019). Estas limitaciones identificadas subrayan la necesidad imperativa de desarrollar modelos alternativos que simplifiquen la recolección de datos, y reduzcan la complejidad computacional, implicando un cálculo preciso y sencillo. En este sentido la FAO recomienda el modelo Hargreaves-Samani para lugares donde solo están disponibles datos de temperatura. Sin embargo, aunque es cierto que el modelo solo funciona con diferencias de temperatura, el cálculo diario de ETo podría estar sujeto a errores debido a la influencia del rango de temperatura (Hargreaves et al., 2003).

En la actualidad, técnicas de inteligencia artificial como programación genética (GP), Redes Neuronales Artificiales y modelos Neuro Difusos se han utilizado para modelar procesos hidrológicos (Ferreira et al., 2019;

Guven et al., 2008; Jovic et al., 2018; Shiri et al., 2014; Trajkovic et al., 2003). Estas técnicas tienen la capacidad de modelar estos procesos como no lineales, considerando una alta interdependencia entre sus variables y como resultado estimar la ETo con precisión. Sin embargo, su éxito depende de varios factores como la cantidad y calidad de los datos, la selección de la estructura del modelo y los parámetros del modelo requeridos. Un ejemplo es el trabajo presentado por Ferreira, L.B., et al. en 2019, (Ferreira et al., 2019), los autores estimaron la ETo utilizando datos de humedad relativa y temperatura del aire, emplearon dos estrategias para manejar los datos. La primera estrategia fue la agrupación por tipo de clima, y la segunda estrategia utilizó datos meteorológicos pasados como entrada a los modelos. Las técnicas utilizadas en este estudio fueron una red neuronal y una máquina de soporte vectorial, así como seis ecuaciones empíricas; estas últimas mostraron el rendimiento más bajo. Los modelos generados a través de técnicas de aprendizaje automático como redes neuronales artificiales y máquinas de soporte vectorial obtienen resultados precisos. Sin embargo, estos modelos se perciben como cajas negras debido a su complejidad intrínseca y por ende su falta de interpretabilidad en el modelo resultante. Esta falta de transparencia puede generar desconfianza y reticencia en su uso, ya que no proporcionan una explicación clara de la relación entre las variables de entrada y los resultados obtenidos. Además, los modelos se desarrollaron con grupos de datos de estaciones meteorológicas con climas similares, lo que puede resultar en un rendimiento inexacto en regiones con condiciones climáticas significativamente diferentes.

En este trabajo, el método FAO Penman Monteith (FAO56-PM) fue considerado como conocimiento experto, ya que tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros aerodinámicos. En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar un modelo para estimar la ETo utilizando un enfoque evolutivo, empleando variables fácilmente medibles en una estación meteorológica y aplicable a al menos dos climas distintos sin necesidad de ajustes locales.

La estimación de ETo se realizó para climas árido-cálido y templado-cálido. Para el desarrollo y la validación del modelo, se utilizaron bases de datos obtenidas del CIMIS y una base de datos de la estación El Porvenir en el estado de Coahuila, ubicada en el centro-norte de México. En la evaluación del rendimiento del modelo, se utilizaron indicadores estadísticos como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación R^2 , comparando los resultados obtenidos con el modelo de Hargreaves-Samani y comparándolo con el modelo de referencia FAO56-PM. Al simplificar el proceso y reducir la depen-

dencia de datos meteorológicos complejos, este enfoque se vuelve más accesible y económicamente viable, especialmente valioso en áreas con recursos limitados o infraestructura meteorológica menos desarrollada.

La simplificación de las variables de entrada, así como su precisión a cuando menos dos climas diferentes sin comprometer la precisión, convierte a estos modelos en herramientas valiosas para optimizar la eficiencia y la toma de decisiones en la agricultura, incluso para productores con tecnología limitada. Este enfoque mejora significativamente la productividad agrícola, posicionándose como herramienta esencial para una agricultura productiva y sostenible.

Metodología

Base de datos

Las bases de datos utilizadas en el desarrollo del modelo se obtuvieron del Sistema de Información para la Gestión del Riego del estado de California, en Estados Unidos de América, ((CIMIS), 2023), que alberga varias estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes regiones de este estado. Además de una estación meteorológica ubicada en el estado de Coahuila en el centro-norte de México. Una característica notable de CIMIS es que proporciona las variables necesarias para calcular la ETo utilizando el modelo de referencia FAO-PM. Es importante destacar que CIMIS es una base de datos abierta, facilitando el acceso y la disponibilidad de información para la comunidad científica y académica¹.

Las bases de datos para la construcción del modelo abarcan un período desde 2011 hasta 2015 y 2019 a escala diaria. La selección de estos períodos se debe a la menor cantidad de datos faltantes. El tipo de clima se definió en función de la clasificación climática de (Köppen & Geiger, 1930). Para elegir las bases de datos de entrenamiento y prueba, se consideró la diversidad geográfica y la variabilidad climática. Las bases de datos utilizadas para el entrenamiento y la prueba consisten en 4 estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes lugares geográficos como se observa en la Figura 1, con 2 estaciones que tienen un clima **árido-cálido** y las otras dos con un clima **templado-cálido**, como se detalla en el Cuadro 1.

1 La información en la base de datos de CIMIS está disponible de forma gratuita en www.cimis.water.ca.gov.

Figura 1. Ubicación Geográfica de las Estaciones Meteorológicas Usadas para Entrenamiento²



Cuadro 1. Características de las Bases de Datos Utilizadas para Entrenamiento y Prueba

No.	Base de Datos	Latitud	Longitud	Elevación [msnm]	Clima	Período
1	El Porvenir	25.781	-103.313	1112	árido-cálido (BWh)	Feb-Dic 2019
2	Davis	38.536	-121.776	18	templado-cálido (Csa)	2011-15
3	Calipatria	33.043	-115.416	-34	árido-cálido (BWh)	2011-15
4	McArthur	41.064	-121.456	1009	templado-cálido (Csb)	2011-15

En cuanto a la selección de bases de datos para validación, se eligieron estaciones en diferentes latitudes como se observa en la Figura 2, pero con climas similares. Para validar el modelo, se utilizaron 4 estaciones meteorológicas diferentes, tres de ellas con clima cálido-templado y una con clima árido-cálido, como se muestra en el Cuadro 2.

² Adaptada de (Google, 2022). Ubicación de estaciones meteorológicas usadas para entrenamiento [Mapa]. Google Maps. (<https://www.google.com/maps>)

Figura 2. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas usadas para validación³



Cuadro 2. Características de las bases de datos utilizadas para validación

No.	Base de Datos	Latitud	Longitud	Elevación [msnm]	Clima	Período
1	Modesto	37.645	-121.188	10.668	templado-cálido (Csa)	2019
2	Oakville	38.428	-122.410	60.655	templado-cálido (Csc)	2015
3	Meloland	32.806	-115.446	-16.764	árido-cálido (BWh)	2019
4	Ferndale	40.604	-124.243	6.401	templado-cálido (Csb)	2019

Preprocesamiento de datos

Se realizó un análisis exploratorio de las bases de datos para identificar posibles datos incorrectos, faltantes o registrados de manera incorrecta. Durante este análisis, se observó que las bases de datos de CIMIS contenían registros con datos faltantes. De acuerdo con (Mobilia y Longobardi, 2021), una estrategia para abordar esta situación

³ Adaptada de (Google, 2022). Ubicación de estaciones meteorológicas usadas para validación [Mapa]. Google Maps. (<https://www.google.com/maps>)

es utilizar el método estándar para la imputación de datos faltantes, según lo propuesto por (Papale et al., 2006). Este enfoque implica reemplazar los valores faltantes con el promedio bajo condiciones meteorológicas similares dentro de una ventana de tiempo de ± 7 días. Como resultado, se recopilaron 334 registros de la estación El Porvenir durante el período de febrero a diciembre de 2019. Además, se obtuvieron 1826 registros de cada una de las estaciones de CIMIS.

Posteriormente, se realizó una operación de preprocesamiento para estandarizar las unidades en las que se registraron los datos originales: la temperatura se registró en $^{\circ}\text{F}$ y se convirtió a $^{\circ}\text{C}$; los datos de velocidad del viento se registraron en $[\text{mph}]$ y luego se convirtieron a $[\text{m/s}]$; y la radiación solar se registró inicialmente en $[\text{Ly/día}]$ y luego se convirtió a $[\text{W/m}^2]$ utilizando el factor de conversión $\text{Ly/día}/2.065 = [\text{W/m}^2]$ proporcionado por CIMIS.

Las bases de datos de El Porvenir, Davis, Calipatria y McArthur se utilizaron para crear tres conjuntos de datos diferentes (DS01, DS02 y DS03), como se muestra en el Cuadro 3. Estos conjuntos de datos se utilizaron tanto en las fases de entrenamiento como de prueba.

Los conjuntos de datos se consolidaron de la siguiente manera: DS01 incorpora datos de la estación El Porvenir, que representa un clima árido-cálido (BWh); DS02 incluye datos de la estación Davis con un clima cálido-templado (Csa); y DS03 se forma integrando datos de cuatro estaciones meteorológicas (El Porvenir, Davis, Calipatria y McArthur) que cubren al menos dos climas diferentes (árido-cálido (BWh) y cálido-templado (Csa)). El Cuadro 3 muestra los tres conjuntos de datos y sus características.

Cuadro 3. Conjunto de Datos Creado para el Desarrollo del Modelo

No.	Conjunto de datos	Estaciones meteorológicas	Registros
1	DS01	El Porvenir	334
2	DS02	Davis	1826
3	DS03	El Porvenir, Davis, Calipatria, McArthur	5812

Cada conjunto de datos diarios mostrado en el Cuadro 3 se dividió en un 80% para entrenamiento y un 20% para pruebas. Se realizó un muestreo uniforme para obtener los datos de prueba (es decir, se tomó

uno de cada cinco elementos de datos para el conjunto de pruebas y el resto se utilizó para el conjunto de entrenamiento).

Para validar los resultados, se incluyeron cuatro estaciones meteorológicas con ubicaciones geográficas diferentes a las utilizadas en las fases de entrenamiento y pruebas, como se detalla en el Cuadro 2. Estas estaciones se utilizaron para crear cuatro conjuntos de datos: DS04, asociado a la estación de Modesto; DS05, vinculado a la estación de Oakville; DS06, correspondiente a la estación de Meloland; y DS07, relacionado con la estación de Ferndale. El Cuadro 4 presenta las características de los conjuntos de datos utilizados en el proceso de validación. Este enfoque asegura la robustez del modelo al evaluar su rendimiento bajo condiciones geográficas variadas.

Cuadro 4. Conjunto de datos creado para validación

No.	Conjunto de datos	Estaciones meteorológicas	Año	Registros
1	DS04	Modesto	2019	265
2	DS05	Oakville	2015	342
3	DS06	Meloland	2019	336
4	DS07	Ferndale	2019	149

Construcción del modelo propuesto con programación genética

La programación genética es un método sistemático para hacer que las computadoras resuelvan automáticamente un problema comenzando desde una declaración de alto nivel de lo que necesita ser hecho. La programación genética es un método independiente del dominio que crea genéticamente una población de programas de computadora para resolver un problema. Específicamente, la programación genética transforma iterativamente una población de programas de computadora en una nueva generación de programas aplicando análogos de operaciones genéticas que ocurren naturalmente como cruce y mutación. John Koza, pionero en el campo de la programación genética (Koza, 1992) propone una serie de pasos preparatorios antes de iniciar con el proceso evolutivo. Estos pasos incluyen determinar el conjunto primitivo de terminales, que son los valores o variables básicas utilizadas en las expresiones genéticas, así como el conjunto primitivo de funciones, que son las operaciones y funciones que actúan sobre estos

terminales para generar nuevas soluciones. Además, es crucial definir una función de aptitud que evalúe qué tan bien se desempeñan las soluciones en resolver el problema específico que se aborda. Otro aspecto importante es establecer los parámetros del algoritmo evolutivo, como el tamaño de la población, las tasas de mutación y recombinación, entre otros, que afectan la exploración del espacio de soluciones. Finalmente, se debe establecer la forma de paro del algoritmo, es decir, los criterios que determinan cuándo detener la evolución de la población, como alcanzar un nivel de aptitud deseado o agotar un número predefinido de generaciones. Estos pasos proporcionan una estructura sólida y metodológica para el desarrollo exitoso de modelos utilizando programación genética, maximizando las posibilidades de encontrar soluciones efectivas y óptimas para problemas complejos.

Determinar el conjunto de terminales.

En esta investigación, se empleó la programación genética para seleccionar funciones y terminales de manera eficiente. Esta metodología permitió discriminar elementos irrelevantes y conservar aquellos más útiles. Al integrar los pasos esenciales de evaluación del modelo Penman-Monteith en el algoritmo evolutivo, se logró mejorar tanto la robustez como la precisión del modelo. El Cuadro 5 presenta el conjunto de terminales seleccionados para el algoritmo evolutivo.

Cuadro 5. Terminales utilizados en el proceso evolutivo

No.	Terminal	Descripción	Expresión matemática
1	Δ	pendiente de la curva de presión de vapor	$\Delta = \frac{4098 \left[0.618 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \text{ [kPa } ^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$
2	TMax	Temperatura máxima	
3	TMin	Temperatura mínima	
4	Tprom	Temperatura promedio	
5	HRMax	Humedad relativa máxima	
6	HRMin	Humedad relativa mínima	

7	u2	Velocidad del viento	
8	rs	Radiación solar	
9	ds	Declinación solar	$\delta = 0.409 * \sin(J - 1.39)$
10	G	Temperatura del suelo	
11	Pi	Número pi	π
12	reflexion	albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23	
13	gt	Grados totales	
14	lt	Latitud	
15	P	Presión atmosférica	$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$
16	γ	Constante psicrométrica	$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda}$
17	eoTmin	Presión de vapor de saturación a temperatura mínima.	$e^{\circ}T_{min} = 0.618 * \exp\left(\frac{17.27 * T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right)$
18	eoTmax	Presión de vapor de saturación a temperatura máxima.	$e^{\circ}T_{max} = 0.618 * \exp\left(\frac{17.27 * T_{max}}{T_{max} + 237.3}\right)$
19	es	Presión de vapor de saturación	$e_s = \frac{e^{\circ}T_{min} + e^{\circ}T_{max}}{2}$
20	ea	Presión real de vapor	$e_a = \frac{e^{\circ}T_{min} * HR_{max} + e^{\circ}T_{max} * HR_{min}}{2}$
21	es-ea	Déficit de presión de vapor	
22	dr	Distancia relativa de la Tierra al Sol	$d_r = 1 + 0.033 * \cos(J)$
23	ds		
24	ws	Angulo de radiación	$w_s = \arccos[-\tan(\theta)\tan(\delta)]$
25	N	Fotoperíodo	$N = \frac{24}{\pi} * ws$

26	Ra	Radiación extraterrestre	$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r$
27	rns	Radiación neta de onda corta	
28	rnl	Radiación neta de onda larga	
29	rn	Radiación neta	
30	Constantes	0.408, 900, 273, 1,0.34	

Determinar el conjunto de funciones

Las funciones son los operadores matemáticos que se aplican a los diferentes terminales. En este trabajo, se utilizaron los operadores básicos +, -, *, /, junto con las funciones \sqrt{x} , $\sqrt[3]{x}$, x^2 , x^3 , $\ln(x)$, $\exp(x)$, $\sin(x)$, $\cos(x)$ y $\arctan(x)$ utilizadas en estudios hidrológicos (Mattar, 2018; Mehdizadeh et al., 2017). El conjunto de funciones incluyó las funciones hiperbólicas normalmente usadas para descubrir fenómenos físicos (Pandir & Ulusoy, 2013). El conjunto de funciones se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Funciones utilizadas en el proceso evolutivo

No.	Función	Expresión	No.	Función	Expresión
1	Seno	$\sin(x)$	9	Tangente hiperbólica	$\tanh(x)$
2	Coseno	$\cos(x)$	10	Raíz cuadrada	
3	Tangente	$\tan(x)$	11	Exponente x a la y	Xy
4	Arcoseno	$\text{asin}(x)$	12	Función exponencial de base e	
5	Arcocoseno	$\text{acos}(x)$	13	Suma	+
6	Arcotangente	$\text{atan}(x)$	14	Resta	-
7	Seno hiperbólico	$\sinh(x)$	15	Multipliación	*
8	Coseno hiperbólico	$\cosh(x)$	16	División	/

Determinación de las funciones de aptitud

El proceso evolutivo está regido por la medida de aptitud. Cada individuo en la población se ejecuta y luego se evalúa utilizando la función de aptitud para determinar su rendimiento. La función de aptitud (junto con las funciones y terminales) establece el espacio de búsqueda y permite evaluar la calidad de los individuos. En la investigación, se aplicó el RMSE, como se muestra en la Ecuación (1), como función de aptitud para evaluar la diferencia entre el valor predicho y el valor objetivo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

donde n es el número total de puntos de datos y P_i y O_i son los valores predichos y objetivo de ETo, respectivamente. Cuanto mejor sea la aptitud de un individuo, mayor será la probabilidad de pasar a la siguiente generación.

Determinar los parámetros del algoritmo evolutivo

Los principales parámetros para controlar la ejecución del algoritmo evolutivo son el tamaño de la población, el número máximo de generaciones en el método de inicialización, el método de selección, la probabilidad de cruce y la probabilidad de mutación. Los valores asignados a los parámetros se observan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Parámetros del algoritmo evolutivo

Parámetros	Valor
Tamaño de la población	200
Número máximo de generaciones	200
Método de inicialización	Mita-Mitad.
Método de selección	lexicotour
Probabilidad de cruce	80%
Probabilidad de mutación	20%

Determinar el método para elegir un resultado

Cada ejecución requiere la especificación de un criterio de terminación para decidir cuándo detenerse y un método para seleccionar resultados. Las soluciones se obtuvieron al lograr un RMSE < 1 en entrenamiento. Para detener el algoritmo evolutivo, se utilizó el número máximo de generaciones establecido en los parámetros del algoritmo como criterio de parada.

El algoritmo evolutivo se ejecutó cincuenta veces para los conjuntos de datos DS01 y DS02, obteniendo 2076 y 1408 soluciones, respectivamente. Para el conjunto de datos DS03, el algoritmo evolutivo se ejecutó 30 veces utilizando los mismos parámetros de ejecución, resultando en 270 soluciones. En total, el proceso evolutivo obtuvo 3754 soluciones (ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Soluciones encontradas

Modelos	
Conjunto de datos	Soluciones
DS01	2076
DS02	1408
DS03	270
Total	3754

La evaluación de los modelos se realizó con el 20% de los datos reservados para la prueba de los conjuntos de datos DS01, DS02 y DS03. La evaluación se llevó a cabo calculando el RMSE y el coeficiente de determinación R^2 ; esta última medida no se consideró como parte de la optimización del modelo. El RMSE y R^2 son dos métricas comúnmente utilizadas en el contexto de predicciones y modelos de regresión para evaluar el rendimiento de un modelo en comparación con los valores reales.

El RMSE proporciona una medida de qué tan cerca están las predicciones del modelo de los valores reales, mientras que R^2 proporciona información sobre la proporción de variabilidad de la variable dependiente que es explicada por el modelo de regresión. Juntas, estas métricas ofrecen una vista integral del rendimiento del modelo en términos de precisión y capacidad para explicar la variabilidad

en los datos. RMSE y R^2 se calculan utilizando las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}_i)(P_i - \bar{P}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}_i) \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)} \quad (2)$$

Donde n es el número total de puntos de datos, y P_i y O_i son los valores de ETo predichos y, \bar{o}_i y \bar{P}_i son los valores de ETo objetivo, respectivamente.

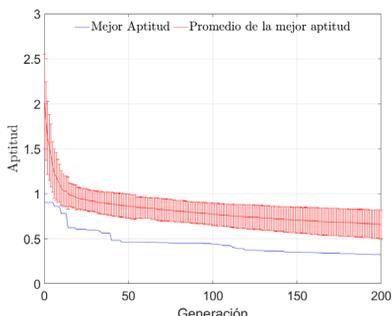
Resultados

Estadísticas de Evolución

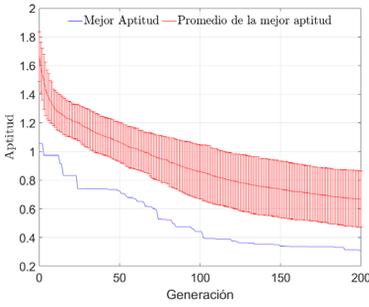
Esta sección presenta un análisis estadístico del proceso evolutivo para los conjuntos de datos DS01, DS02 y DS03. El objetivo es mostrar la tasa de convergencia del algoritmo propuesto. La Figura 3 muestra el mejor ajuste, el promedio de los mejores ajustes y la desviación estándar de las 50 ejecuciones para los conjuntos de datos DS01 y DS02, y las 30 ejecuciones para el conjunto de datos DS03.

Cabe destacar que, en promedio, se encontraron soluciones con una medida de aptitud inferior a uno en la 15^a, 65^a y 174^a generaciones. La aptitud mínima se alcanzó para los tres conjuntos de datos alrededor de la 200^a generación, y la aptitud promedio converge a 0.9036, 0.9734 y 0.9668 desde la 1^a, 3^a y 44^a generaciones para los conjuntos de datos DS01, DS02 y DS03, respectivamente.

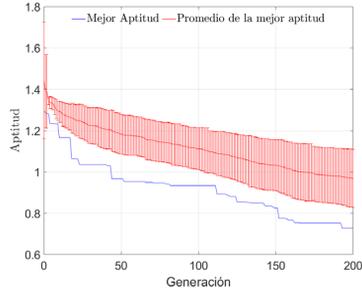
Figura 3. Mejor ajuste, promedio de los mejores ajustes y desviación estándar de las 50 ejecuciones para los conjuntos de datos DS01 y DS02, y las 30 ejecuciones para el conjunto de datos DS03.



a) Mejor aptitud, aptitud media y desviación estándar a lo largo de la evolución con el conjunto de datos DS01



b) Mejor aptitud, aptitud media y desviación estándar a lo largo de la evolución con el conjunto de datos DS02



c) Mejor aptitud, aptitud media y desviación estándar a lo largo de la evolución con el conjunto de datos DS03.

Resultados Experimentales

El número de soluciones encontradas con GP fue de 3754, de las cuales se seleccionaron las catorce mejores soluciones. Se prioriza aquellas con la mejor aptitud, un RMSE menor a uno, la menor complejidad estructural y el menor número de parámetros de entrada. Los modelos seleccionados se muestran en el Cuadro 9. Los modelos fueron etiquetados como EToi (donde i representa un número consecutivo).

Cuadro 9. Modelos obtenidos con programación genética

Modelo	Expresión Matemática	RMSE	Conjunto de Datos
ETo1	$ETo = \frac{e_s}{0.4718}$	1.041	DS01
ETo2	$ETo = \arctan\left(\frac{u_2}{d_r + e_s + \frac{e_s}{d_r}}\right) + \frac{\frac{e_s}{d_r}}{d_r + \frac{e_s}{d_r}}$	0.952	DS01
ETo3	$To = \sqrt{e_a + u_2} + 2d_s \cos\left(u_2 \sqrt{e_a + u_2 * u_2 + \sqrt{d_s}}\right) + e^o T_{max}$	0.898	DS01
ETo4	$ETo = d_s + 2e_s + \frac{e_s - e_a}{\sinh(e_s)}$	0.98	DS01
ETo5	$To = e^o T_{max} - \frac{\tanh(T_{min})}{u_2} + e^o T_{min} + d_s + \tanh(HR_{max})$	0.889	DS01
ETo6	$ETo = \sqrt{e_s + u_2} + \tanh(d_s + R_a) + 2d_s + e_s + \tanh$	0.882	DS01
ETo7	$ETo = w_s(\cos(u_2) + d_s + \Delta + e_s - e_a)$	0.794	DS03

ETo8	$ETo = \tanh \left(\frac{d_s + \tanh(\tanh(\quad))}{1 + \tanh(\operatorname{atan}(\tanh(e_s - e_a)) + \tanh(2e^{\circ}T_{\max} + \tanh(HR_{\min}) + \tanh(d_s)))} + d_s \right) + d_s$ $+ \frac{\operatorname{atan}(\operatorname{atan}(\Delta + e^{\circ}T_{\max}) + \operatorname{atan}(\sin(e^{\circ}T_{\max})))}{u_2 + \tanh(d_s) + d_s} + \tanh(\Delta) + \tanh$	0.639	DS02
ETo9	$ETo = \sqrt{u_2 + d_s} + 2(s - e_a) + 2d_s + \sqrt{d_s}$	0.758	DS02
ETo10		0.826	DS02
ETo11	$ETo = \operatorname{atan}(u_2(e_s - e_a)) + d_s + 2\operatorname{atan}(d_s) + \operatorname{atan}(ds + \operatorname{atan}(e_s))$	0.693	DS02
ETo12	$ETo = e^{\circ}T_{\max} + d_s + 2\tanh(d_s) + \frac{d_s + \left(\frac{d_s + u_2}{\pi}\right) + u_2}{\pi}$	0.889	DS02
ETo13	$ETo = d_s + e^{\circ}T_{\max} * u_2^{\text{reflexion}}$	0.95	DS02
ETo14	$ETo = e^{\circ}T_{\max} + u_2^4 * 0.1325 * 3d_s$	0.872	DS02
H-S	$ET_o = 0.0023R_a\sqrt{T_{\max} - T_{\min}} * (T_{\text{mean}} + 17.8)$		
FAO56-PM	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{\text{mean}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$		
ETo-Evapotranspiración de referencia; H-S = Hargreaves-Samani			

La estructura de los modelos ETo1 y ETo4 están en función de la temperatura; la estructura de los modelos ETo2, ETo6, ETo7, ETo9, ETo10, ETo12, ETo13 y ETo14 en función de la temperatura y la velocidad del viento; y la estructura de los modelos ETo3, ETo5, ETo8 y ETo11 está en función de la humedad relativa, la temperatura y velocidad del viento.

La evaluación de los modelos

El Cuadro 10 resume el rendimiento de los modelos medidos por el RMSE y R^2 para todos los conjuntos de datos mostrados en el Cuadro 3. Se puede observar que el enfoque evolutivo con GP es capaz de aprender relaciones complejas y no lineales que son difíciles de modelar con técnicas convencionales. Los modelos evaluados exhibieron resultados significativos, con un rango de error cuadrático medio (RMSE) entre 0.639 y 2.054. Asimismo, se obtuvieron coeficientes de determinación R^2 que oscilaron entre 0.521 y 0.925. Estos resultados se basaron en el uso del 20% de los datos disponibles para el desarrollo del modelo, lo que sugiere una capacidad variable pero generalmente aceptable de los modelos para predecir la evapotranspiración.

El Cuadro 10 presenta índices estadísticos que indican la consistencia de los modelos evaluados. Se observa que el modelo ETo11 exhibe una mayor consistencia en los tres conjuntos de datos analizados.

Cuadro 10. Índices estadísticos obtenidos con los conjuntos de datos DS01, DS02 y DS03

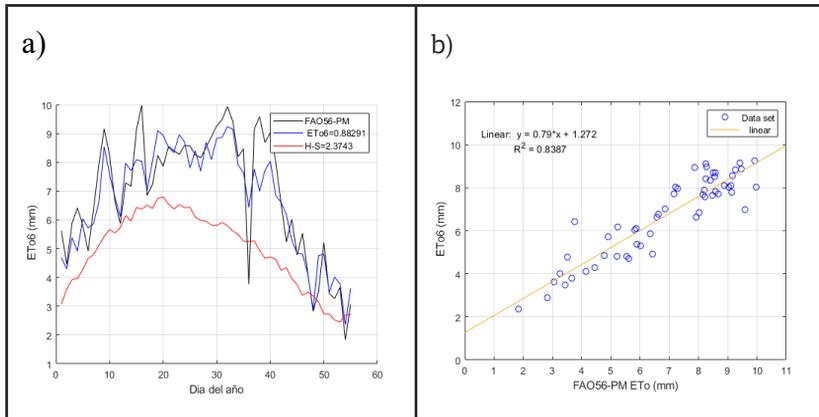
Modelo	DS01				DS02				DS03			
	Entrenamiento		Prueba		Entrenamiento		Prueba		Entrenamiento		Prueba	
	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2
ETo1	1.131	0.763	1.041	0.775	1.72	0.601	1.706	0.6	1.839	0.679	1.83	0.683
ETo2	0.973	0.823	0.952	0.805	1.663	0.702	1.654	0.7	1.819	0.731	1.812	0.735
ETo3	0.895	0.869	0.898	0.829	1.659	0.811	1.644	0.804	1.657	0.836	1.656	0.841
ETo4	1.094	0.79	0.98	0.797	1.581	0.672	1.575	0.669	1.655	0.736	1.643	0.741
ETo5	0.894	0.849	0.889	0.831	1.861	0.573	2.036	0.521	1.945	0.68	1.959	0.68
ETo6	0.878	0.874	0.882	0.838	1.664	0.815	1.68	0.807	1.59	0.83	1.594	0.833
ETo7	1.723	0.752	1.597	0.723	0.852	0.887	0.847	0.883	0.834	0.892	0.794	0.901
ETo8	1.783	0.794	1.738	0.747	0.688	0.918	0.659	0.925	0.779	0.908	0.761	0.91
ETo9	1.726	0.753	1.632	0.709	0.806	0.887	0.758	0.896	0.898	0.889	0.869	0.894
ETo10	1.793	0.77	1.637	0.746	0.864	0.871	0.826	0.876	0.922	0.883	0.89	0.889
ETo11	1.837	0.809	1.756	0.759	0.753	0.901	0.693	0.91	0.839	0.898	0.807	0.904
ETo12	1.579	0.87	1.538	0.815	0.904	0.871	0.889	0.871	1.021	0.871	1.006	0.874
ETo13	1.804	0.881	1.769	0.812	0.915	0.861	0.95	0.845	1.083	0.829	1.076	0.85
ETo14	2.092	0.86	2.054	0.793	0.923	0.849	0.872	0.86	1.004	0.851	0.996	0.849
H-S	2.501	0.683	2.374	0.631	1.157	0.759	1.177	0.741	1.016	0.834	0.979	0.854

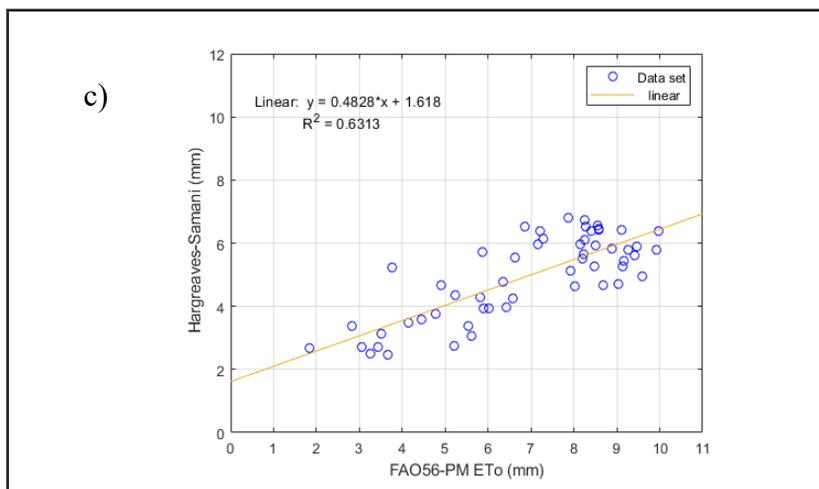
El análisis estructural de los modelos proporciona información interesante sobre las estrategias identificadas por el proceso evolutivo para combinar funciones y terminales.

Los resultados del Cuadro 10 destacan el modelo ETo6 como el mejor al ser evaluado con los datos de prueba DS01, mostrando un RMSE de 0.882 y un R^2 de 0.838, lo que indica una buena capacidad predictiva. Además, las figuras de dispersión y series temporales en la Figura 4 son significativas y respaldan la superioridad del modelo ETo6 sobre el modelo de Hargreaves-Samani en términos de precisión y ajuste. En la Figura 4a, se observa que el RMSE del modelo ETo6 fue notablemente menor, con un valor de 0.882, en comparación con el RMSE del modelo de Hargreaves-Samani, que fue mucho más alto con un valor de 2.374. Esto indica que el modelo ETo6 proporciona estimaciones más cercanas a los valores reales de evapotranspiración que el modelo de referencia.

Además, en la Figura 4b, se muestra que el coeficiente de determinación R^2 del modelo ETo6 fue sustancialmente mayor, alcanzando un valor de 0.8387, en comparación con el R^2 del modelo de Hargreaves-Samani en la Figura 4c, que fue de 0.631. Este resultado indica que el modelo ETo6 explica de manera más efectiva la variabilidad de los datos de evapotranspiración en comparación con el modelo de referencia.

Figura 4. Comparación de los modelos ETo6 y Hargreaves-Samani (H-S) con el modelo de referencia FAO56-PM utilizando datos de prueba del conjunto de datos DS01. a) RMSE ETo6 y Hargreaves-Samani, b) R^2 ETo6, y c) R^2 Hargreaves-Samani





En conjunto, estos hallazgos subrayan la eficacia y el rendimiento superior del modelo ETo6 en la estimación de la evapotranspiración en comparación con el modelo Hargreaves-Samani, lo que respalda la validez y utilidad del enfoque utilizado en este estudio.

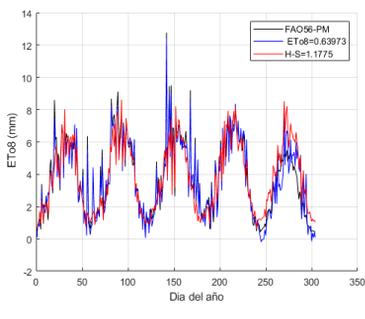
Los resultados obtenidos muestran que el modelo ETo8, el cual utiliza parámetros de humedad relativa, temperatura y velocidad del viento como entradas, logró estimaciones más precisas del ETo en comparación con el modelo de Hargreaves-Samani al ser evaluado con los conjuntos de datos DS02 y DS03.

Para el conjunto DS02, el modelo ETo8 exhibió un RMSE de 0.639, superando al modelo de Hargreaves-Samani que alcanzó un valor de RMSE de 1.177, como se evidencia en la Figura 5a. Asimismo, en la Figura 5b, se observa un R^2 de 0.925 para el modelo ETo8, mientras que el modelo de Hargreaves-Samani obtuvo un R^2 de 0.741 en la Figura 5c.

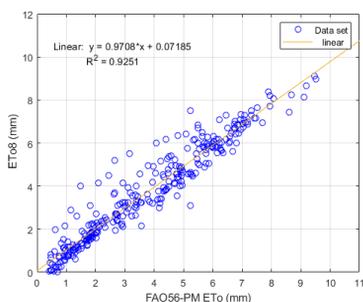
De manera similar, para el conjunto de datos DS03, el modelo ETo8 mostró un RMSE de 0.761, mientras que el modelo de Hargreaves-Samani presentó un RMSE de 0.979, como se muestra en la Figura 5d. Además, en la Figura 5e, se aprecia un R^2 de 0.910 para el modelo ETo8, mientras que el modelo de Hargreaves-Samani obtuvo un R^2 de 0.844 en la Figura 5f.

Estos resultados indican que el modelo desarrollado mediante GP, ETo8, supera significativamente al modelo de Hargreaves-Samani en términos de precisión en la estimación del ETo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el modelo ETo8 tiene una estructura más compleja, lo que puede influir en su aplicabilidad práctica.

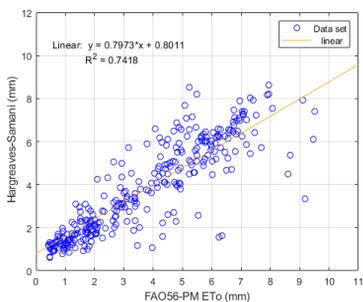
Figura 5. Comparación del modelo ETo8 y el modelo Hargreaves-Samani con el modelo FAO56-PM utilizando los conjuntos de datos DS02 y DS03. a) RMSE ETo8 y Hargreaves-Samani para DS02, b) R2 ETo8 para DS02, c) R2 Hargreaves-Samani para DS02, d) RMSE ETo8 y Hargreaves-Samani para DS03, e) R2 ETo8 para DS03, y f) R2 Hargreaves-Samani para DS03.



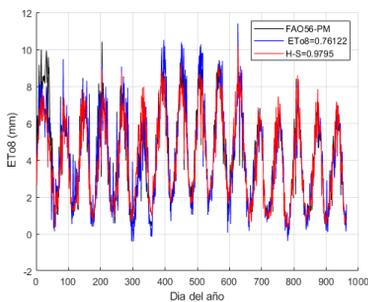
a)



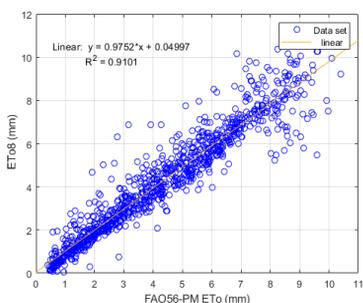
b)



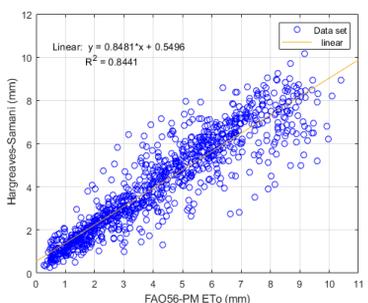
c)



d)



e)



f)

Los resultados obtenidos muestran que el modelo ETo11, a pesar de su formulación estructural relativamente simple, presenta resultados significativos en la etapa de evaluación. Este modelo exhibe un rango de RMSE entre 0.693 y 1.756, así como un R^2 entre 0.759 y 0.910 para los tres conjuntos de datos evaluados como se observa en el Cuadro 10.

Aunque el modelo ETo11 no se destacó como el mejor modelo encontrado, se seleccionó para la etapa de validación debido a sus características importantes. Este modelo utiliza únicamente parámetros de entrada relacionados con la humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, lo cual lo hace más accesible y práctico. Además, los resultados obtenidos con el modelo ETo11 superan al modelo de Hargreaves-Samani en los tres conjuntos de datos utilizados para las pruebas, lo que resalta su capacidad para proporcionar estimaciones precisas de la evapotranspiración.

Estos hallazgos sugieren que el modelo ETo11 presenta un desempeño competitivo y relevante para la predicción de la evapotranspiración, lo que lo convierte en una opción viable a considerar en aplicaciones prácticas y estudios de modelado, especialmente cuando se valoran la simplicidad y la eficiencia en la implementación de los modelos.

Validación del modelo

Se validó el modelo ETo11, Ecuación (3), utilizando los conjuntos de datos DS04, DS05, DS06 y DS07, que representan climas áridos-cálidos y cálidos-templados de ubicaciones diferentes a las del entrenamiento. El Cuadro 4 resume las características de estos conjuntos de datos. Se incluyó el modelo Hargreaves-Samani para comparar su rendimiento con el modelo ETo11. El Cuadro 11 presenta los valores de RMSE y R^2 obtenidos para ambos modelos.

$$ETo11 = atan(u_2(e_s - e_a)) + d_s + 2(atan(d_s) + atan(ds + atan(e_s)))$$

Cuadro 11. Índices estadísticos de los modelos ET011 y Hargreaves-Samani

Conjuntos de datos	ET011		Hargreaves-Samani	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
DS04	0.314	0.978	0.635	0.916
DS05	0.682	0.918	0.71	0.918
DS06	1.483	0.818	1.616	0.767
DS07	0.292	0.937	0.4	0.867

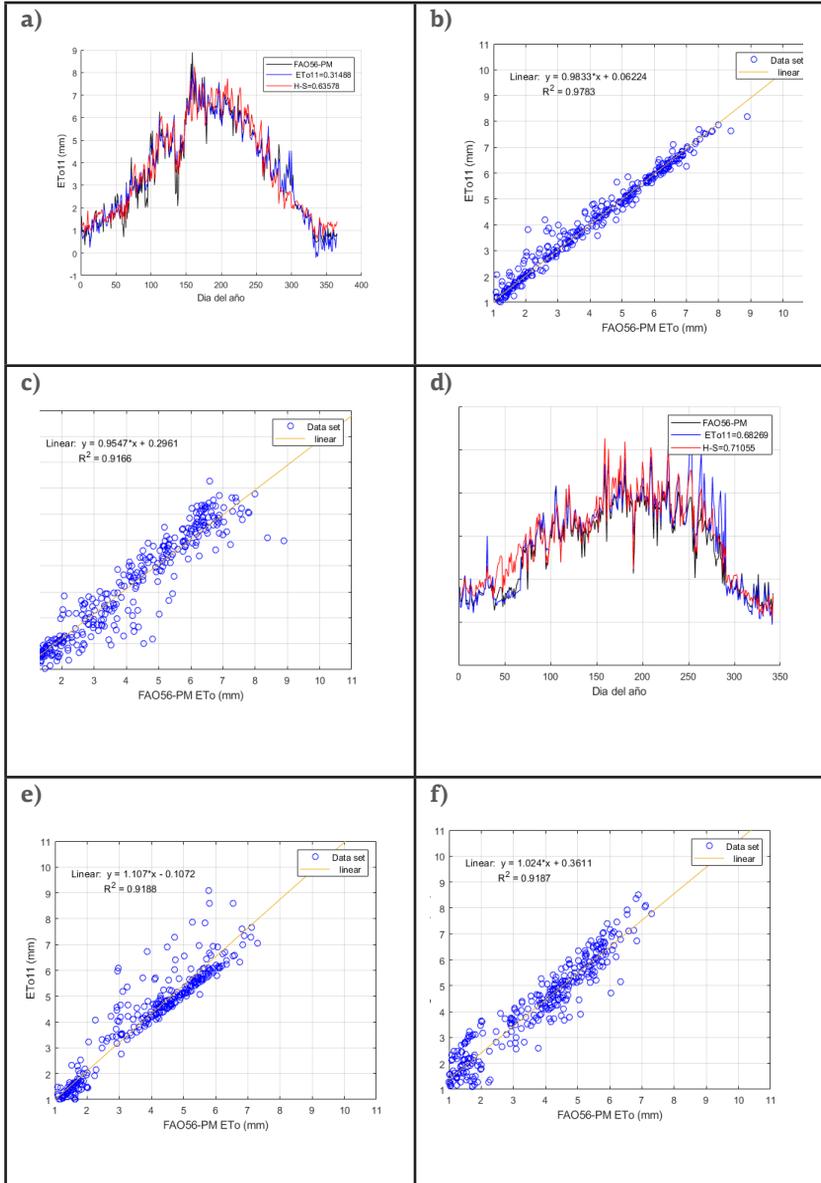
Los resultados obtenidos en las Figuras 6 y 7 revelan que el modelo ET011 muestra una mayor precisión en comparación con el modelo Hargreaves-Samani con respecto al modelo de referencia FAO56-PM en los cuatro conjuntos de datos utilizados para la validación.

En la Figura 6a, se observó una mayor precisión del modelo ET011 con un valor de RMSE=0.314 en comparación con el modelo Hargreaves-Samani, que obtuvo un valor de RMSE=0.635, lo que sugiere una capacidad superior del modelo ET011 para proporcionar estimaciones más cercanas a los valores reales de evapotranspiración que el modelo de referencia. Además, mediante un análisis de regresión lineal representado en las Figuras 6b y 6c, se confirmó que el modelo ET011 se ajusta mejor que el modelo Hargreaves-Samani al conjunto de datos DS04, con un R²=0.978 frente a R²=0.916. Estos valores de coeficiente de determinación indican que el modelo ET011 explica más eficazmente la variabilidad de los datos de evapotranspiración en comparación con el modelo de referencia.

Los resultados obtenidos para el conjunto de datos DS05 también mostraron ventajas significativas para el modelo ET011, como se ilustra en la Figura 6d, donde se observa un RMSE=0.682 en comparación con el RMSE=0.710 del modelo Hargreaves-Samani, indicando una mayor precisión del modelo ET011 en la estimación de la evapotranspiración.

Al comparar los resultados del análisis de regresión lineal en las Figuras 6e y 6f, se observa que tanto el modelo ET011 como el modelo Hargreaves-Samani obtienen resultados similares en el índice estadístico R², con un valor de 0.918 para ambos modelos. Esto sugiere que, aunque los modelos tienen un rendimiento similar en términos de ajuste lineal, el modelo ET011 sigue siendo preferible debido a su menor RMSE.

Figura 6. Comparación del modelo ET_{o11} y el modelo Hargreaves-Samani con el modelo FAO56-PM utilizando los conjuntos de datos DS04 y DS05. a) RMSE ET_{o11} y Hargreaves-Samani para DS04, b) R² ET_{o11} para DS04, c) R² Hargreaves-Samani para DS04, d) RMSE ET_{o11} y Hargreaves-Samani para DS05, e) R² ET_{o11} para DS05, y f) R² Hargreaves-Samani para DS05.

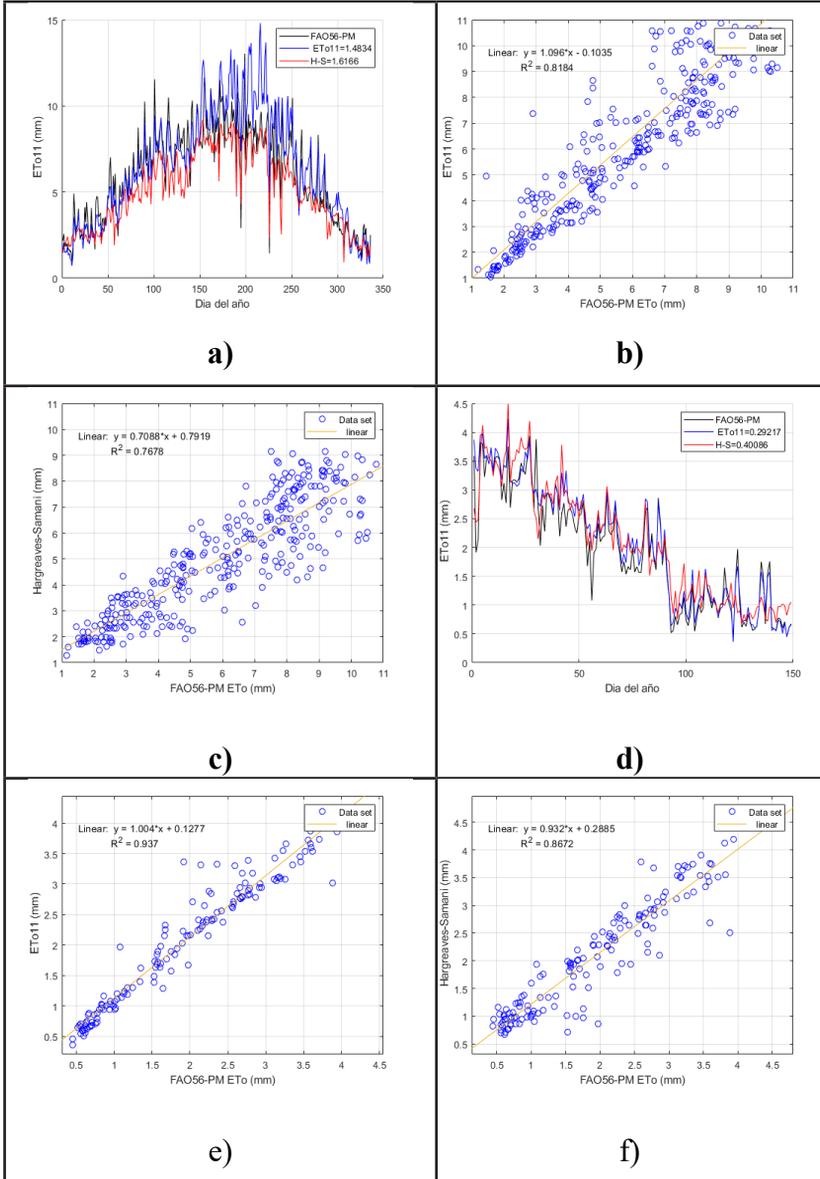


Para el conjunto de datos DS06, también se evidencia que el modelo ET011 supera al modelo Hargreaves-Samani. La Figura 7a muestra un RMSE=1.483 obtenido con el modelo ET011, en comparación con un RMSE=1.616 del modelo Hargreaves-Samani. Asimismo, en las Figuras 7b y 7c, se observan valores de R^2 de 0.818 y 0.767 para los modelos ET011 y Hargreaves-Samani, respectivamente, confirmando la mayor precisión del modelo ET011.

Los resultados obtenidos para el modelo ET011 en un entorno climático árido-cálido, validados con el conjunto de datos DS07 que representa un clima cálido-templado, se resumen en una mayor precisión del modelo ET011 en comparación con el modelo Hargreaves-Samani. La Figura 7d muestra un RMSE=0.292 para el modelo ET011, mientras que el modelo de referencia obtuvo un RMSE=0.400, indicando una mejora significativa en la precisión del modelo ET011 en la estimación de la evapotranspiración en un clima cálido-templado. Además, al analizar el gráfico de dispersión en la Figura 7e, se observa un índice de $R^2=0.937$ para el modelo ET011, mientras que el modelo Hargreaves-Samani muestra un $R^2=0.8672$ en la Figura 7f. Estos valores de coeficiente de determinación confirman que el modelo ET011 supera al modelo de referencia en términos de ajuste y precisión en un clima cálido-templado.

En resumen, los resultados de la validación del modelo ET011 en un clima diferente subrayan su robustez y precisión para estimar la evapotranspiración, incluso en condiciones climáticas distintas a las del conjunto de datos para el que fue diseñado. Este hallazgo respalda la aplicabilidad del modelo ET011 en diversas situaciones climáticas.

Figure 7. Comparación del modelo ET_{o11} y el modelo Hargreaves-Samani con el modelo FAO56-PM utilizando los conjuntos de datos DS06 y DS07. a) RMSE ET_{o11} y Hargreaves-Samani para DS06, b) R² ET_{o11} para DS06, c) R² Hargreaves-Samani para DS06, d) RMSE ET_{o11} y Hargreaves-Samani para DS07, e) R² ET_{o11} para DS07, y f) R² Hargreaves-Samani para DS07.



Significancia estadística

Las pruebas *t de Student* se utilizaron para evaluar la significancia estadística de los datos en cada uno de los conjuntos de datos DS04, DS05, DS06 y DS07 utilizados en la validación, como se describe en detalle en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Pruebas *t de Student*

Métricas	DS04.		DS05.		DS06.		DS07.	
	Eto11	FAO-PM	Eto11	FAO-PM	Eto11	FAO-PM	Eto11	FAO-PM
Media	3.665	3.664	3.748	3.483	6.471	6.000	2.066	1.930
Varianza	4.519	4.572	4.425	3.318	10.568	7.204	1.070	0.994
Observaciones	365	365	342	342	336	336	149	149
Varianza agrupada	4.545		3.872		8.886		1.032	
Diferencia media hipotetizada	0		0		0		0	
Grados de libertad	728		682		670		296	
Estadístico t	0.006		1.761		2.047		1.152	
P(T<=t) una cola	0.498		0.039		0.021		0.125	
Valor crítico de t (una cola)	1.647		1.647		1.647		1.65	
P(T<=t) dos colas	0.995		0.079		0.041		0.25	
Valor crítico de t (dos colas)	1.963		1.963		1.964		1.968	
Nivel de significancia	0.05		0.05		0.05		0.05	

Los resultados obtenidos con una tolerancia del 5% indican de manera concluyente que no hay una diferencia significativa entre las medias de los dos modelos, ETo11 y FAO-PM. Esto significa que, en este contexto específico, no se puede afirmar que los modelos difieren significativamente en cuanto a su rendimiento; por lo tanto, ambos podrían considerarse estadísticamente equivalentes según el análisis de datos. Este hallazgo respalda la consistencia y confiabilidad de ambos modelos en la estimación de la evapotranspiración (ETo).

Conclusiones

Los resultados obtenidos mostraron que es posible obtener modelos con un rendimiento superior al del modelo de referencia Hargreaves-Samani, tanto en las etapas de prueba como en la validación. Esto resalta la eficacia de las técnicas de GP en el contexto de estudios hidrológicos, proporcionando una herramienta robusta para desarrollar formulaciones explícitas para diversos problemas hidrológicos.

En particular uno de los modelos desarrollados, ETo11, demostró su aplicabilidad en climas cálidos-áridos y templados-cálidos, siendo una alternativa viable al modelo de referencia FAO-56-PM en regiones donde se dispone únicamente de datos básicos de humedad relativa, temperatura del aire y velocidad del viento. Además, esta metodología puede adaptarse para considerar otros tipos de climas o aplicarse en cuencas hidrológicas específicas, lo que amplía su versatilidad y aplicabilidad en diferentes contextos.

En resumen, el enfoque evolutivo utilizando GP para desarrollar modelos explícitos de ETo representa un avance significativo en la estimación precisa de la evapotranspiración y puede ser una herramienta valiosa para la gestión eficiente de los recursos hídricos en diversas condiciones climáticas y geográficas.

En trabajos futuros, se contempla ampliar y mejorar aún más el modelo desarrollado en este estudio. Una de las áreas de enfoque será la incorporación de datos de lisímetros en áreas áridas. Este enfoque permitirá desarrollar modelos más precisos basados en mediciones reales en lugar de estimaciones, lo que potencialmente conducirá a una mayor generalización del modelo y una mejor representación de las condiciones locales.

Además, se planea expandir la muestra de datos utilizada para el entrenamiento y la validación del modelo. Esto implicaría incluir datos recopilados durante períodos más largos, como 10, 15 y 20 años. Al aumentar la cantidad de datos disponibles, se espera mejorar la capa-

cidad del modelo para capturar la variabilidad climática a lo largo del tiempo y fortalecer su robustez y precisión.

En paralelo, se llevarán a cabo investigaciones específicas en climas subtropicales, que representan un desafío significativo para los modelos de ETo. El objetivo es evaluar la robustez y aplicabilidad del modelo desarrollado en condiciones climáticas más complejas y variables. Este enfoque permitirá una comprensión más completa de la efectividad del modelo, mejorando su capacidad de generalización y su utilidad en una variedad de condiciones climáticas, lo que beneficiará directamente la gestión de los recursos hídricos y la agricultura en regiones con climas subtropicales.

Bibliografía

- (CIMIS), T. C. I. M. I. S. (2023). The California Irrigation Management Information System (CIMIS). Retrieved 27/05/2023 from <https://cimis.water.ca.gov/>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. J. F., Rome. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. 300(9), D05109.
- Ferreira, L. B., da Cunha, F. F., de Oliveira, R. A., & Fernandes Filho, E. I. J. J. o. H. (2019). Estimation of reference evapotranspiration in Brazil with limited meteorological data using ANN and SVM–A new approach. 572, 556-570.
- Google. (2022). Brand Resource Center. Retrieved 24/09/2022 from <https://about.google/brand-resource-center/products-and-services/geo-guidelines/>
- Güven, A., Aytekin, A., Yüce, M. I., & Aksoy, H. J. C. S., Air, Water. (2008). Genetic programming-based empirical model for daily reference evapotranspiration estimation. 36(10-11), 905-912.
- Hargreaves, G. H., Allen, R. G. J. J. o. i., & engineering, d. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. 129(1), 53-63.
- Jovic, S., Nedeljkovic, B., Golubovic, Z., Kostic, N. J. C., & agriculture, e. i. (2018). Evolutionary algorithm for reference evapotranspiration analysis. 150, 1-4.
- Köppen, W., & Geiger, R. (1930). Handbuch der klimatologie (Vol. 1). Gebrüder Borntraeger Berlin.
- Koza, J. (1992). R. 1992 Genetic Programming: on the Programming of Computers by Means of Natural Selection. In: Cambridge, MA: MIT Press.

- Mattar, M. A. J. A. W. M. (2018). Using gene expression programming in monthly reference evapotranspiration modeling: A case study in Egypt. 198, 28-38.
- Mehdizadeh, S., Behmanesh, J., Khalili, K. J. C., & agriculture, e. i. (2017). Using MARS, SVM, GEP and empirical equations for estimation of monthly mean reference evapotranspiration. 139, 103-114.
- Meraz-Maldonado, N., & Flores-Magdaleno, H. J. W. (2019). Maize evapotranspiration estimation using penman-monteith equation and modeling the bulk canopy resistance. 11(12), 2650.
- Mobilia, M., & Longobardi, A. J. I. i. j. o. g.-i. (2021). Prediction of potential and actual evapotranspiration fluxes using six meteorological data-based approaches for a range of climate and land cover types. 10(3), 192.
- Pandir, Y., & Ulusoy, H. J. J. o. M. (2013). New generalized hyperbolic functions to find new exact solutions of the nonlinear partial differential equations. 2013.
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W.,...Vesala, T. J. B. (2006). Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. 3(4), 571-583.
- Shiri, J., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., Kisi, O., Landaras, G., Fard, A. F., & Marti, P. J. J. o. h. (2014). Generalizability of gene expression programming-based approaches for estimating daily reference evapotranspiration in coastal stations of Iran. 508, 1-11.
- Trajkovic, S., Todorovic, B., Stankovic, M. J. J. o. I., & Engineering, D. (2003). Forecasting of reference evapotranspiration by artificial neural networks. 129(6), 454-457.



Parte 3

Legislación y el sector agroalimentario

Capítulo 10

Cumplimiento normativo en la agroindustria quesera artesanal: propuesta basada en la formación de clústeres

Elia Trejo Trejo, Natalia Trejo, Celerino Arroyo Cruz & Carlos Abraham Reynoso Ocampo

Resumen

El presente estudio examina el cumplimiento normativo en la agroindustria quesera artesanal (AQA) de Ixmiquilpan, Hidalgo, a través de una metodología basada en clústeres para destacar diferencias en las prácticas de higiene y seguridad alimentaria entre diversos grupos de queserías. Se utilizó el método de Ward para el análisis de clústeres jerárquico y la evaluación del cumplimiento de la norma NOM-251-SSA1-2009, que derivó en la propuesta de tres clústeres representativos: Familiar-Comercial-Diversificado (FCD), Familiar-Comercial (FC), y Familiar Tradicional (FT). El análisis reveló diferencias significativas en el cumplimiento normativo entre estos grupos. El clúster FCD alcanzó el mayor nivel de cumplimiento, con un promedio del 68.10%,

sobresaliendo en áreas como el control de envasado, mantenimiento y limpieza, aunque mostró necesidades de mejora en transporte y capacitación. En contraste, el clúster FC obtuvo 55.21% y el FT 40.71% en materia de cumplimiento normativo, reflejando las restricciones impuestas por recursos financieros y técnico. Los resultados evidencian una considerable heterogeneidad en la alineación a los estándares de higiene y seguridad dentro del sector quesero artesanal, evidenciando la influencia de la estructura y los recursos económicos en las capacidades de cumplimiento normativo de cada clúster. La variabilidad encontrada enfatiza la necesidad de implementar acciones que reconozcan la diversidad operativa de las queserías y que propongan estrategias adaptativas para fortalecer tanto la calidad del producto como la eficiencia operativa. Se detecta la necesidad de una estrecha colaboración entre productores, reguladores e investigadores para facilitar la innovación y la transferencia de conocimientos, lo cual podría incluir el desarrollo de programas de capacitación adaptativos y la introducción de tecnologías apropiadas. Estas medidas, pueden coadyuvar a la mejora significativa en el cumplimiento de las normativas vigentes y elevar la calidad de los productos artesanales, contribuyendo así a un sector más competitivo y sostenible.

Introducción

La agroindustria quesera global representa un segmento importante dentro del sector alimentario, reflejando tanto la diversidad cultural como la relevancia económica a nivel mundial. En el período comprendido entre 2017 y 2022, la producción de queso experimentó un crecimiento constante, aumentando de 22 a 23.7 mil millones de toneladas, con una tasa de crecimiento anual estimada del 1.46% (OCDE-FAO, 2022). Este incremento subraya la creciente demanda global y la expansión de los mercados relacionados con productos lácteos. Para el año 2027, se anticipa que la producción alcance los 25 mil millones de toneladas, aunque con una tasa de crecimiento ligeramente reducida. En particular, México contribuyó significativamente a esta expansión, produciendo alrededor de 452,000 toneladas métricas de queso en 2022, lo que representa un incremento del 1% respecto al año anterior (SIAP-SADER, 2022). Este crecimiento destaca el papel emergente de México en el mercado quesero internacional y subraya su potencial para influir en las tendencias de consumo y producción a nivel global.

En México, la agroindustria quesera se bifurca en dos sectores prin-

cipales: las grandes empresas y la producción rural artesanal, cada una con características distintivas que reflejan sus estrategias operativas y mercados objetivos (Cervantes y Cesín, 2019; Cervantes, et al., 2016; Villegas, et al., 2016). Las grandes empresas queseras operan a través de instalaciones altamente tecnificadas y se enfocan en la producción masiva de quesos. Estas compañías suelen implementar procesos estandarizados y automatizados para maximizar la eficacia y cumplir con rigurosos estándares de higiene y calidad. Sus productos, que incluyen una variedad de quesos como panela, oaxaca y manchego, son generalmente destinados a un amplio mercado, tanto nacional como internacional, beneficiándose de redes de distribución y estrategias de marketing sofisticadas (Ghauri, et al., 2023, et al., 2016, Días & Hernández, 2016; Cervantes y Cesín, 2019).

Por otro lado, la producción rural artesanal de queso se caracteriza por su escala menor y sus métodos tradicionales, que han sido transmitidos de generación en generación (Cervantes, et al., 2019; Espejel, et al., 2018). Estas queserías rurales, frecuentemente ubicadas en comunidades agrícolas, utilizan leche cruda y procesos manuales que resaltan las cualidades únicas en sus productos (Días, et al., 2017; Díaz, et al., 2016; González, et al., 2016). Aunque operan con menos volúmenes de producción y un mercado más limitado, estas pequeñas empresas son cruciales para la economía local, que no solo proveen alimentos que forman parte de la identidad cultural regional, sino que también ofrecen empleo y fomentan la economía de sus comunidades. Sin embargo, enfrentan desafíos significativos en términos de cumplimiento normativo y acceso a mercados más competitivos debido a la falta de infraestructura y recursos financieros (Sánchez & Bautista, 2017; Chombo, 2017; Espejel, 2018).

El escenario actual en la agroindustria quesera artesanal proporciona un contexto apropiado para examinar los desafíos y oportunidades que enfrenta este sector, abarcando desde innovaciones en producción hasta estrategias de sostenibilidad y cumplimiento normativo. Estos elementos son cruciales para mantener la competitividad en el mercado global (Espejel et al., 2018; Sánchez, et al., 2016). En particular, la agroindustria quesera artesanal de Ixmiquilpan, Hidalgo, se destaca como un pilar fundamental de la economía rural. Esta agroindustria preserva técnicas tradicionales que han sido transmitidas de generación en generación, lo que contribuye significativamente a la diversidad gastronómica y al sustento económico de numerosas familias rurales (Espejel, et al., 2016; Cervantes et al., 2019; Trejo & Trejo, 2020). Aunque se carece de datos precisos sobre la producción específica de quesos en Ixmiquilpan,

registros de 2019 indican que la localidad generó aproximadamente 23,112 litros de leche. Se estima que una fracción de este volumen se vendió directamente, y el resto fue procesado en queserías dentro y en las cercanías del municipio (SIAP, 2019). En 2014, la Secretaría de Desarrollo Económico reconoció la vocación productiva de Ixmiquilpan como predominantemente agroindustrial, identificando a la leche como el principal recurso para procesamiento. Este reconocimiento resalta la importancia estratégica del sector lácteo no solo como una fuente crucial de ingresos para las familias productoras, son también como un pilar de desarrollo agroindustrial regional (SEDECO, 2014).

A pesar de su significativo impacto económico y cultural, la agroindustria quesera de Ixmiquilpan enfrenta importantes retos en cuanto a estandarización y cumplimiento normativo. Específicamente, la normativa NOM-251-SSA1-2009, que regula las prácticas de higiene en la elaboración de alimentos, representa un desafío constante (Secretaría de Salud, 2009). En este contexto, se ha propuesto la formación de clústeres como una solución viable para mejorar la competitividad y la capacidad de innovación en el sector agroalimentario (Tapia, et al., 2015; Ovallos y Puello, 2020; Parra, 2021).

Los clústeres podrían facilitar la adopción de mejores prácticas y tecnologías avanzadas, mejorando así tanto el cumplimiento normativo como la calidad del producto. Sin embargo, a pesar de su potencial para inducir cambios positivos en la agroindustria quesera artesanal, se observa una carencia de investigaciones exhaustivas que documenten su formación y efectividad en cumplir con los estándares normativos establecidos, tales como la NOM-251-SSA1. Adicionalmente, factores como la resistencia al cambio, el desconocimiento de las normativas y las limitaciones financieras constituyen barreras significativas que impiden la estandarización de prácticas de higiene y procesos (Bastías, 2013; Bravo, 2013; Villegas et al., 2016; Chombo, 2017; Espejel et al., 2018).

Por lo tanto, este estudio propone desarrollar una estrategia de clústeres para la agroindustria quesera artesanal en Ixmiquilpan, Hidalgo, y evaluar su conformidad con la NOM-251-SSA1-2009. Se espera que este análisis no solo proporcione un panorama detallado del estado actual de cumplimiento normativo en un sector vital para la seguridad alimentaria, sino que desarrolle estrategias económicas que promuevan prácticas sostenibles y competitivas. Este enfoque podría servir como un modelo replicable en otras regiones y sectores tanto dentro de México como en otros países con condiciones similares.

Materiales y métodos

Diseño del estudio. Este estudio se clasifica como descriptivo-correlacional y adopta un enfoque mixto para analizar el cumplimiento de la normativa NOM-251-SSA1-2009 en la agroindustria quesera artesanal de Ixmiquilpan, Hidalgo (Hernández, et al., 2018; Hernández y Mendoza, 2018). Se estructura en dos fases: análisis de clústeres y evaluación del cumplimiento normativo, empleando técnicas cuantitativas y cualitativas para obtener una comprensión integral del tema.

Selección y preparación de variables. Este estudio se basa en la investigación previa de Trejo y Trejo (2020), que aplicó el enfoque de Sistemas Agroalimentarios Localizados (SIAL) para analizar la estructura de la Agroindustria Quesera Artesanal (AQA) en Ixmiquilpan, Hidalgo. Utilizando como referencia este marco inicial, se procedió a la selección y codificación de variables clave. Las variables con baja variabilidad fueron excluidas para evitar distorsiones en posterior análisis de clústeres. Las variables seleccionadas reflejan aspectos organizacionales, de producción y de comercialización, fundamentales para caracterizar las operaciones queseras (Fraenkel, et al., 2012; Krueger y Casey, 2015; Hair, et al., 2019).

Muestreo y tamaño de la muestra. El área de estudio incluye 29 unidades económicas dedicadas al manejo y procesamiento de leche, según datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática (INEGI, 2020). Un reconocimiento de campo determinó que, de estas, solo 18 unidades realizan efectivamente el procesamiento de la leche. Para este estudio se seleccionaron 14 queserías mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. La elección de este método se justificó por la disposición de las unidades a participar y su representatividad en el sector, aspectos clave para la investigación. Esta práctica está respaldada por Hernández et al., (2018), quienes destacan la validez de tal enfoque en estudios de naturaleza exploratoria.

En el proceso de caracterización de estas queserías, se planificó inicialmente evaluar el cumplimiento de la normativa NOM-251-SSA1-2009 en todas las unidades seleccionadas. Sin embargo, tres queserías optaron por no participar en la verificación de dicha norma, reduciendo el número de unidades analizadas a 11. Este cambio se documenta para mantener la transparencia del estudio y la validez de los resultados obtenidos.

Análisis de clústeres. Utilizando el método de Ward para el análisis de clústeres jerárquico, se agruparon las queserías en conglomerados homogéneos basándose en las variables seleccionadas. Este método

es adecuado para identificar grupos naturales dentro de los datos, optimizando la homogeneidad interna y la heterogeneidad entre grupos (Krueger y Casey, 2015).

Validación estadística de los clústeres. La validación de los clústeres se realiza mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05, para determinar diferencias estadísticamente significativas entre los grupos. Adicionalmente, se llevan a cabo las pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y de Bartlett para confirmar la adecuación del modelo de análisis de clústeres, garantizando que las variables seleccionadas están correlacionadas apropiadamente para justificar la agrupación (Fraenkel et al., 2012).

Evaluación de cumplimiento normativo. Se desarrolló una guía de verificación alineada con los 14 puntos críticos de la NOM-251-SSA1-2009 (instalaciones y áreas, equipo y utensilios, servicios, almacenamiento, operaciones, control de materias primas, control del envasado, mantenimiento y limpieza, control de plagas, salud e higiene personal, transporte, capacitación, control de operaciones y documentación y registros). La normalidad de los datos se verifica utilizando las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, asegurando la aplicabilidad de técnicas estadísticas posteriores para el análisis descriptivo que evalúa el nivel de cumplimiento en cada clúster identificado.

Procedimientos estadísticos. El análisis estadístico se realiza utilizando el software SPSS versión 29, abarcando desde la codificación de datos hasta el análisis de clústeres y evaluaciones de cumplimiento. Este software facilita la ejecución de técnicas estadísticas avanzadas y es recomendado para la investigación en ciencias sociales y de la salud (Hair et al., 2019).

Este enfoque metodológico robusto y sistemático asegura la replicabilidad y validez de los resultados, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y para el desarrollo de políticas dirigidas a mejorar la seguridad alimentaria en la industria quesera artesanal.

Resultados

Propuesta de caracterización de la AQA. En el estudio realizado por Trejo y Trejo (2020), se empleó el enfoque SIAL para identificar 25 variables que describen las actividades de producción y distribución de quesos artesanales en la agroindustria rural de Ixmiquilpan, Hidalgo. Siguiendo las recomendaciones de Hair, et al. (2019), Kruger & Casey (2015) y Fraenkel et al. (2012), el análisis de conglomerados comenzó con la exclusión de variables, derivadas de dicho estudio, que

no presentaban variabilidad significativa, con el objetivo de eliminar cualquier factor que pudiera introducir errores en la formación de clústeres. De este proceso emergieron nueve variables con suficiente variabilidad estadística para ser consideradas en el análisis posterior. Las variables se categorizaron en tres grupos: organizacionales, que incluyen antigüedad en el mercado, fuentes de ingresos, actividades complementarias, tipo de mano de obra y empleos generados; producción, que abarca el volumen de leche procesado, el número de tipos de quesos elaborados y el origen de la materia prima; y comercialización, representada por los puntos de venta.

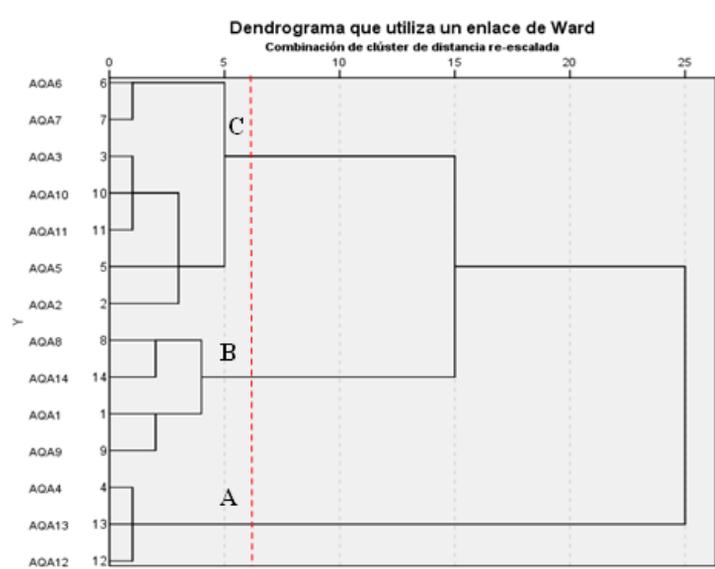
Se emplearon las nueve variables seleccionadas (Tabla 1) para realizar un análisis de conglomerados jerárquicos utilizando el método de Ward (Hair, et al., 2019), lo que permitió identificar tres grupos homogéneos (Figura 1). El primer grupo, denominado grupo A, está compuesto por tres queserías; el segundo (B), incluye cuatro queserías; y el tercer grupo (C), está formado por siete queserías. Estos grupos representan conglomerados homogéneos de queserías según las variables analizadas (Krueger y Casey; Hari, et al., 2019).

Tabla 1. Codificación de las variables en el análisis de clústeres

Clasificación	Criterio y/o variable	Identificación de la agroindustria quesera artesanal (AQA)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Organizacionales	Antigüedad ¹	26	20	18	25	12	17	15	9	20	10	12	20	20	6
	Fuente de ingresos ²	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1
	Act. Complementaria ³	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
	Mano de obra ⁴	1	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2
	Empleos generados ⁵	4	6	6	10	5	7	7	4	2	5	7	10	12	4
Producción	Volumen de leche (miles de litros por día) ⁶	1.8	3.5	3.6	6	3.6	5	54	1.6	1	3	5	9.1	6.6	2.4
	Tipo de quesos elaborados ⁷	4	2	4	5	3	4	3	4	4	3	4	6	6	3
	Origen de materia prima ⁸	1	2	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1
Comercialización	Mercado o puntos de venta ⁹	2	2	2	3	2	3	3	2	1	2	3	3	3	2

1Antigüedad: años que tiene en el mercado la quesería; 2 Fuente de ingresos:(1) Propio; (2) Financiamiento; (3) Ambos; 3Actividades complementarias: (1) Ninguna; (2) Ganadería y/o agricultura; 4 Mano de obra: (1) familiar; (2) Familiar y contratada; 5Número de empleos generados por la quesería; 6Volumen de leche procesada; 7Número de tipos de quesos que se producen en la quesería; 8Origen de materia prima (leche): (1) Hato de su propiedad; (2) Hato de su propiedad y comprada; (3) Comprada; 9Puntos de venta: (1) Mercado local; 2) Mercado local y regional; (3) Mercado local, regional y nacional.

Figura 1. Dendrograma para la formación de clústeres de la AQA.



Validación de los conglomerados: para garantizar la robustez de los conglomerados identificados en este estudio, se efectuó una validación estadística mediante un análisis de varianza (ANOVA). Este análisis evaluó las diferencias entre los grupos formados, y los resultados, presentados en la Tabla 2, revelan un valor del estadístico F de 24.291 con un nivel de significancia inferior a 0.001. Esta significancia estadística confirma que existe una variación intergrupala sustancialmente mayor que la variación intragrupal, lo que valida la eficacia del método de Ward, para discernir conglomerados claramente definidos

y distintos entre sí. Además, las pruebas de KMO y de Bartlett (Tabla 3) corroboran que las variables analizadas están adecuadamente correlacionadas para justificar la formación de estos conglomerados.

En concordancia con Ovallos y Puello (2020), Krueger y Casey (2015) y Hair et al., (2019) estos hallazgos respaldan la efectividad del método de Ward en la creación de conglomerados bien diferenciados. Por lo tanto, se puede afirmar que los tres conglomerados identificados poseen la confiabilidad estadística necesaria para su posterior descripción.

Tabla 2. Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) para comparar las medias de los conglomerados identificados ($\alpha=0.05$).

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	52272351.20	2.00	26136175.60	24.29	0.00
Dentro de grupos	11835684.50	11.00	1075971.32		
Total	64108035.70	13.00			

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ (La media de cada uno de los conglomerados es igual).
H1: Al menos una μ es distinta

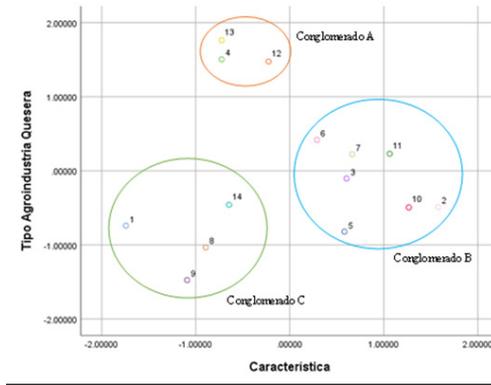
Tabla 3. Validación de los clústeres propuestos.

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.69
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	73.42
	gl	28
	Sig.	0

Análisis interpretativo de los conglomerados identificados: de las queserías analizadas, el 21% se agrupa en el conglomerado A, el 50% en el conglomerado B, y el 28% en el conglomerado C (Figura 2). Esta distribución indica una variabilidad significativa en las características

de las queserías que contribuyen a la formación de estos grupos diferenciados (Kruger & Puello, 2015).

Figura 2. Conglomerados para la AQA.



Criterios para clasificación de los clústeres: con base en la Tabla 4 se definen cuatro criterios principales para clasificar las queserías artesanales analizadas en este estudio: familiar, tradicional, comercial y diversificada, los cuales serán de utilizad para clasificarlos posteriormente.

Familiar: las queserías bajo esta clasificación son gestionadas administrativa, comercial y productivamente por familias, con actividades llevadas a cabo por mano de obra familia y/o contratada. Según Sánchez et al., (2016) y Sánchez, et al., (2017) las unidades de producción familiar desempeñan un papel crucial en mitigar problemas como la pobreza y la inseguridad alimentaria en áreas rurales, transformando estos desafíos en oportunidades de sustento local y regional. Además, estas unidades de producción contribuyen significativamente al aumento del ingreso familiar a través de la generación de empleos, actuando como catalizadores de la dinámica socioeconómica local. En este contexto, es crucial destacar que, hasta la fecha, las queserías investigadas que se ubican en esta clasificación siguen siendo predominantemente gestionadas por familias, lo que subraya su rol como pilares fundamentales de la producción agrícola en sus comunidades.

Tradicional: incluye queserías que complementan la producción de queso con actividades agrícolas y pecuarias. Utilizan leche de sus propios hatos ganaderos, y su capacidad de procesamiento no excede los 3000

litros por día. Los quesos son comercializados a nivel local y regional.

Comercial: las queserías clasificadas dentro de este grupo tienen una capacidad de producción superior a los 3000 litros de leche por día y se enfocan primordialmente en la elaboración y venta de quesos. Estos productos se distribuyen en mercados locales, regionales y, ocasionalmente, nacionales. Destacan por generar entre 5 y 7 empleos permanentes, reflejando una estructura organizativa más compleja y orientada hacia un alcance comercial más amplio.

Diversificada: las queserías que se incluyen en esta categoría se caracterizan por ofrecer hasta cinco tipos diferentes de quesos, incluyendo variantes naturales y enchilados, y por su capacidad de colocar estos productos en mercados locales, regionales y nacionales. Operan con un volumen de procesamiento que supera los 3000 litros diarios, obtenidos de proveedores externos, y emplean a más de 7 trabajadores de forma permanente, lo que indica una mayor diversificación tanto en la producción como en la comercialización.

Tabla 4 . Criterios para la formación de los clusters de la AQ4

Criterio	Variable	Cluster		
		A	B	C
Organizacionales (operación y funcionamiento)	Número y por ciento de queserías que forman el conglomerado	3 -21%	7 -50%	4 -29%
	Antigüedad (Rango de años)	20 a 25	10 a 20	6 a 26
	Fuente de ingresos	Han recibido financiamiento	No han recibido financiamiento	No han recibido financiamiento
	Actividades complementarias	Solo se dedica a la transformación de la leche	Agricultura y ganadería	Agricultura y ganadería
	Mano de obra	100% familiar y contratada	86% familiar y contratada 14% familiar	75% familiar 25% familiar y contratada
	Empleos generados (Rango)	10 a 12	5 a 7	2 a 4

Producción	Volumen de leche procesada por día (Rango)	6000 a 9100	3000 a 5400	1000 a 2400
	Tipo de quesos producidos	Entre 5 y 6 Asadero, oaxaca, manchego, ranchero, panela y variantes de estos (enchilado y/o natural)	Entre 3 y 4 Asadero, manchego, ranchero, panela	Entre 3 y 4 Asadero, manchego, ranchero, panela
	Origen de materia prima	100% comprada	29% hato de su propiedad y comprada 71% comprada	50 % hato de su propiedad 50 % hato de su propiedad y comprada
Comercialización	Mercado o puntos de venta	100% colocan los quesos en el mercado local, regional y nacional	57 % mercado local y regional 43% mercado local, regional y nacional	25% mercado local 75% mercado local y regional

Descripción de los clústeres de la AQA: de acuerdo con los criterios establecidos previamente y dado que en los clústeres se cumple con más de un criterio, la clasificación de los mismos ha quedado establecida como; familiar-tradicional (FT), familiar comercial (FC) y familiar-comercial-diversificada (FCD), como se detalla en la Tabla 5.

Clúster Diversificado-Comercial (FCD): el clúster FCD está compuesta por tres queserías (21%). Estas queserías procesan entre 6000 y 9100 litros de leche diarios. Y elaboran entre cinco y seis quesos, incluyendo asadero, Oaxaca, manchego, ranchero, panela). Ofrecen tres presentaciones: natural, enchilado verde y enchilado rojo. con tres presentaciones, natural, enchilado verde y enchilado rojo. La totalidad de la leche requerida es adquirida a ganaderos locales o a queserías del grupo familiar-tradicional (FT). Este grupo se caracteriza por una fuerza laboral basada principalmente en empleados, generando más de diez empleos. Los productos son comercializados en mercados locales, regionales, estatales y nacionales, incluyendo centrales de abasto de Pachuca, Querétaro y Ciudad de México. Inicialmente, estas queserías recibieron financiamiento para comenzar operaciones.

Clúster Familiar Comercial (FC): compuesto por siete queserías, que constituyen el 50% del total, el conglomerado FC procesa diariamente entre 3000 y 4500 litros de leche, transformándolos en tres o

cuatro tipos de quesos. Este grupo complementa sus operaciones que-
seras con actividades agrícolas y pecuarias; el 29% de la leche proviene
de su propio hato, mientras que el resto es comprado a recolectoras y
centros de acopio. Un 57% de estas queserías se enfoca en los merca-
dos local y regional, mientras que el 43% ha comenzado a explorar el
mercado nacional. La mano de obra es una combinación de familiar y
contratada, generando entre cinco y siete empleos. Este grupo no ha
recibido financiamiento previo.

Clúster Familiar-Tradicional (FT): el conglomerado FT incluye
cuatro queserías, el 29% del total, involucradas en la agricultura y
ganadería. Producen y procesan menos de 2400 litros de leche por
día para elaborar un máximo de cuatro tipos de quesos. El 50% de la
leche es obtenida de sus propios hatos y en el restante de la compra a
pequeños productores (boteros y recolectores). El 25% de estas que-
serías opera exclusivamente en el mercado local, y el resto expande su
alcance al mercado regional. La mayoría emplea únicamente mano de
obra familiar y genera hasta cuatro empleos. Este grupo no ha recibido
financiamiento externo.

En los tres clústeres, las familias están profundamente involucradas
en diversas facetas del negocio, incluyendo la producción, comerciali-
zación y gestión administrativa.

Tabla 5. Propuesta de caracterización de la AQA

Clústeres propuestos	Características	Clasificación
A	Procesan entre 6000 y 9100 litros de leche por día.	Familiar-comercial-diversificada (FCD)
	Elaboran entre 5 y 6 tipos de quesos.	
	La materia prima que utilizan la compran a boteros, recolectores y centros de acopio.	
	La mano de obra que utilizan es familiar y contratada.	
	Recibieron financiamiento de forma inicial y continúan operaciones con ingresos propios.	
	Tienen más de 20 años en el mercado	
	Los quesos son vendidos en el mercado local, regional y nacional.	
	Se dedican exclusivamente a la producción de quesos.	
	Genera entre 10 y 12 empleos.	
B	Procesan entre 3000 y 5400 litros de leche por día	Familiar—comercial (FC)
	Elaboran entre 3 y 4 tipos de quesos.	
	La materia prima que utilizan la compran a boteros, recolectores y centros de acopio, pero también utilizan la producida por su hato.	
	La mano de obra que utilizan es familiar y contratada.	
	No han recibido financiamiento, operan con recursos propios desde su inicio.	
	Tienen entre 10 y 20 años en el mercado	
	Los quesos son vendidos en el mercado local, regional y estatal.	
	Se principal actividad es la quesería y lo complementan con la agricultura y ganadería.	
Genera entre 5 y 7 empleos.		

C	Procesan entre 1000 y 2400 litros de leche por día	Familiar-tradicional (FT)
	Elaboran entre 3 y 4 tipos de quesos	
	La materia prima que utilizan es la producida por sus hatos, ocasionalmente la compran.	
	La mano de obra que utilizan es familiar y muy rara vez contratada.	
	Desde el inicio operan con ingresos propios.	
	El tiempo en el mercado es heterogéneo desde 6 hasta 20 años.	
	Solo vende quesos en el mercado local y regional.	
	Combinan la quesería con la agricultura y ganadería.	
	Genera entre 2 y 4 empleos.	
Fuente: Elaboración propia (2020).		

Cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 por clústeres: los resultados presentados en la Tabla 6, basados en las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk aplicadas a los 14 criterios de la NOM-251-SSA1-2009, no proporcionan evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad en las distribuciones de los datos analizados. Este hallazgo sugiere que los datos de los grupos estudiados son adecuadamente normalizados, permitiendo su uso en análisis estadísticos subsiguientes que requieran la suposición de una distribución normal. La conformidad con la normalidad es crucial para asegurar la validez de los resultados obtenidos al evaluar el cumplimiento de los criterios establecidos en la norma dentro de cada uno de los clústeres formados (Parra, 2021; Ovallos & Puello, 2020). Esta adecuación garantiza que las técnicas estadísticas empleadas, que presuponen normalidad, sean aplicables y fiables en el contexto del análisis realizado.

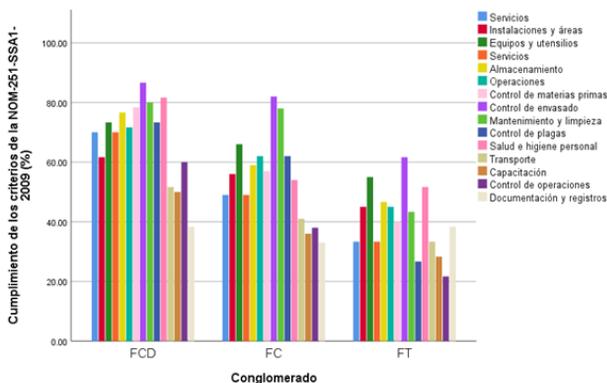
Tabla 6. Prueba de normalidad de las variables analizadas en el test de la NOM-251-SSA1-2009

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Prueba para grandes muestras			Prueba para pequeñas muestras		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
FCD	0.197	14	0.145	0.929	14	0.298
FC	0.117	14	0.200*	0.956	14	0.661
FT	0.1	14	0.200*	0.985	14	0.993

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

Cumplimiento de la higiene por cada uno de los clústeres de la AQA (NOM-251-SSA1-2009). La Figura 3 revela un panorama diferenciado del grado de cumplimiento de la norma NOM-251-SSA1-2009 entre los conglomerados estudiados. El conglomerado Familiar-Comercial-Diversificada (FCD) exhibe el más alto cumplimiento en cada uno de los sectores evaluados (en promedio 68.095%), seguido por los conglomerados Familiar-Comercial (FC=55.21%) y Familiar-Tradiciona (FT=40.714%). Esta jerarquía en el cumplimiento normativo es especialmente relevante para aquellos productores que aspiran a comercializar sus quesos en mercados exigentes, como son las centrales de abastos de la Ciudad de México, Querétaro y Pachuca. En dichos mercados, se requiere que los productos mantengan estándares elevados de calidad y seguridad, evitando problemas que afecten su vida útil, tales como el desarrollo de hongos o la presencia de microorganismos nocivos. Los hallazgos concuerdan con las observaciones de Bastías (2013) y Bravo (2013), quienes enfatizan que la competitividad en el mercado actual depende intrínsecamente de la calidad e inocuidad de los alimentos. Además, a menudo es imperativo demostrar que los productos se elaboran en instalaciones que cumplen con la normativa vigente, lo que subraya la importancia del cumplimiento normativo como un factor clave para la expansión y el éxito comercial en el sector quesero.

Figura 3. Cumplimiento de los puntos de la norma por conglomerado



Cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 con respecto a los clústeres propuestos. La Tabla 7 refleja el nivel de cumplimiento de la norma NOM-251-SSA1-2009 para los clústeres de las queserías artesanales evaluados. Se destaca que el clúster FCD sobresale en los aspectos de control de envasado y mantenimiento y limpieza, con cumplimientos del 86.7% y 80%, respectivamente. No obstante, se identifican áreas significativas de mejora en transporte y capacitación, con un cumplimiento del 51.7% y 50% respectivamente, y una marcada deficiencia en la gestión de documentación y registros, con solo un 38.3% de cumplimiento. Por otro lado, la AQA-FT revela una necesidad de atención en control de operaciones, control de plagas, capacitación y transporte, con los porcentajes de cumplimiento variando notablemente en comparación con FCD. La puntuación en todos los criterios de la norma para AQA-FT no supera el 65%, destacando las dificultades expresadas por los productores cuando se enfrentan a las evaluaciones de cumplimiento por parte del organismo verificador de la norma, que opera bajo un sistema binario de ‘cumple’ o ‘no cumple’.

Los desafíos financieros para realizar las adecuaciones necesarias son significativos, aunque algunos, como la capacitación y el etiquetado, resultan más accesibles. Investigaciones de Villegas et al. (2016), Chombo (2017) y Espejel (2018) sugieren que la normativa actual favorece a la agroindustria a gran escala, lo que plantea obstáculos para que los productores artesanales cumplan con los estándares. Contrastando estas opiniones, Espejel et al. (2016), González et al. (2016) y Cervantes et al. (2019) argumentan que la adaptación a la normativa es imperativa para mantener la competitividad en el mercado, instando a la innovación como medio para alcanzar este fin.

Tabla 7. Cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 por conglomerado (%)

Cumplimiento de los criterios de la NOM-251-SSA1-2009 (%)														
	IA	EU	SE	AL	OP	CMP	CE	ML	CP	SH	TR	CA	CO	DR
FCD	0	61.7	73.3	70	76.7	71.7	78.3	86.7	80	73.3	81.7	51.7	60	38.3
	s	17.6	5.8	20	2.9	2.9	2.9	10.4	0	15.3	7.6	28.4	17.3	18.9
FC	0	56	66	49	59	62	57	82	78	62	54	41	38	33
	0	21.9	14.8	14.3	20.1	14.4	11	8.4	11	10.4	10.8	12.5	11.5	6.7
FT	s	45	55	33.3	46.7	45	40	61.7	43.3	26.7	51.7	33.3	21.7	38.3
		5	13.2	15.3	23.1	18	17.3	20.2	15.3	12.6	23.6	17.6	5.8	7.6

Conglomerado:	OP= Operaciones
FCD= Familiar-comercial-diversificado	CMP= Control de materias primas
FC= Familiar-comercial	CE= Control de envasado
FT= Familiar-Tradicional	ML= Mantenimiento y limpieza
x=media	CP= Control de plagas
s= desviación estándar	SH= Salud e higiene
IA= Instalaciones y áreas	TR= Transporte
EU= Equipos y utensilios	CA= Capacitación
SE= Servicios	CO= Control de operaciones
AL= Almacenamiento	DR= Documentos y registros

Cumplimiento global de la NOM-251-SSA1-2009 por conglomerado o clúster. La verificación estadística de la conformidad con la norma NOM-251-SSA1-2009 revela variaciones notables en el cumplimiento promedio entre los conglomerados estudiados: un 68.10% para FCD, 55.21% para FC y 50.71% para FT, dejando brechas respectivas del 31.9%, 44.79% y 49.29% en la conformidad que deben ser abordadas (Figura 4). Los estadígrafos ilustran esta variabilidad, con una desviación estándar que refleja una heterogeneidad intrínseca en el cumplimiento entre las queserías dentro de cada conglomerado (Tabla 7). Estos resultados señalan una oportunidad sustancial de mejora en el sector quesero artesanal, particularmente en los aspectos de control de envasado, mantenimiento, limpieza y documentación.

Al contrastar estos resultados con la literatura especializada, las brechas de cumplimiento observadas coinciden con los hallazgos reportados por autores como Villegas et al. (2016) y Espejel (2018), quienes identifican que la normativa vigente representa desafíos particulares para las operaciones de pequeña escala. Mientras que estos investigadores sugieren que las regulaciones tienden a favorecer a las grandes agroindustrias, la artesanía quesera enfrenta obstáculos en términos de recursos financieros y técnicos para cumplir con los estándares (Chombo, 2017; Sánchez y Bautista, 2017; Sánchez et al., 2016). No obstante, la relevancia de adherirse a la normativa no se puede subestimar ya que, según González et al. (2017) Cervantes y Cesín (2019) y Cervantes et al. (2019), el cumplimiento normativo es intrínsecamente vinculado a la competitividad y sostenibilidad en el mercado. La innovación se destaca como una estrategia viable para superar estas barreras, y la

capacitación, junto con mejoras incrementales en la infraestructura, pueden ser pasos pragmáticos hacia el cumplimiento normativo. Este enfoque equilibrado podría ofrecer una ruta viable para que los productores artesanales mejoren su cumplimiento, alineándose más estrechamente con las prácticas de seguridad alimentaria reconocidas y esperadas tanto a nivel nacional como internacional.

Figura 4. Porcentaje promedio de cumplimiento y brecha de la NOM-251-SSA1-2009.

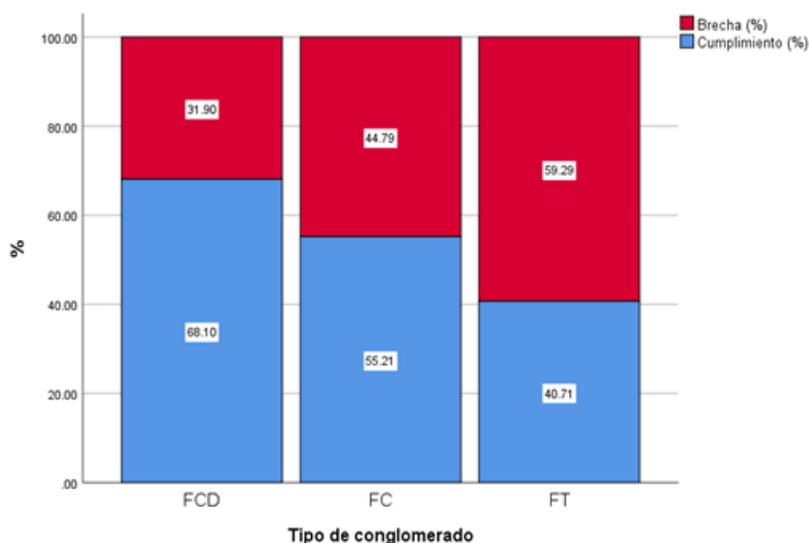


Tabla 8. Estadígrafos del nivel de cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 por conglomerado.

Conglomerado	Cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 (%)				
	Media	Desviación estándar	Desviación del error de la media	Mínimo	Máximo
FCD	68.1	13.9	3.71	38.33	86.67
FC	55.21	14.84	3.97	33	82
FT	40.71	11.34	3.03	21.67	61.67

Validación del nivel de cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 por los clústeres. Toda vez que los datos cumplen los criterios de normalidad, el análisis de varianza y la posterior prueba de Tukey (Figura 5, Tabla 9) permiten aseverar que el nivel de cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 en los conglomerados de queserías artesanales demostró diferencias estadísticamente significativas entre los grupos FCD, FC y FT. El conglomerado FCD, con un cumplimiento promedio del 68.09%, difiere de los conglomerados FC y FT, los cuales muestran un cumplimiento del 55.21% y 40.71% respectivamente. Estas diferencias y acorde a lo referido por Bravo, (2013), Cervantes y Cesín (2019) y Cervantes et al. (2019) podrían atribuirse a la diversidad en los mercados a los que cada grupo está orientado, lo cual influye en sus respectivas prácticas de producción y cumplimiento normativo.

El conglomerado FCD, que distribuye sus productos a nivel local, regional y nacional, necesita garantizar una vida de anaquel más extensa debido a la demanda de un mercado más amplio y competitivo, lo que requiere un control riguroso de la producción, transporte y almacenamiento. Por otro lado, los conglomerados FC y FT, que operan principalmente en mercados locales y regionales con una rápida rotación de productos, pueden enfrentar menos exigencias en términos de vida de anaquel.

Los hallazgos de este estudio coinciden con lo referido por Bastías et al. (2013), Cervantes et al. (2019), Chombo (2017) y Díaz et al. (2017) quienes enfatizan la importancia del cumplimiento normativo como una respuesta a la demanda del mercado y la expectativa de los consumidores por productos inocuos y de calidad. Bastías et al. (2013) y Cervantes y Cesín (2019), indican que acceder a mercados más competitivos requiere el cumplimiento de estándares sanitarios y de inocuidad alimentaria, aspectos que los consumidores no están dispuestos a negociar. En ese sentido y a pesar de que el clúster identificado FCD no cumple íntegramente con los criterios de la norma de referencia, este grupo muestra un progreso más notorio en comparación con FC y FT.

Figura 5. Diagrama de cajas de los conglomerados de la AQA

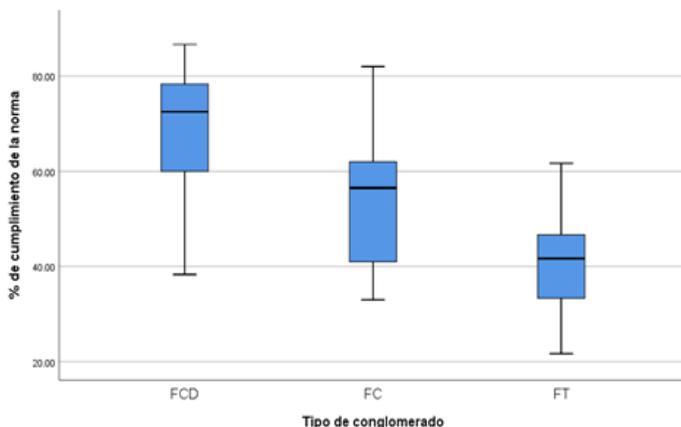


Tabla 9 Cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 por conglomerado.

% de cumplimiento de la norma			
HSD Tukeya			
Tipo de conglomerado	Subconjunto para alfa = 0.05		
	1	2	3
FT	40.71		
FC		55.21	
FCD			68.09
Sig.	1	1	1
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica			

Esta investigación subraya que, aunque las queserías artesanales pueden enfrentar desafíos inherentes al cumplimiento total de la normativa, aquellas con aspiraciones de alcanzar mercados más exigentes reconocen la necesidad de alinearse con las expectativas normativas. Además, sugiere la necesidad de un enfoque diferenciado para el cumplimiento normativo que considere el alcance del mercado objetivo y las capacidades de las queserías para implementar las mejoras requeridas.

Propuestas de mejora para los clústeres propuestos. En el contexto de la agroindustria quesera artesanal de Ixmiquilpan, Hidalgo, es imperativo abordar las deficiencias en el cumplimiento de la norma NOM-251-SSA1-2009 para asegurar la inocuidad y calidad de los productos lácteos. La Tabla 10 presentada a continuación ofrece una serie de propuestas de mejora estructuradas a corto, mediano y largo plazo para cada conglomerado identificado: Familiar-Comercial-Diversificado (FCD), Familiar-Comercial (FC), y Familiar-Tradicional (FT). Estas propuestas están diseñadas para abordar solo algunos puntos específicos de la norma, tales como instalaciones y áreas, equipos y utensilios, control de envasado, mantenimiento y limpieza, y capacitación. Es fundamental que los ajustes en el cumplimiento normativo se adapten progresivamente a la capacidad financiera y técnica de cada agroindustria para mantener la viabilidad económica y facilitar la implementación a diferentes escalas.

Investigaciones previas destacan la importancia de personalizar las prácticas de seguridad para alinearlas con las capacidades específicas de las queserías artesanales (Villegas et al., 2016; Espejel, 2018). La integración de tecnologías adecuadas podría simplificar la adopción de estas prácticas (Gutiérrez et al., 2017; Cervantes et al., 2019). Por ello, la implementación de estrategias que promuevan tanto el cumplimiento normativo como la sostenibilidad económica y ambiental es esencial. En este sentido, la colaboración de la comunidad científica y tecnológica es crucial para diseñar soluciones efectivas que no solo cumplan con la legislación vigente, sino que también apoyen la sostenibilidad a largo plazo de la industria quesera artesanal.

Tabla 10. Propuesta de mejora de cumplimiento de la NOM-251-SSA1-2009 por clúster.

Punto de la norma	Propuesta de mejora por clúster		
	Familiar-Comercial-Diversificado (FCD)	Familiar-Comercial (FC)	Familiar-Tradicional (FT)
Instalaciones y áreas	<p>Corto plazo: Instalar divisiones claras entre áreas para evitar contaminación cruzada.</p> <p>Mediano plazo: Renovar materiales de construcción para facilitar la limpieza.</p> <p>Largo plazo: Expandir o remodelar las instalaciones para cumplir estándares internacionales.</p>	<p>Similar a FCD, pero con énfasis en mejoras incrementales dependiendo del presupuesto disponible.</p>	<p>Corto plazo: Mejorar la señalización y separación funcional dentro de las áreas de trabajo.</p> <p>Mediano plazo: Aplicar recubrimientos higiénicos en paredes y suelos.</p> <p>Largo plazo: Invertir en una reforma estructural para modernizar las instalaciones.</p>
Equipos y utensilios	<p>Corto plazo: Reemplazar utensilios de madera por acero inoxidable.</p> <p>Mediano plazo: Implementar un programa de mantenimiento regular para todo el equipo.</p> <p>Largo plazo: Automatizar procesos para minimizar el contacto humano.</p>	<p>Corto plazo: Capacitación en mantenimiento y limpieza de equipos.</p> <p>Mediano plazo: Adquisición gradual de equipos modernos.</p> <p>Largo plazo: Transición completa a equipos de alta eficiencia y fácil limpieza.</p>	<p>Corto plazo: Realizar auditorías de los equipos actuales y reemplazar los más deteriorados.</p> <p>Mediano plazo: Compra de equipos básicos de acero inoxidable.</p> <p>Largo plazo: Establecer un plan de renovación de equipos cada 5 años.</p>

<p>Control de envasado</p>	<p>Corto plazo: Implementar un sistema de trazabilidad para el envasado. Mediano plazo: Capacitar al personal en mejores prácticas de envasado. Largo plazo: Establecer una línea de envasado semiautomática.</p>	<p>Corto plazo: Estándares básicos de higiene en el envasado. Mediano plazo: Mejorar los materiales de empaque para aumentar la conservación. Largo plazo: Adquisición de maquinaria de envasado al vacío.</p>	<p>Corto plazo: Uso de materiales desechables y estériles para envasar. Mediano plazo: Introducir etiquetado que cumpla con las normas de información al consumidor. Largo plazo: Crear una cooperativa para comprar equipo de envasado compartido.</p>
<p>Mantenimiento y limpieza</p>	<p>Corto plazo: Establecer un calendario de limpieza más riguroso. Mediano plazo: Capacitaciones regulares en higiene y mantenimiento. Largo plazo: Invertir en sistemas de limpieza automatizados.</p>	<p>Corto plazo: Designar personal específico para limpieza. Mediano plazo: Implementar procedimientos estandarizados de limpieza. Largo plazo: Renovación de las áreas para facilitar la limpieza (p.ej., suelos con la pendiente técnicamente requerida).</p>	<p>Corto plazo: Formación básica en higiene para todos los trabajadores. Mediano plazo: Adquirir mejores suministros de limpieza. Largo plazo: Establecer un sistema de gestión de calidad que incluya la limpieza como una auditoría regular.</p>

<p>Capacitación</p>	<p>Corto plazo: Sesiones mensuales de capacitación en prácticas de higiene.</p> <p>Mediano plazo: Desarrollar un programa de certificación interna.</p> <p>Largo plazo: Crear una academia de formación para empleados y otros productores locales.</p>	<p>Corto plazo: Taller inicial sobre NOM-251 y buenas prácticas de manufactura.</p> <p>Mediano plazo: Capacitación continua con expertos externos.</p> <p>Largo plazo: Alianzas con instituciones educativas para cursos formales.</p>	<p>Corto plazo: Pláticas informativas sobre higiene y seguridad alimentaria.</p> <p>Mediano plazo: Capacitaciones prácticas semestrales.</p> <p>Largo plazo: Implementar un sistema de mentoría por parte de queserías más grandes o con mayor experiencia.</p>
<p>Equipos y utensilios</p>	<p>Corto plazo: Reemplazar utensilios de madera por acero inoxidable.</p> <p>Mediano plazo: Implementar un programa de mantenimiento regular para todo el equipo.</p> <p>Largo plazo: Automatizar procesos para minimizar el contacto humano.</p>	<p>Corto plazo: Capacitación en mantenimiento y limpieza de equipos.</p> <p>Mediano plazo: Adquisición gradual de equipos modernos.</p> <p>Largo plazo: Transición completa a equipos de alta eficiencia y fácil limpieza.</p>	<p>Corto plazo: Realizar auditorías de los equipos actuales y reemplazar los más deteriorados.</p> <p>Mediano plazo: Compra de equipos básicos de acero inoxidable.</p> <p>Largo plazo: Establecer un plan de renovación de equipos cada 5 años.</p>

Es importante referir que estas propuestas están diseñadas para ser adaptativas y escalables dependiendo de las capacidades y recursos de cada tipo de quesería, asegurando así un camino sostenible hacia el cumplimiento total de la normativa NOM-251-SSA1-2009 y mejoras continuas en la calidad del producto y la eficiencia operativa.

Conclusiones

El presente estudio proporciona un análisis exhaustivo del cumplimiento normativo en la agroindustria quesera artesanal de Ixmiquilpan, Hidalgo. Se identificaron las diferencias significativas en las prácticas de higiene y seguridad alimentaria entre los clústeres formados por las queserías bajo estudio. A través del uso de metodologías estadísticas y un enfoque de clústeres, se ha demostrado que las variaciones en el cumplimiento de la normativa NOM-251-SSA1-2009 están intrínsecamente ligadas tanto a las características estructurales de las queserías como a sus estrategias de mercado.

El clúster Familia-Comercial Diversificado (FCD) mostró el más alto nivel de cumplimiento, sugiriendo que las operaciones de mayor escala, y con orientación a mercados más amplios y competitivos están mejor posicionadas para implementar prácticas de higiene efectivas. Este grupo alcanzó un cumplimiento promedio del 68.10%, destacando en áreas críticas como control de envasado y mantenimiento y limpieza, pero con áreas de mejora en transporte y capacitación.

Por otro lado, los clústeres Familiar-Comercial (FC) y Familiar-Tradicional (FT) enfrentan desafíos significativos para alcanzar niveles comparables de cumplimiento normativo, con porcentajes de 55.21% y 40.71%, respectivamente. Estos hallazgos reflejan la influencia limitante de los recursos financieros y técnicos, así como la necesidad de estrategias adaptadas que consideren el tamaño y las capacidades operativas de las queserías artesanales.

Este estudio subraya la necesidad de políticas diferenciadas que reconozcan la diversidad de la agroindustria quesera artesanal y fomenten la adopción de tecnologías y prácticas que mejoren tanto la calidad del producto como la eficiencia operativa. Además, se recomienda una colaboración más estrecha entre los productores, las autoridades reguladoras y las instituciones de investigación para facilitar la transferencia de conocimiento y la innovación en el sector.

Finalmente, mientras que las queserías artesanales en Ixmiquilpan tienen potencial para mejorar sustancialmente su cumplimiento normativo y competitividad en el mercado, es imperativo que se implementen enfoques de mejora que sean económicamente viables y escalares, asegurando así la sostenibilidad a largo plazo de esta importante agroindustria rural.

Bibliografía

- Bastías M. J. M., Cuadra H. M., Muñoz F. O. & Quevedo L. R. (2013). Correlación entre las buenas prácticas de manufactura y el cumplimiento de los criterios microbiológicos. *Revista Chilena de Nutrición*. 40(2), 161-168. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182013000200011>
- Bravo F. (2013) Manejo Higiénico de los alimentos acorde con la NOM-251-SSA1-2009. México DF, México: Limusa.
- Cervantes F. & Cesín A. (2019). Análisis de la producción lechera e importaciones de lácteos en México ante la renegociación del TLCAN. In: Cavalloti BA, Ramírez B, Cesín A (eds), *La ganadería ante escenarios complejos* (pp.13-27). Universidad Autónoma Chapingo.
- Cervantes, E. F., Islas, M. A. & Camacho, V. J. H. (2019). Innovando la quesería tradicional mexicana sin perder artesanidad y genuinidad. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 29(54), e19794 <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.794>
- Cervantes, F., Villegas, A. & Cesín, A. (2016). Caracterización de la cadena agroindustrial del queso adobera de los Altos de Jalisco, México. En *Red del Queso Artesanal, 1er Simposio de los quesos mexicanos genuinos*. Chapingo, México.
- Chombo, M. M. P. (2017). Producción y manejo inocuo de leche y productos de leche en México. Inocuidad y trazabilidad en los alimentos mexicanos. En O. Y. Lugo Melchor (Ed), *México: Lugo Melchor. Inocuidad y trazabilidad en los alimentos mexicanos* (pp. 84-105). CONACYT- CIATEJ https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5c9cee7713603.pdf
- Díaz, R. M., García, G. M., Jiménez, G. J., & Villanueva, C. A. (2016). Inocuidad en alimentos tradicionales: el queso de Poro de Balancán como un caso de estudio. *Estudios Sociales*, 25(47), 88-110. <https://www.ciad.mx/estudiosociales/index.php/es/article/view/310>
- Díaz, G. E. P., Valladares, C. B., Gutiérrez, C., Arriaga, J. C. M., Quintero, S.B., Cervantes, A. P. & Velázquez, O. V. (2017). Caracterización de queso fresco comercializado en mercados fijos y populares de Toluca, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(2), 139-146. <http://dx.doi.org/10.22319/rmcp.v8i2.4419>
- Espejel, G.A., Barrera, R.A., & Cuevas, R.V. (2016). Dinámica de la innovación ganancias económicas de la producción de leche en el Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Electrónica Nova Scientia* 17, 8(2). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pi

d=S2007-07052016000200391

- Espejel, G. A. (2018). Caracterización de la agroindustria artesanal y atributos de la valoración en consumidores de queso bola de Ocosingo, Chiapas. *Revista CIFE: Lecturas de Economía Social*, 20(33), 137-155. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6920530>
- Espejel G.A., Rodríguez, P.D.M., Barrera, R.A.I. & Ramírez, G. A. G. (2018). Factores estratégicos de la innovación y mercado en queserías artesanales de México. *Revista Venezolana de Gerencia*, 23(82), 424-441. <https://doi.org/10.37960/revista.v23i82.23758>
- Fraenkel, J. R., Wallen, N. E., & Hyun, H. H. (2012). *How to Design and Evaluate Research in Education*. (8th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Ghuri, S., Mazzarol, T., & Soutar, G. N. (2023). Networking benefits for SME members of cooperatives. *Journal of Cooperative Organization and Management*, 1(2). 100213. <https://doi.org/10.1016/j.jcom.2023.100213>
- González, C. A.F., Yescas, C., Ortiz, E. A.M., De la Rosa, A. M., Hernández, M. A. & Vallejo-Córdoba B. (2016). Invited review: Artisanal Mexican cheeses. *Journal of Dairy Science*, 99(5). 3250-3262. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10103>.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis*. (8th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación*. 7 ma. Edición. México.
- Hernández, S. R., Mendoza, T. C. P. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. 1ra. Ed. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A de C.V.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Encuesta mensual de la industria manufacturera 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/emim/2013/default.html#Tabulados>
- Krueger, R. A., & Casey, M. A. (2015). *Focus Groups: A Practical Guide for Applied Research*. (5th ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- OCDE-FAO. (2022). Estadísticas de la OCDE sobre agricultura [Base de datos]. <https://doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>
- Ovallos, D., & Puello, P. N. (2020). Cluster competitiveness modeling: an approach with systems dynamics. *Corporación Universidad de la Costa*. [https://doi.org/DOI: 10.3390/socsci9020012](https://doi.org/DOI:10.3390/socsci9020012)
- Parra, N. K. (2021). Modelo de simulación dinámica para el incremento de la competitividad del clúster lácteo del Atlántico. Corporación

- ción Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/8290>
- Sánchez, C.A. & Bautista, F. E. (2017). La producción quesera en el noreste de Chihuahua: el queso tradicional menonita. *Revistas electrónicas UACH*, 15. DOI: <http://dx.doi.org/10.20983/chihuahuahoy.2017.15.11>
- Sánchez, V.J.J., Colín, N.V., López, G.F., Avilés, N.F., Castelán, O.O., & Estrada, F. J.G., (2016). Diagnóstico de la calidad sanitaria en las queserías artesanales del municipio de Zacazonapan, Estado de México. *Salud Pública de México*, 58(4). 461–467. <https://doi.org/10.21149/spm.v58i4.8027>
- Secretaría de Salud. (10 de octubre de 2008). NOM-251-SSA1-2009. Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. Diario Oficial de la Federación. México, DF.
- Secretaría de Desarrollo Económico. (2014). Actualización del programa sectorial de desarrollo económico 2011-2016. Gobierno del estado de Hidalgo. http://transparencia.hidalgo.gob.mx/descargables/dependencias/sedecot/PLATAFORMA_2014/Para_Publicar/Actualizacion_PSDE%202011-2016.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2019). Hidalgo. Infografía Agroalimentaria 2019. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2019/Hidalgo-Infografia-Agroalimentaria-2019
- SIAP-Sader (2022). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader). <https://www.gob.mx/siap>
- Tapia, B., L., Aramendiz, T. H., Pacheco, Q. J., & Montalvo, P.A. (2015). Clusters arícolas un estado del arte para los estudios de competitividad en el campo. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(2),113-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.153202.19>.
- Trejo, T. E. & Trejo, T. N. (2020). Estrategias productivas y perfil de las microempresas queseras en Ixmiquilpan, Hidalgo. *Revista Científica Theorema* 15, 142-149. <https://utcjtheorema.com/>
- Villegas, A., Santos, A., & Cervantes, F. (2016). Los quesos mexicanos tradicionales. México: Universidad Autónoma Chapingo-CIES-TAAM.

Capítulo 11

Herbicida Paraquat: Movilización a la zona costera y parque nacional sistema arrecifal veracruzano por malas prácticas agrícolas

María del Refugio Castañeda Chávez, Gabycarmen NavarreteRodríguez, Fabiola Lango Reynoso & Isabel Amaro Espejo

Resumen

Los herbicidas son compuestos que por malas prácticas de uso y manejo en los cultivos agrícolas son movilizados en las cuencas desde su zona de aplicación hasta sitios remotos, esto hace que se encuentren disponibles para organismos no objetivo por lo que se afecta la calidad de los ecosistemas. La cuenca del río Jamapa provee de agua dulce en el área donde se distribuye su cauce, pero también contribuye al aporte de contaminantes químicos y biológicos que son dispersados en la zona costera hacia el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV). Esta investigación tuvo el objetivo de analizar la concentración del herbicida Paraquat en agua superficial de río Jamapa en la zona centro de golfo de México, para conocer el impacto de la movilización de este herbicida hacia la zona costera y en el PNSAV. Se detectaron las máximas concentraciones en el río Jamapa, en el sitio de muestreo S4 con $0.12 \mu\text{g L}^{-1}$ en la época de estiaje y $0.10 \mu\text{g L}^{-1}$ en la época de norte. Las concentraciones obtenidas en esta investigación fueron inferiores al límite permisible en agua superficial, lo que se puede relacionar con las actividades agrícolas que se desarrollan cerca del cauce del río, y ser indicativo de malas prácticas de uso y manejo agrícola. Las concentraciones del herbicida pueden representar un riesgo para las larvas de organismos acuáticos que habitan en la zona de estudio, además de continuar su transporte por movilización de corrientes a la zona costera y Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

Introducción

El uso intensivo de agroquímicos deriva de las actividades agrícola en el mundo, esta actividad es fuente de contaminantes liberados al medio ambiente (Hernández y Hansen, 2011). Sin embargo, la investigación científica generada sobre la presencia de agroquímicos como los plaguicidas utilizados específicamente en México se ha centrado principalmente en la determinación, y dispersión de residuos compuestos organoclorados como DDT y sus metabolitos en matrices ambientales (Rendón y Bejarano, 2010; Albert, 2014; Arellano-Aguilar *et al.*, 2017). Por lo tanto, esto implica que el número de investigaciones científicas es limitado con respecto a otros compuestos que pertenecen a los grupos químicos organofosforados, fungicidas y herbicidas.

Trabajos reportados sobre los compuestos organoclorados se asocian con persistencia, se sigue detectando la presencia de DDT recientemente (Waliszewski *et al.*, 2015; Ramírez-Elías *et al.*, 2016), existe un número reducido de investigaciones sobre otro tipo de compuestos en las diferentes regiones de México. Ocurre el mismo comportamiento sobre los trabajos realizados para determinar la presencia de herbicidas en aguas superficiales de México, son limitados y a nivel internacional pocos estudios incluyen un número amplio de compuestos como los herbicidas que en la actualidad son de uso común (García-Hernández *et al.*, 2018).

Entre los trabajos que comprendieron un amplio grupo de compuestos se encuentra el realizado por Leyva-Morales *et al.* (2016) detectaron en agua de ríos de Sinaloa la presencia de residuos de plaguicidas de diferentes grupos químicos, como los compuestos organoclorados y organofosforados: lindano, heptacloro, endosulfán, DDT, diazinón, clorpirifos, permetrina, paratión metílico, ciromazina, etión, carbofenotión, lambda cialotrina, pirimicarb, malatión y aldrin. Sin embargo, se destacan los vacíos de información para la región sureste de México con relación al uso, presencia en matrices ambientales y la movilización por malas prácticas de manejo de los herbicidas en las aguas superficiales a la zona costera (Gil-Díaz *et al.*, 2020).

El conocimiento del uso y manejo de los plaguicidas, particularmente los herbicidas permiten una mayor comprensión del problema y por lo tanto el planteamiento de estrategias para su solución. De acuerdo con FAOSTAT (2011) en México, los insecticidas y los herbicidas se emplean en mayor porcentaje, se destaca el glifosato como uno de los herbicidas de mayor consumo. Asimismo,

Viveros-Ruíz (2014) señaló entre los compuestos usados en México para el control de malezas los grupos químicos como: el derivado del ácido fenoxiacético, 2,4-d; el paraquat; los herbicidas triazínicos, simazina y atrazina, el organofosforado, glifosato, la fenilamida propanilo. Albert (2005) indicó para México, incremento en el uso de herbicidas como paraquat y glifosato, seguidos de los insecticidas organofosforados: paratión metílico, metamidofos, malatión y fungicidas (mancozeb y clorotalonil).

Los reportes históricos sobre el uso de los plaguicidas en México referidos a nivel nacional, García-Gutiérrez y Rodríguez-Meza (2012) señalaron que durante el 2000 al 2005 se reportó un incremento en el volumen de producción de plaguicidas del grupo de los herbicidas y defoliantes, así como de insecticidas utilizados en los campos de cultivo. Salazar-López y Aldana-Madrid (2011) indicaron según datos de la FAOSTAT-ONU durante el período comprendido del año 2004 al 2009, en México se consumieron un promedio de 12 2990 toneladas, equivalente al 16.1 % del uso mundial, y se alcanzó un máximo de consumo en el 2009 con 21.6 % del total mundial.

De acuerdo con Albert (2014), los datos disponibles sobre el uso específico de los diferentes grupos de plaguicidas son limitados a algunas regiones del país, no existen registros oficiales sobre el uso de herbicidas a nivel de predios agrícolas. La información reportada para el noroeste de México es la más detallada en el país, en contraste con la tendencia que predomina en el golfo de México sobre el número reducido de investigaciones, a pesar de los alto volúmenes de herbicidas reportados. Coincide con lo anterior, González-Arias (2010) indica que en el estado de Nayarit que los insecticidas fueron los compuestos más frecuentemente empleados con 45.9 %, seguidos por herbicidas con 30.5% y fungicidas (20.1 %). García-Hernández *et al.* (2018), indicaron que las investigaciones que reportan el uso de compuestos pertenecientes a diferentes grupos químicos son puntuales en algunas regiones de México.

El impacto de las actividades antropogénicas como la agricultura, por el uso y manejo de agroquímicos como los herbicidas, con el propósito de generar cultivos de importancia comercial, debe tener un enfoque de estudio que integre las dosis empleadas y su potencial impacto en el ambiente; que considere la existencia de reportes nacionales sobre el uso y manejo de buenas prácticas. El objetivo de esta investigación fue analizar la concentración de Paraquat en agua superficial de río Jamapa en la zona Centro de golfo de México, por su impacto al descargar su flujo en la zona costera y parque

nacional sistema arrecifal veracruzano (PNSAV), la movilización de este herbicida al medio ambiente acuático es un riesgo ya que es hábitat de especies pesqueras de importancia comercial, que son distribuidas para consumo nacional, actividad de la que dependen cooperativas de pescadores de la región.

Paraquat en agua y su presencia en zona costeras

El paraquat (1,1-dimetil-4,4-bipiridilo cloruro) es un herbicida no selectivo de amplio espectro de control aplicado a las malezas postemergente y que actúa por contacto (Bromilow, 2004). El Paraquat es el segundo herbicida más comercializado a nivel mundial, bajo el nombre Gramoxone® durante los últimos 60 años (PANANP, 2011; He *et al.* 2012; Gil-Díaz *et al.*, 2020). En México este herbicida se comercializa desde el año 1997, además del herbicida heterocíclico Diquat, del compuesto Faena® que contiene glifosato, de Daconil® con clorotalonil y Manzate® con mancozeb (Ramírez, 1999; Viveros-Ruíz, 2014). El paraquat se utiliza en el control de la maleza en la producción de café, cacao, coco, aceite de palma, caucho, banano, papaya, mango, maíz y caña de azúcar este compuesto es altamente tóxico representa un problema grave de contaminación en suelo y agua (Camacho-Morales *et al.*, 2017).

Sin embargo, la información disponible en México sobre el uso de Paraquat corresponde principalmente al noroeste del país. Silviera-Gramont *et al.* (2018) indicaron que predominó en distrito de riego (DDR) 144 Hermosillo Sonora, el uso de insecticidas, seguido por herbicidas 2,4-D, glifosato y paraquat. De este último, compuesto se reportó su aplicación en 42 584 ha, área que fue utilizada en cultivos como alfalfa, naranjo, nogal, sandía, sorgo, trigo y vid, esta superficie correspondió a 58.74% de área del DDR.

El paraquat, herbicida altamente persistente, se inactiva por completo al entrar en contacto con el suelo, el producto se almacena en esta matriz ambiental, y se ha demostrado que en condiciones de suelos turbosos anaerobios su tiempo de desintegración media (TD50) puede alcanzar hasta 7.2 años (Saha, 2004). De acuerdo con el INECC (2017) en los sistemas terrestres el paraquat es altamente persistente, tiene una vida media promedio estimada de 1000 días. Presenta una elevada afinidad por los suelos, al unirse rápida y fuertemente a las arcillas, humus y materiales orgánicos.

En el caso de la presencia de paraquat en agua, Watts (2011) indicó que, en ambientes acuáticos éste compuesto se adsorbe en partículas

y sedimentos donde tiene una vida media de entre 2 y 820 años, dependiendo de la luz solar y la profundidad del agua, lo que facilita su detección en aguas superficiales como subterráneas. Veríssimo *et al.* (2018) reportaron que niveles elevados de paraquat en el suelo pueden conducir a la contaminación de las aguas subterráneas, estos pueden tener efectos a largo plazo en el suministro de agua de la población rural. Por lo tanto, el comportamiento del paraquat en el ambiente acuático resalta su impacto en las aguas superficiales y en la zona costera como el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), este parque genera diversos servicios ecosistémicos, como la generación de recursos pequeños de importancia comercial. Cooperativas pesqueras de la zona centro de Veracruz tiene registrada en promedio 60 familias por cooperativa que dependen directamente de la captura de especies de escama, lo que implica un riesgo químico por la contaminación que proviene de herbicidas, fertilizantes, drenajes, residuos sólidos de zonas agrícolas y urbanas; además, de la sedimentación que deriva de la pérdida de ecosistemas cuenca arriba y que son dispersados por las corrientes hasta la zona arrecifal (CEMDA, 2015). Lo anterior se explica por ser la zona centro del golfo de México, donde se desarrollan actividades como la agricultura-ganadería, la extracción petrolera, industria y la descarga de efluentes domésticos, todas estas fuentes de contaminantes se incorporan a la zona costeras a través de las escorrentías y descargan desde ríos. El río Jamapa se encuentra en la porción final de esta cuenca, se localiza en la región centro del Estado de Veracruz, nace en el Pico de Orizaba y conecta con el PNSAV en el golfo de México, ambas zonas son catalogadas como áreas naturales protegidas, que brindan importantes servicios ecosistémicos (Castañeda-Chávez y Lango-Reynoso, 2021).

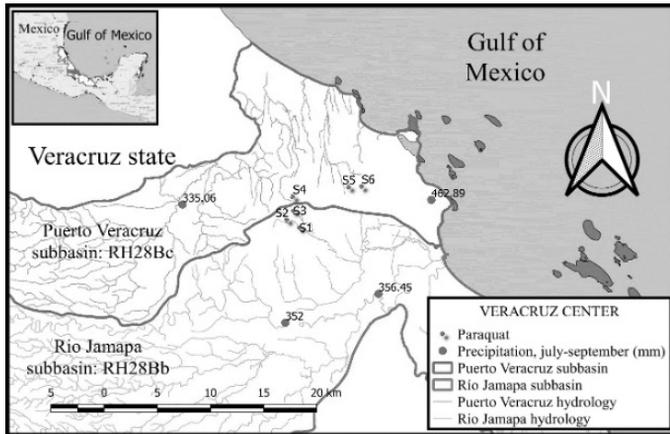
Materiales Y Métodos

Área de estudio

La cuenca del río Jamapa está dividida en tres grandes zonas de acuerdo a sus diferencias altitudinales, la mayor elevación registrada es de 5,670 msnm y la menor de 0 msnm, con una elevación promedio de 626 msnm (INECC-FGM, 2018). Se ubica en las coordenadas 18°45' y 19°14' latitud N, y entre 95°56' y 97°17' longitud O (CONAGUA, 2005). El cauce final de esta cuenca su desembocadura se localiza en el municipio de Boca del Río y al sureste del Puerto de

Veracruz (Landeros-Sánchez et al. 2011; Salas-Monreal et al., 2013) (Figura 1).

Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo (S) de paraquat en la cuenca del río Jamapa Veracruz, México.



La cuenca del río Jamapa posee un área aproximada de 3 912 Km² que se distribuye totalmente dentro de los estados de Veracruz y Puebla (Pereira-Díaz y Agustín-Pérez, 2010). Los municipios que lo componen son 31 del primer estado y 3 del segundo; además, dicha cuenca posee hasta 38 subcuencas (PAMIC, 2017). Lo anterior, explica la extensión y diversidad de ecosistemas en esta área. PAMIC (2017) indicó que esta cuenca tiene diez climas diferentes, se asocia con la influencia de la altitud del relieve que posee un rango de 5 670 m. La porción de la cuenca baja del Jamapa tiene como función principal la descarga de la cuenca, con una superficie de 1 355 Km² que corresponde al 34% de la superficie total de la cuenca; esta solo es superada por la porción media cuya función principal son la acumulación y transporte, ésta posee una superficie de 1 776 Km² que corresponde al 45% (INECC-FGM, 2018).

De acuerdo con INECC-FGM (2018) esta cuenca abastece de agua a ciudades importantes localizadas en sus inmediaciones como Veracruz, Boca del Río, Córdoba, Huatusco y Coscomatepec; así como, más de mil localidades rurales. No obstante, a la importancia de la cuenca, el 85.5% de su superficie corresponde a ambientes que han sido transformados o modificados de alguna forma (PAMIC, 2017). La amplia diversidad de usos del recurso agua en la cuenca genera que este sea impactado por la incorporación de contaminantes químicos de diversa naturaleza.

Descripción Metodológica

Los sitios de muestreo que se presentan en esta investigación se eligieron de acuerdo con la cercanía de zonas de alta actividad agrícola en la región, de la zona centro de Veracruz. La selección de estos sitios se realizó con base en la importancia que posee la cuenca bajo para la dispersión de fuentes difusas de contaminación de los principales cultivos realizados en la región como piña, sandía, papaya o arroz.

Las muestras de agua superficial consideraron una profundidad de 30cm aproximadamente debido a la influencia del transporte superficial de contaminantes, durante las temporadas climáticas de norte y estiaje. Se realizó la colecta de muestras en seis sitios, se utilizó un volumen de 1000ml empleando recipiente de polipropileno color ámbar y con una profundidad aproximada de 30cm de la superficie del agua. Las muestras se almacenaron en un refrigerador a una temperatura de $4\pm 5^{\circ}\text{C}$ en el Laboratorio de Investigación en Recursos Acuáticos (LIRA), del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Boca del Río para su posterior procesamiento.

El análisis de las muestras se realizó mediante un inmunoensayo enzimático de unión competitiva (ELISA) para la medición cuantitativa de paraquat con kit marca Abnova Corporation (Abnova©, Taipéi, Taiwán). Las muestras fueron sometidas a un tratamiento previo a su análisis de acuerdo con el protocolo establecido por el fabricante con la adición de una disolución reguladora y de diluyente de la muestra. Los valores de absorbancia y concentración fueron establecidos de acuerdo con lector de microplacas de 96 pocillos marca Abraxis modelo EUROFINS© 4303, en se creó un ensayo específico para el herbicida paraquat.

Actividades Productivas En La Cuenca Jamapa-Cotlaxtla

La cuenca del Jamapa es de las zonas más dinámicas del centro del golfo de México, por la diversidad de ecosistemas que influyen y se desarrollan en ella, como el cambio de uso de suelo al que se encuentra sometida. Asimismo, INECC-FGM (2018) reporta esta cuenca como un sistema complejo, que contiene diversos componentes, niveles jerárquicos y una alta intensidad de interconexiones. La cuenca del río Jamapa se encuentra sometida a presiones de distinta naturaleza que influyen en el aporte de contaminantes en la región.

El uso de suelo en la cuenca del río Jamapa, en su cobertura de vegetación natural, se incrementó un 0.7%, seguido del uso agrope-

cuario y urbano que aumentaron en 8 km², esto corresponde al 0.02% del total del territorio de la cuenca (INECC-FGM, 2018). De acuerdo con PAMIC (2017) la categoría de uso de suelo más extendida en esta cuenca corresponde al agrícola con 2 250 Km², que representa el 57% de la superficie total de la cuenca; seguida por el uso de suelo pecuario al que son destinados hasta 1 030 Km², y representa aproximadamente más de la cuarta parte de la superficie de la cuenca. Mientras, las zonas urbanas y asentamientos humanos poseen menor proporción con un porcentaje de cobertura general de la cuenca con 1.2% y los cuerpos de agua con 0.6% (INECC-FGM, 2018). De acuerdo a lo que mencionan Castañeda-Chávez y Lango-Reynoso (2021) la producción agrícola en la cuenca del río Jamapa constituye uno de los principales rubros de consumo del recurso agua y al mismo tiempo, incorpora contaminantes que se generan por el uso y manejo que se tiene de fertilizantes, insecticidas y herbicidas. INECC-FGM (2018) relacionan la agricultura de temporal con cultivos de caña de azúcar, maíz, café de sombra en transición hacia un cultivo de sol; así como, la ganadería vacuna extensiva y el desarrollo urbano como las actividades responsables que han transformado la cuenca y su calidad de agua.

Uso de Paraquat en aguas superficiales del Golfo de México

En esta investigación se destaca la falta de información científica acerca del uso y manejo de plaguicidas y herbicidas en la región costera del golfo de México, en específico en el centro del estado de Veracruz. Landini (2015) indicó que entre los problemas para el desarrollo y el trabajo de extensión agrícola se destaca el uso inadecuado del recurso suelo, y del uso indiscriminado de agroquímicos.

El plan de acción para el manejo integral de cuencas hídricas (PAMIC, 2017; INECC-FGM, 2018) reconoce, la importancia que tiene para la sociedad el tema de contaminación de ríos como el Jamapa y que este tipo de problema ejerce mayor presión en el manejo el recurso hídrico. Asimismo, en este informe se indicó que existe información sobre estudios de monitoreo de calidad del agua realizados por la Universidad Veracruzana en la zona de Córdoba, que influye en la cuenca del río Jamapa. Sin embargo, este tipo de información no fue incluida en estos reportes PAMIC (2017) y INECC-FGM (2018).

De acuerdo con Castañeda-Chávez y Lango-Reynoso (2020), la Cuenca Cotaxtla-Jamapa se encuentra influenciada por el aporte de contaminantes que son descargados en la zona arrecifal y costera del golfo de México

(Tabla 1). El PNSAV ubicado en las costas del estado de Veracruz es el sistema arrecifal de mayor tamaño de la región centro del golfo de México, este ecosistema alberga la mayor biodiversidad de especies arrecifales del oeste de esta región (Spalding *et al.*, 2001; Horta-Puga y Tello-Musi, 2009). Sin embargo, las actividades antropogénicas realizadas a lo largo de la cuenca del Jamapa como cultivos agrícolas diversos, ganadería, las actividades industriales, la descarga de aguas residuales sin tratamiento, entre otras; tienen un efecto sobre las especies de los arrecifes asociadas en este ecosistema (CEMDA, 2015).

Tabla 1. Contaminantes químicos analizados en la cuenca del río Jamapa y ecosistemas costeros en Veracruz, México

Área de estudio	Contaminante analizado	Referencia
Cuenca baja Jamapa	Presencia de metales pesados en seis sitios de muestreo analizados y épocas del año, el patrón de concentración fue Pb < Cd < Cu.	Castañeda-Chávez et al. (2020)
Cuenca baja Jamapa	La máxima concentración de paraquat en durante la época de lluvias y el thiametoxam presentó concentraciones superiores al límite permisible máximo FAO.	Castañeda-Chávez y Lango Reynoso (2021)
Laguna de Mandinga	17 plaguicidas organoclorados en tejido blando del ostión <i>Crassostrea virginica</i> , las máximas concentraciones sulfato endosulfán, con 39.35 y el alfa BHC con 2 166.53 ng g-1.	Aragón-López et al. (2020)
Laguna de Mandinga	El 100% de las muestras analizadas de tejido blando de <i>C. virginica</i> contenían isómeros α , β y el metabolito de sulfato de endosulfán, con la máxima concentración de 25.99 ± 5.79 ng g-1.	Navarrete Rodríguez et al. (2016)
Parque Nacional sistema Arrecifal Veracruzano	El patrón de concentración de metales pesados en sedimentos marinos fue: Zn 2.3606 > Cu 0.1392 > Cd 0.001 mg Kg-1.	Zamudio-Alemán et al. (2015)

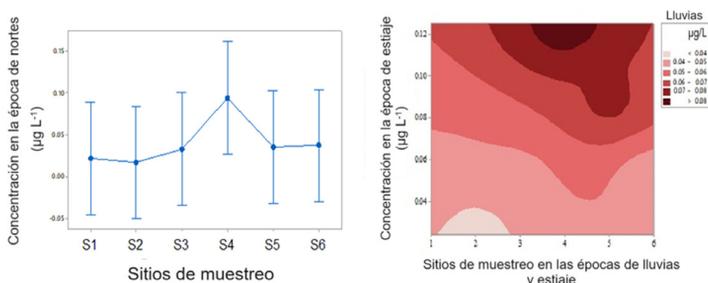
El PNSVA es uno de los ecosistemas más estudiados con relación a la biodiversidad de la flora y fauna (CEMDA, 2015), pero las investigaciones científicas sobre la presencia de plaguicidas en esta zona son nulas.

El sistema lagunar Mandinga, es el ecosistema adyacente al PNSV y a la cuenca baja del río Jamapa, en este sistema se reporta la presencia de plaguicidas organoclorados en el tejido blando del ostión *Crassostrea virginica* (Navarrete-Rodríguez, 2016; Aragón *et al.*, 2020). Ambas investigaciones destacaron la importancia que posee el flujo constante de plaguicidas de distintos grupos químicos y que al final son incorporados a la zona costera.

En la cuenca baja del río Jamapa el trabajo realizado por Castañeda-Chávez y Lango-Reynoso (2021) reportó la presencia de paraquat en muestras de agua durante la época de lluvias y destacaron concentraciones máximas en el sitio de muestreo llamado Las Gualdras.

La presente investigación reporta bajas concentraciones de paraquat en todos los sitios de muestreo inferiores a $<0.15 \mu\text{g L}^{-1}$; la mayor concentración se obtuvo en el sitio de muestreo S4 con $0.12 \mu\text{g L}^{-1}$ en la época de estiaje y $0.10 \mu\text{g L}^{-1}$ en la época de nortes (Figura 2). Se discute que las concentraciones de paraquat detectadas en la cuenca baja del río Jamapa son por fuentes difusas de contaminación derivadas de los cultivos establecidos en las inmediaciones del río Jamapa, como piña *Ananas comosus*, sandía *Citrullus lanatus*, papaya *Carica papaya* L. y arroz *Oryza sativa*. En la presente investigación se determinó que existe una correlación positiva entre las concentraciones de paraquat por épocas de muestreo.

Figura 2a (izquierda), 2b (derecha). Concentración de paraquat en agua superficial durante la época de nortes; concentración de paraquat en agua superficial durante las épocas de lluvias y estiaje (derecha) en la cuenca del río Jamapa Veracruz, México.



Existe el riesgo de incrementar la bioacumulación de paraquat en los organismos acuáticos de la zona, por su presencia en agua superficial, y además puede impactar el agua subterránea. Al herbicida paraquat se debe añadir la presencia de otros insecticidas en el área de estudio. Castañeda-Chávez y Lango-Reynoso (2021), reportaron concentraciones máximas de thiametoxan en el río Cotaxtla que atraviesa los municipios de Cotaxtla y Medellín de Bravo ambos con alta actividad agrícola en el centro de Veracruz, este río es el principal afluente del río Jamapa.

El uso extensivo de este herbicida ha generado la resistencia de plantas expuestas al compuesto, esto implica la reducción de efectividad por los mecanismos bioquímicos de resistencia de las plantas (Nukui *et al.*, 2013). El uso de paraquat en México debe ser limitado, dada la restricción en su uso en diversas regiones del mundo, de acuerdo con PANAP (2011) en la Unión Europea su uso ha sido prohibido desde 2007 y en los Estados Unidos su utilización está restringido solo para agricultores con licencia de aplicación de este compuesto. El uso de paraquat en México y la transferencia de tecnología tienen un papel central en el uso racional de este compuesto, así como su efecto en la salud ambiental.

En México, existe un número limitado de investigaciones que expliquen el origen y la interacción con los plaguicidas aplicados. La presencia de herbicidas en la cuenca del río Jamapa refleja la incorporación constante de contaminante que pueden tener un efecto sinérgico en la salud pública y los organismos acuáticos. Por lo tanto, se requiere realizar el monitoreo que abarque el análisis de estos contaminantes químicos como parte de las investigaciones realizada en esta región

Efectos toxicológicos en humanos

La presencia de contaminantes como herbicidas en los ecosistemas acuáticos genera que estos se encuentren disponibles para organismos de consumo humano y a la par generen efectos adversos en la salud pública y los usuarios del recurso agua. Esto conlleva la generación de un riesgo potencial a la salud pública y la biota por exposición a los herbicidas como paraquat, cuya exposición ha documentado una amplia variedad de efectos adversos.

Diversas investigaciones señalan que éste es nocivo para todos los seres vivos (PANAP, 2011). Se ha reportado que en humanos este herbicida se absorbe por contacto y ocasiona lesiones en los tejidos

expuestos, como resequedad y fisuras. Mientras, en el caso de una exposición prolongada, éste puede causar ampollas y ulceraciones en la piel. Además, al ingresar al organismo por vía digestiva e inhalación originar congestión, edema en los pulmones y en ocasiones hasta la muerte (Saha 2004).

De acuerdo con He *et al.* (2012) y ANVISA (2015) por su extensivo uso de este compuesto puede contribuir a la toxicidad aguda pulmonar y cutánea, puede ocurrir su acumulación selectivamente en los pulmones generando en estos daño oxidativo y fibrosis, lo que lleva a la muerte de las personas expuestas. Otras investigaciones como la realizada por Vaccari *et al.* (2017) señalaron una asociación entre la exposición a paraquat y la enfermedad de Parkinson, indicaron además que las agencias reguladoras deben definir los niveles de riesgo de exposición a paraquat. Sin embargo, también señalaron que se requiere investigación que apoye el proceso de evaluación de riesgos. Asimismo, Tanner *et al.* (2011) indicaron que la exposición crónica a este herbicida puede asociarse con lesiones hepáticas, insuficiencia renal y enfermedad de Parkinson.

Otra investigación realizada por He *et al.* (2012) demostró que la toxicidad del paraquat en células epiteliales bronquiales humanas (BEAS-2B) se relaciona con la dosis, así como, la presencia de daños mitocondriales, la generación de estrés oxidativo y la muerte de células de pulmón expuestas. Las investigaciones antes mencionadas resaltan la importancia del efecto toxicológico del paraquat en México se requiere generar investigación sobre la exposición crónica y subcrónica a este compuesto.

Efectos toxicológicos en la biota acuática

La presencia de herbicidas en aguas superficiales ha tenido relevancia en su análisis, dado la capacidad de transporte y detección en corrientes superficiales como los ríos, esta última relacionando con el uso intensivo de compuestos como paraquat. En contraste, se ha reportado que en los sistemas acuáticos el paraquat se movilizó rápidamente en la columna de agua, ya que puede ser adsorbido por los sólidos suspendidos, los sedimentos y las plantas acuáticas. Se indica que su persistencia en los cuerpos de agua puede ser mayor que en la tierra por la menor disponibilidad de oxígeno (INECC, 2017). La presencia de paraquat en el medio ambiente tiene efectos adversos en distintas matrices ambientales, Bortolí *et al.* (2012) indicaron que este herbicida puede alterar la estructura y el funcionamiento del suelo median-

te efectos directos sobre varios componentes de su microbiota. Por lo tanto, el paraquat afecta la calidad del suelo al ser aplicado, pero también genera impactos al moverse por escorrentías hacia los ecosistemas acuáticos adyacentes.

En el caso de la biota acuática los efectos toxicológicos causados por el paraquat son variables; Martínez-Tabche et al. (2004) indicaron que la exposición a concentraciones de 0, 5, 75 y 150 mg L⁻¹ de los herbicidas 2,4-D y paraquat provocaron en *Oncorhynchus mykiss*, indicaron una mayor toxicidad de paraquat en el tratamiento de 24 horas y altos índices de mortalidad con un valor de CL50 de 0.084 mg L⁻¹ para este herbicida. Señalaron además que las concentraciones máximas de ambos herbicidas provocaron apnea y manchas blancas en las escamas en los organismos expuestos. El efecto toxicológico del paraquat ha sido ampliamente documentado, Bus et al. (1974) y Tomita et al. (2001) señalaron que la acción genotóxica del paraquat puede estar asociada con la transferencia de un solo electrón de oxígeno reducido a paraquat, formando niveles elevados iones superóxido que causa estrés oxidativo en diferentes especies de peces.

La peroxidación lipídica generada por exposición a paraquat también ha demostrado ser responsable del origen de varias aberraciones cromosómicas. Bauer y Dial (1995) señalaron también que el estrés oxidativo inducido por este herbicida puede estar relacionado con la acción teratogénica de este compuesto en embriones y renacuajos de los anuros. Mientras, Tortorelli et al. (1990) indicaron que este compuesto es capaz de modificar la actividad de varias enzimas en peces, puede afectar la contracción cardíaca y la ventilación ocular, dichos efectos que pueden alterar el desarrollo inicial de estos organismos. Por lo tanto, el efecto toxicológico generado por la exposición a paraquat ha sido demostrado en diversos organismos acuáticos y sus efectos son en diversos sistemas biológicos.

Límites permisibles de paraquat en agua

Los múltiples efectos toxicológicos del paraquat en la salud humana y la biota causó su prohibición en diversos países y algunos otros han establecido medidas para limitar su uso (ANVISA, 2015). Se han establecidos diversos límites permisibles internacionales para protección de la salud pública y el medio ambiente; coincidiendo con lo anterior la FAO (2022) estableció un valor de referencia de paraquat en aguas superficiales de 13 µg L⁻¹. El límite máximo residual (LMR) de 0.1 mg L⁻¹ en aguas superficiales en Colombia, de acuerdo con la

Resolución del Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007).

En el caso de la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (EPA, 2014) muestra los niveles máximos de uso para contaminantes permitidos en aguas potables (MLC) según National Primary Drinking Water Regulations (EPA, 2022) dentro de los cuales no se encuentra incluido el paraquat. De acuerdo con CDC (2013) en Estados Unidos, el paraquat es un herbicida de uso del restrictivo. En contraste, en dicho listado de EPA (2022) se encuentra incluido el diquat, este compuesto pertenece al mismo grupo químico tiene como Maximum Contaminant Level Goal (MCLG) y valor permitido en agua superficial de 0.02 mg L⁻¹; y sus efectos potenciales sobre la salud de la exposición a largo plazo provocan cataratas (EPA, 2022b).

En el caso de México la legislación sobre presencia de plaguicidas en aguas nacionales y de consumo humano como la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 (Diario Oficial, 2021) en sus lineamientos no incluye la presencia de ningún tipo de herbicida. Alza-Camacho *et al.* (2016) señalaron que la presencia de paraquat en aguas superficiales indica que las fuentes hídricas cercanas a los cultivos pueden estar causando serios inconvenientes a la salud humana y a los animales terrestres y acuáticos que consumen este recurso. Por lo tanto, de acuerdo con Alza-Camacho *et al.*, (2016) el monitoreo de residuos de herbicidas en aguas, tiene crucial importancia para determinar el grado de exposición de una población y prevenir las posibles consecuencias toxicológicas a largo plazo.

Conclusiones

En esta investigación se identificó el vacío de información sobre la presencia de herbicidas en la cuenca del río Jamapa, se puntualizó de múltiples presiones antropogénicas de distinta naturaleza e intensidad. Las distintas fuentes de contaminación puntuales y difusas que impactan en la calidad de agua de la cuenca y los ecosistemas aledaños como las lagunas costeras y el sistema arrecifal veracruzano (PNSAV), el cual es un ecosistema de alta prioridad dada su complejidad y la fragilidad del equilibrio requerido para el desarrollo de las funciones de este ecosistema.

El uso de los herbicidas es un tema que no ha sido abordado adecuadamente en México, a pesar de la importancia de la actividad agrícola para el país y los volúmenes reportados del uso de estos compuestos

en las escasas investigaciones que abordan esta temática. Esto contrasta con los documentos extensos de los efectos nocivos a la salud pública y el medio ambiente generado por el uso extensivo a los distintos tipos de herbicidas que son utilizados sin control en su uso y manejo por los agricultores en diferentes cultivos.

En el caso del paraquat en la cuenca del río Jamapa su presencia fue evidenciada solo en una investigación previa, no obstante, su detección es un indicador sobre sus potenciales efectos toxicológico al medio ambiente y el riesgo por exposición que debe considerarse durante las prácticas de uso y manejo en los cultivos agrícolas.

Se identificó también que se requiere continuar con el monitoreo de contaminantes por herbicidas con la finalidad de preservar la salud pública, la inocuidad de los recursos pesqueros, actualmente se suman a los llamados contaminantes emergentes, como los antibióticos, hormonas, microplásticos, entre los principales. Estos son descargados directamente de esta cuenca al Golfo de México, lo que implica efectos en los recursos pesqueros de consumo nacional. Su efecto potencial en el mediano y largo plazo pueden causar la muerte de corales y la fauna asociada en esta zona prioritaria del golfo de México.

Bibliografía

- Alfaro-Gómez, et al., 2014. Diagnóstico de la problemática ambiental en estero del Río Jamapa dentro de los municipios de Boca del Río, Alvarado y Medellín, Veracruz, México. Informe Técnico, Manejo Integrado de Zonas Costeras, Maestría en Ecología y Pesquerías, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad Veracruzana, México. 23p.
- Aragón-López RP., MR. Castañeda-Chávez., A. Granados-Barda y D. Salas-Monreal. 2020. Contaminación por plaguicidas organoclorados en el *Crassostrea virginica* en Mandinga, México. Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras, 37(1): 21-25.
- Castañeda-Chávez M.R., G. Navarrete-Rodríguez., F. Lango-Reynoso., I. Galaviz-Villa., C. Landeros-Sánchez. 2014. Heavy Metals in Oysters, Shrimps and Crabs from Lagoon Systems in the Southern Gulf of México. Journal of Agricultural Science. 6(3): 108-117.
- CEMDA (Centro Mexicano de Derecho Ambiental). 2015. El sistema arrecifal veracruzano. reporte de un área natural protegida amenazada. <https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/>

PNSAV.Final_.pdf.

CONAGUA, (2005), Mapa Hidrológico, escala 1:1 000 000. Sistema de Información Geográfica del Agua, Subgerencia de Programación de la Gerencia Regional Golfo Centro de la Comisión Nacional del Agua.

EPA. 2022. National Primary Drinking Water Regulations. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations> (Accessed 12 January 2022).

EPA. 2022a. Paraquat y Diquat. Capítulo 12. 122-131 pp. <https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/spch12.pdf>.

FAO, 2022 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Roma y Ginebra.

INECC-FGM. 2018. Plan de Acción para el Manejo Integral de Cuencas Hídricas (PAMIC): Cuenca del río Jamapa. Proyecto: Conservación de Cuencas Costeras en el Contexto del Cambio Climático. 151pp.

Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. R., Landeros-Sánchez, C., Galavíz-Villa, I., Navarrete-Rodríguez, G., y Soto-Estrada, A. (2013). Cd, Cu, Hg and Pb, and organochlorine pesticides in commercially important benthic organisms from coastal lagoons along the SW Gulf of Mexico. *Agricultural Science*, 1, 63-80. <http://dx.doi.org/10.12735/as.v1i1p63>.

Maldonado-González, A. L., González-Gaudio, E. J., & Cruz-Sánchez, G. E. (2017). Una aproximación a la representación del cambio climático en habitantes de dos cuencas del estado de Veracruz, México. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*, 12(23), 149-174.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

PAMIC (2017) Plan de acción de manejo integral (PAMIC) Cuenca Jamapa. Cuencas Costeras. SEMARNAT. 1 ed. 113 pp. [online]. Available from <http://www.c6.org.mx/wpcontent/uploads/2017/06/JAM-PAMIC-web9Jun17baja.pdf>. Accessed 26 October 2018.

PANAP. 2011. Neumeister, L. e Isenring, R. 2011. Paraquat: Riesgos inaceptables para los usuarios. 3ra Edición. Declaración de Berna, Red de Acción en Plaguicidas UK (PAN UK), PAN Asia y Pacífico (PANAP).

REPDA (2014) Registro Público de Derechos de Agua. Cuenca Jamapa. <https://www.gob.mx/cntserfts/tramite/ficha/5697d3a68217e6d7ea0036a5>. Accessed 19 November 2017.

- PRONACOSE (2017). Consejo de Cuenca Ríos Tuxpan al Jamapa. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. <http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/R%-C3%ADos%20Tuxpan%20al%20Jamapa.pdf>.
- Riesgos inaceptables para la salud de los usuarios Paraquat. 3ra Edición. https://www.pestizidexperte.de/Publikationen/Neumeister_EvB_11_Paraquat_UnacceptableHealthRisk_Spanisch.pdf.
- Rubio-Arias H., C. Quintana., J. Jiménez-Castro., R. Quintana., M. Gu-tierrez. 2010. Contamination of the Conchos River in Mexico: Does It Pose a Health Risk to Local Residents? *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2010, 7, 2071-2084. DOI:10.3390/ijerph705207.
- Salas-Monreal D., Marin-Hernandez M, Salas-Pérez JJ, Salas-de León DA, Monreal-Gomez MA, Perez-España H (2017) Coral reef connectivity within the Western Gulf of Mexico. *J Mar Syst* 179: 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.12.001>.
- Zamudio-Alemán, R.E, M. del R. Castañeda-Chavez, F. Lango-Reynoso, I. Galaviz-Villa, I.A. Amaro-Espejo, L. Romero-González. 2015. Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(4): 159-168.

Capítulo 12

Diagnóstico de buenas prácticas agrícolas y campaña de recuperación de envases vacíos de agroquímicos en el municipio de Cotaxtla, Veracruz

Itzel Galaviz Villa, Antonio Villegas Vilchis, Isabel Araceli Amaro Espejo, Arturo García Saldaña, Ana Yesica Toga Islava & Erika Michell Cazarín Luna

Resumen

Los agroquímicos son considerados esenciales en la producción agrícola para garantizar la seguridad alimentaria de nuestro país. El desecho inadecuado de envases de agroquímicos en la agricultura es un problema grave que afecta tanto al medio ambiente como a la salud humana. Los agroquímicos empleados en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*) en algunos casos son utilizados de manera excesiva, provocando daños irreversibles al medio ambiente y a la salud humana. Se estima solo el 1% de los plaguicidas son aprovechados por la planta para el control de la plaga, y el resto se dispersa en el medio ambiente. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar el nivel de conocimiento de los productores sobre la aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), y el manejo de residuos peligrosos o envases vacíos de agroquímicos en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*), y promover una campaña de recolección de envases sucios para

reducir los riesgos de contaminación del agroecosistema y de salud humana en el municipio de Cotaxtla, Veracruz. Se aplicó una encuesta semiestructurada validada por expertos. Se incluyeron 30 ítems con preguntas abiertas, semiestructuradas y estructuradas, estas últimas con escala tipo Likert. La validación se realizó con el programa estadístico SPSS (IBM SPSS Statistics versión 25, 2015), el nivel de confiabilidad de la encuesta se determinó a través del coeficiente alfa de Cronbach con un grado de correlación interna entre ítems de 0.93. Se identificó que durante el cultivo de papaya se aplican de nueve a doce veces 26 diferentes productos agroquímicos para la fertilización, control de arvenses, plagas y enfermedades. Esto genera una gran cantidad de envases vacíos de agroquímicos, que generalmente fueron desechados *in situ* a la orilla de la parcela, de los ríos, o en las viviendas de los productores; por desconocimiento de los riesgos potenciales de estos a la salud humana y al ecosistema. El glifosato es uno de los plaguicidas que actualmente se emplea para el control de arvenses en el municipio de Cotaxtla, Ver., el cual por sus propiedades cancerígenas ha sido clasificado como peligroso para la salud de los seres vivos y del ecosistema. En colaboración con la asociación civil AMOCALI A.C. Campo Limpio, se llevó a cabo en este municipio, la primera campaña de recuperación de envases vacíos de agroquímicos (sin triple lavado), en la cual se acopiaron para su disposición final 2.98 ton aproximadamente, las cuales fueron recolectadas de las parcelas, orillas del río, y/o en las inmediaciones de las viviendas de los productores.

Introducción

El municipio de Cotaxtla aporta el 50% de la producción nacional de papaya (*Carica papaya L.*), esto es 49 mil toneladas al año. Es uno de los frutos tropicales con mayor demanda nacional e internacional. En 2012, México reportó una superficie sembrada de 16, 254 ha, de la cual el 26.3% se ubica en el estado Veracruz; y el 16.37% en el municipio de Cotaxtla (SAGARPA, 2013). Los agroquímicos juegan un papel importante en los cultivos; estos se definen como cualquier sustancia, o mezcla de sustancias, con ingredientes químicos destinadas a prevenir, destruir, atraer, repeler, combatir o controlar cualquier plaga en la producción de alimentos (FAO, 2013). Estos, son considerados esenciales en la producción agrícola para garantizar la seguridad alimentaria de nuestro país (Patarasiriwong et al., 2013). Los agroquímicos empleados en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*) en algunos casos son utilizados de manera excesiva, provocando daños irreversibles al

medio ambiente y a la salud humana. De acuerdo con Torres y Capote (2004), se estima que el 1% de los plaguicidas son aprovechados por la planta para el control de la plaga, y el resto se dispersa en el medio ambiente.

Los productores de papaya del municipio de Cotaxtla emplean plaguicidas que no están autorizados en el manejo fitosanitario del cultivo, tales como; Paratión, Methamidophos y Oxamilo. Además, desconocen las prácticas de manejo adecuadas que les permitan mejorar sus procesos de producción hacia un enfoque sustentable (Megchun *et al.*, 2016).

De acuerdo con la FAO/WHO (2008), a menos que los envases de plaguicidas sean manejados correctamente, son considerados “peligrosos” para los seres humanos y para el medio ambiente. Esto, debido al riesgo de envenenamiento por plaguicidas a causa de su reutilización en el almacenamiento de agua y/o alimentos; y al abandono de envases vacíos en el medioambiente que genera contaminación por plaguicidas en el suelo y aguas subterráneas. Los envases vacíos de agroquímicos provenientes de la producción agrícola son considerados residuos peligrosos, de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2003). Estos envases, sin la adecuada gestión son considerados tóxicos y representan un riesgo al ser utilizados para almacenar agua o alimentos, lo cual tras una exposición masiva en cortos periodos de tiempo puede generar intoxicaciones de agudas a graves (Landini, Beramendi y Vargas, 2019). Por otro lado, los envases que son abandonados en el medioambiente generan contaminación del suelo y de las fuentes de agua superficial y subterránea, debido a su toxicidad, estabilidad, persistencia y bioacumulación. Por lo anterior, de acuerdo con la ley oficial vigente los envases vacíos de agroquímicos están sujetos a un plan integral de gestión con el propósito de disminuir esta problemática (Martens, 2016; LGPGIR, 2003).

La deficiencia en la aplicación de una correcta gestión integral de los envases vacíos de agroquímicos está relacionada con la falta de capacitación al sector agrícola, y de seguimiento por parte de las autoridades. En México, diversas dependencias están a cargo de regular la producción, distribución y uso de plaguicidas; la Secretaría de Salud regula los aspectos sanitarios a través de la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS); la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) se encarga de vigilar los daños al medio ambiente originados por el uso de estos agroquímicos; la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), a través del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) regula el uso y manejo de los plaguicidas

y los límites de residuos en campo, además de promover las buenas prácticas agrícolas (SADER, 2019). Sin embargo, es común que, debido a la falta de presupuesto y personal en estas dependencias, estas tareas no se llevan a cabo.

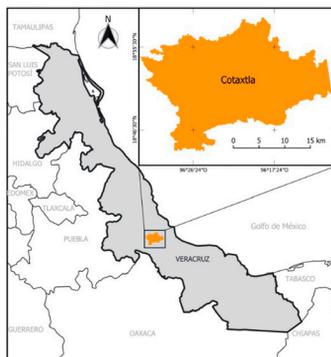
Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar el nivel de conocimiento de los productores sobre la aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), y el manejo de residuos peligrosos o envases vacíos de agroquímicos en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*); para llevar a cabo una campaña de recolección de envases vacíos (sin triple lavado) y reducir los riesgos de contaminación del agroecosistema y de salud humana en el municipio de Cotaxtla, Veracruz.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio correspondió al municipio de Cotaxtla, localizado en la Región Sotavento del estado de Veracruz, México, en las coordenadas geográficas 18° 44'-18° 59' latitud norte y 96° 11'- 96° 32' longitud oeste (Figura 1), a una altitud de 10 a 200 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con una superficie de 537.81 Km², que corresponde al 0.91% del Estado de Veracruz. La región se destaca por la orientación del uso de suelo a actividades del sector primario; más del 91.5% de su territorio se destina a actividades agropecuarias con un 100% de población rural. La encuesta se aplicó a 24 productores de papaya de 12 localidades del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

Figura 1. Macrolocalización del municipio de Cotaxtla, Ver.



Encuesta

Se diseñó una encuesta semiestructurada para la recolección de información del manejo agronómico del cultivo de papaya (*Carica papaya* L.), aplicación de buenas prácticas agrícolas (BPA) y manejo de los envases vacíos de agroquímicos o residuos peligrosos; la cual se aplicó a productores de papaya de diferentes localidades del municipio de Cotaxtla Veracruz, en diciembre de 2022. El objetivo de la encuesta fue identificar el conocimiento y nivel de aplicación de las buenas prácticas agrícolas y la disposición adecuada de los envases vacíos de agroquímicos. Se incluyeron 30 ítems con preguntas abiertas, semiestructuradas y estructuradas, estas últimas con escala tipo Likert. Se evaluaron variables a un nivel de medición ordinal acorde al conocimiento y aplicación de BPA, uso y manejo de agroquímicos para el control de plagas, enfermedades y arvenses; variedades, semillas, duración y rotación del cultivo, tiempo de cosecha del monocultivo, tipo de riego, y manejo y disposición de los envases vacíos de agroquímicos.

Validez de la encuesta

La encuesta fue validada por tres expertos, reconocidos en el ámbito de la investigación, con conocimientos sobre el cultivo de papaya y BPA. La validación se realizó a través de la evaluación de cada ítem, considerando la coherencia, claridad, escala y relevancia de cada uno de estos. Además, mediante una matriz de consistencia se evaluó la validez y concordancia a través el Coeficiente de Validez de Contenido (CVC); en la valoración de cada ítem fueron seleccionados aquellos con un CVC de 0.90 (Hernández, 2002).

Confiabilidad de la encuesta

Se empleó el programa SPSS (IBM SPSS Statistics versión 25, 2015); para determinar el nivel de confiabilidad de la encuesta, a través del coeficiente alfa de Cronbach, para determinar el grado de correlación interna entre ítems (Cronbach, 1951), obteniendo un resultado de 0.93.

Una vez validado y establecido el nivel de confianza de la encuesta, se aplicó a los productores.

Análisis de datos

Los datos obtenidos de la encuesta se analizaron con el software SPSS (IBM-SPSS 25.0), utilizado para el análisis estadístico y de datos.

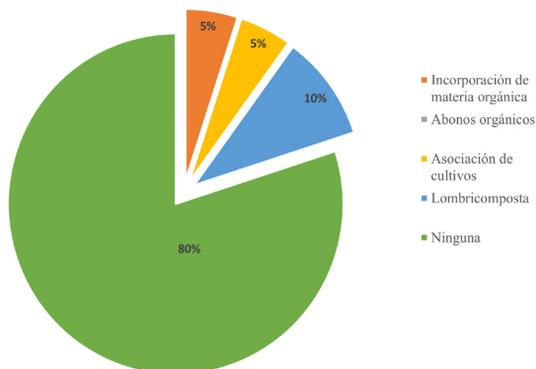
Resultados y discusión

Diagnóstico de aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas

De acuerdo con los resultados obtenidos el 50 % de los productores cuentan con más de 20 años de experiencia en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*), destinando de 2 a 3 hectáreas por productor. El 60 % de los productores continúa trabajando este cultivo, y el resto, lo ha cambiado por el cultivo de limón persa; debido al alto costo de los productos agroquímicos, fertilizantes y semillas. El 100 % de los productores utiliza agua de pozo para el riego, y no reportan análisis de agua o suelo previos a la siembra. Los principales problemas identificados que afectan la producción de papaya (*Carica papaya L.*) en el municipio de Cotaxtla, Ver., son: la falta de conocimiento y aplicación de buenas prácticas agrícolas y la disposición inadecuada de los envases vacíos de agroquímicos o residuos peligrosos.

El 80 % de los productores no conoce las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), el resto utiliza abonos orgánicos, la asociación de cultivos y lombricomposta (Figura 2).

Figura 2. Aplicación de las Buenas Prácticas Agrícolas en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*) en el municipio de Cotaxtla, Veracruz.



Esto coincide con lo reportado por Caamal (2022), quien menciona que el 100% de los productores de piña en una comunidad del estado de Quintana Roo, desconoce las buenas prácticas agrícolas y sus implicaciones. Reasco y Castillo (2019), mencionan que las BPA son normas y recomendaciones técnicas aplicadas a los métodos de producción, procesamiento y transporte de alimentos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente, estas permiten proveer a los consumidores alimentos sanos, saludables y evitar enfermedades transmitidas por alimentos (ETA).

Es importante mencionar que, actualmente, las BPA han adquirido importancia debido a las múltiples exigencias del mercado internacional por obtener productos con altos estándares de calidad e inocuidad para el consumidor (Castro, 2021). Además, son un factor competitivo en la calidad de los productos lo que implica mejorar sus precios, accesos y consolidación en los mercados. Sin embargo, la producción del municipio de Cotaxtla es nacional, por lo cual no se exige el cumplimiento de los estándares de calidad.

Se registró el uso de paraquat y glifosato para el control de arvenses, ambos considerados peligrosos y altamente tóxicos (Tabla 1); este último ha sido clasificado como peligroso de acuerdo con su concentración, esto es; a mayor concentración mayor peligro para la salud de los seres vivos y del ecosistema (COFEPRIS, 2020).

Tabla 1. Agroquímicos empleados en la fertilización, control de plagas, enfermedades y arvenses en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*), en el municipio de Cotaxtla Veracruz.

Fertilizantes	Plaguicidas			
	Control de plagas y enfermedades		Control de arvenses	
	Nombre comercial	Ingrediente activo	Nombre comercial	Ingrediente activo
Fosfato Di Amónico (DAP)	Confidor	Imidacloprid	Faena	Glifosato
				Sal isopropilamina de N-(Fosfono metil) glycina.
Coplex	Sportak	Procloraz	Diabloquat	Dicloruro de paraquat
Ultra Sop Potasio (K)	Amistar	Azoxistrobin	Tarang	Glufosinato de amonio
Urea	Muralla Max	Imidacloprid y betacyfluthrin	Finale Ultra	Glufosinato de amonio
Sulfato	Abamectina	Abamectina	Glufin	Glufosinato de amonio
Gro Green	Manzate	Mancozeb		
Nitrabor	Nealta	Ciflumetofen		
Supermagro	Kasumin	Kasugamicina		
Nitrofoska	Redomil Gold	Metalaxil		
Triple 17	Imidacloprid	Imidacloprid		
	Tamaron	Clorpirifos		
	Dimetoato	Dimetoato		
	Cipertoato 300 CE	Dimetoato y cipermetrina		
	Foley Rey	Clorpirifos etil y permetrina		
	Progranic Gamma	Extracto de ajo (<i>Allium sativum</i>), chile picante (<i>Capsicum frutescens</i>) y canela (<i>Cinnamomum zeylanicum</i>)		

Es importante señalar que el uso y distribución del glifosato ha sido prohibido en México, luego de que el Gobierno así lo promulgara en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2023). Los productores aplican agroquímicos con el objetivo de proteger el cultivo de plagas y enfermedades, sin considerar la toxicidad del producto y sus efectos en el medio ambiente; lo cual repercute en la calidad del aire, agua y suelo del agroecosistema (Castillo *et al.*, 2020).

Se observó una disposición inadecuada de los envases vacíos de agroquímicos, los cuales son desechados *in situ* en los límites de la parcela; lo que de acuerdo con Sánchez (2021), afecta principalmente al suelo, seguido por la salud humana. Uribe *et al.* (2012), recomiendan capacitar tanto a los trabajadores como a sus familias sobre los posibles efectos que puede desencadenar la exposición a plaguicidas y sobre las prácticas de manejo seguro de estas sustancias. La deficiencia en la aplicación de una correcta gestión integral de los envases vacíos de agroquímicos está relacionada con la falta de capacitación al sector agrícola, y de seguimiento por parte de las autoridades; esto sucede aun cuando la contaminación por agroquímicos se ha convertido en una preocupación ambiental global (Cajamarca *et al.*, 2020).

Campaña de recuperación de envases vacíos de agroquímicos

Existen asociaciones civiles sin fines de lucro comprometidas con garantizar la correcta disposición de los envases vacíos de agroquímicos, como Amocali Campo Limpio A.C., que operan bajo un Plan de Manejo registrado ante SEMARNAT y siguen los lineamientos del Código de Conducta de la FAO. Además, cuentan con centros de acopio temporales, que son instalaciones industriales destinadas a la separación, acondicionamiento y reducción del volumen de los envases vacíos, involucrando a diversos sectores de la sociedad para lograr altas tasas de recolección.

En colaboración con AMOCALI A.C., se llevó a cabo la primer campaña de recuperación de envases vacíos de agroquímicos (sin triple lavado) en el municipio de Cotaxtla, Ver. A la cual asistieron 239 productores de 52 localidades (Tabla 2), beneficiando 1782 Ha del municipio de Cotaxtla; y en las cuales se recuperaron 2.98 ton de empaques y envases vacíos para su correcta disposición final. Los cuales se encontraban en las parcelas, a la orilla del río y en las inmediaciones de las viviendas de los productores.

Tabla 2. Localidades del municipio de Cotaxtla, Ver., beneficiadas en la primer campaña de recuperación de envases de vacíos de agroquímicos.

No.	Localidad	Supeficie beneficiada (Ha)	No.	Localidad	Supeficie beneficiada (Ha)
1	La Aurora	3.0	27	Loma Angosta	20.0
2	El Barrialito	2.5	28	Bajos de Tlachiconal	21.5
3	El Boquetillo	5.0	29	Los Carriles	103.0
4	Los Capulines	95.0	30	Campalin (El Roble)	2.0
5	Cerro Alto	120.0	31	Mata Gallina	5.0
6	El Chavernero	5.0	32	Mata Tambor	5.5
7	Cotaxtla	48.5	33	Mata Tejón	123.0
8	La Covadonga	130.0	34	La Mocarraca	4.0
9	Cruz de Quintero	48.0	35	El Naranjo	9.0
10	Dos Matas	66.0	36	La Palma	3.0
11	Mundo Nuevo	66.0	37	Palo Amarillo	25.5
12	El Carmen	55.0	38	Paso Banco	25.0
13	El Mirador	5.5	39	Paso de la Vieja	13.5
14	El picadero	3.5	40	Paso Nuevo	2.0
15	El Ranchito	10.0	41	El Pochote	15.5
16	El Trapiche	4.5	42	Potrerrillos	20.0
17	Veladero	18.0	43	Pueblo Viejo	21.5
18	El Zapotal	6.0	44	La Tinaja	400.0
19	Las Guacamayas	28.5	45	Rancho Viejo	34.0
20	La Capilla	2.0	46	San Francisco	5.0
21	La Capillita	22.0	47	San Luis	20.5
22	La Cuesta	37.5	48	Cebadilla	12.0
23	Las Limas	27.0	49	El Sombrerete	13.5
24	Las Lomitas	5.0	50	Vista Clara	30.5
25	Lomas de los Hoyos	4.0	51	Vista Hermosa	20.0
26	El limoncito	7.0	52	Zapotal	3.0

Una práctica común entre los agricultores fue la quema de envases vacíos, lo cual libera sustancias tóxicas que contaminan el suelo y afectan la calidad de los cultivos (Miranda *et al.*, 2022). Además, cuando estos envases son enterrados, los productos químicos residuales se filtran en los acuíferos subterráneos, contaminando el agua destinada para el consumo humano (Sánchez, 2018). Esta situación representa un grave riesgo para la salud de los habitantes del municipio y del agroecosistema. En México, de acuerdo con algunos reportes, se ha identificado el uso de alrededor de 186 plaguicidas altamente peligrosos, algunos de los cuales han sido prohibidos en Europa debido a sus efectos cancerígenos (Soto, 2017). Según datos de SAGARPA, en México se generan alrededor de 50 millones de envases vacíos de plaguicidas, equivalentes a aproximadamente 6,020 toneladas. De los cuales el 85% son de plástico, el 14% de metal y solo el 1% de papel (SAGARPA, 2013). Lamentablemente, muchos de estos envases vacíos son desechados como basura común, sin que los productores utilicen equipos de protección adecuados al manipularlos. Esta práctica expone a los agricultores a inhalar o absorber los residuos químicos, lo cual puede ocasionar graves problemas de salud a largo plazo; como las afecciones de riñón que en la actualidad padecen los habitantes del municipio.

De acuerdo con los reportes de la Organización Mundial de la Salud (2021), “anualmente se intoxican dos millones de personas por la exposición directa o indirecta a plaguicidas”. Esto incluye el manejo inadecuado de los envases vacíos de agroquímicos; y entre 5 000 a 20 000 personas mueren por esta razón. La desinformación es uno de los problemas, los productores y otros usuarios que utilizan agroquímicos desconocen las regulaciones y procedimientos adecuados para el manejo de envases vacíos, además no disponen de los medios y/o el conocimiento necesario para recolectar y disponer adecuadamente estos, lo que dificulta cumplir con las regulaciones nacionales e internacionales. Estas normativas, en México, se basan en la Constitución Política en su artículo 4° donde se establece que toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar; y en la Ley Federal de Residuos Sólidos y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Estas regulaciones buscan asegurar la responsabilidad compartida entre productores y consumidores, fomentando la reducción, reutilización, reciclaje y disposición adecuada de los residuos.

La importancia de la colaboración entre autoridades municipales, productores y asociaciones civiles como Amocali A.C., radica en la necesidad de prevenir la disposición irresponsable de envases en canales

de riego, ríos, arroyos, zanjas, brechas y campo abierto, así como su quema o entierro (Galaviz, 2022). Lo cual, representa un riesgo significativo para la salud pública y el bienestar de la flora y fauna del entorno. Por lo tanto, la responsabilidad compartida entre agricultores, empresas y sociedad en general es esencial para abordar eficazmente este problema y minimizar los impactos negativos en la salud humana y el ecosistema.

Es crucial para promover un cambio de actitud y una mejora en las prácticas agrícolas. La educación es la base del cambio, la concientización sobre los riesgos de la mala gestión de envases de agroquímicos es esencial para impulsar acciones que disminuya su presencia en la atmósfera, suelo y agua. Se deben promover programas de capacitación para agricultores que fomenten prácticas responsables.

Conclusiones

De acuerdo con el diagnóstico obtenido fue posible observar la falta de conocimiento y capacitación sobre la importancia de la aplicación de las buenas prácticas agrícolas en el cultivo de papaya (*Carica papaya L.*) en el municipio de Cotaxtla, Veracruz.

Uno de los principales problemas que afectan la calidad del agua y del suelo en este municipio es el uso inadecuado de agroquímicos para el control de plagas, enfermedades y arvenses; por lo cual se recomienda capacitar a los productores en la incorporación de las BPA para el uso eficiente de los agroquímicos.

Se observó una disposición incorrecta de los envases vacíos de agroquímicos o residuos peligrosos, de los cuales fue posible recuperar 2.98 t procedentes de 52 localidades del municipio, los cuales fueron desechados *in situ*, almacenados en las viviendas de los productores o en la cercanía de los cuerpos de agua; por desconocimiento de los riesgos potenciales de estos a la salud humana y al ecosistema.

El desecho inadecuado de envases de agroquímicos en la agricultura es un problema grave que afecta tanto al medio ambiente como a la salud humana. Para solucionarlo, es necesario implementar planes de manejo y de recuperación de envases vacíos con responsabilidad compartida entre agricultores y empresas de agroquímicos. En este proceso, ambos actores desempeñan roles clave, con un impacto directo en la gestión responsable de residuos peligrosos.

Fue posible observar que los productores de papaya del municipio de Cotaxtla aplican paraquat y glifosato, este último con importación, uso y distribución prohibida en México.

Agradecimiento

Al Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico por el financiamiento asignado al proyecto CP 0911 1338/2023.

Bibliografía

- Caamal, S. C. R. (2022). Las buenas prácticas agrícolas: Estrategias de intervención para la gestión y mitigación de riesgos en el manejo de productos fitosanitarios Por productores de piña, Comunidad Agrícola de Manuel Ávila Camacho, Bacalar, Quintana Roo [Tesis de maestría]. Universidad de Autónoma del Estado de Quintana Roo.
- Castillo, B., Ruiz, J. O., Manrique, M. A., Pozo, C. (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete. *Revista Espacios*, 4(10):11-23. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n10/a20v41n10p11.pdf>
- Castro, P. A. T. (2021). Análisis de la implementación de las buenas prácticas agrícolas en las exportaciones ecuatorianas de frutas tropicales hacia el mercado europeo en el periodo 2017-2020. [Tesis de Ingeniería]. Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Administrativas.
- COFEPRIS. (2020). Glifosato actualización 2020. <https://www.gob.mx/cofepris/articulos/glifosato-actualizacion-2020?idiom=es> [Consultado el 06 de enero 2023].
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16:297-334.
- DOF. (2023). Diario Oficial de la Federación. Decreto por el que se establecen diversas acciones en materia de glifosato y maíz genéticamente modificado. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5679405&fecha=13/02/2023#gsc.tab=0 [Consultado el 06 de febrero 2023].
- FAO/WHO. (2008). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Código internacional de conducta sobre la distribución y utilización de plaguicidas. Directrices sobre opciones de manejo de envases vacíos de plaguicidas. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/be7d7334-e4d3-4dec-acbc-79a058009e93/> [Consultado el 3 de julio 2023].
- FAO. (2013). Food and Drugs Administration. Código Internacional de Conducta para la Gestión de Plaguicidas. FAO/ OMS. E-ISBN 978-92-5-308549-0. 3-7 pp.

- García, M. A. (2010). Guía técnica del cultivo de la papaya. Programa MAG-CENTA-FRUTALES. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. <https://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/BIBLIOTECA%20VIRTUAL/DOCUMENTOS%20WEB/0002534-AD-DOCGG.pdf>. [Consultado el 30 de junio 2023].
- Galaviz, M. A. A. (2022). Disposición de envases vacíos de plaguicidas generados en actividades agrícolas en Ahome, Sinaloa. *Exploratorio: Revista de la Realidad Global*, 11(1).
- Granados R. R., Salceda L. R., Longar B. M. P. (2015). Situación actual y perspectivas tecnológicas para la papaya (*Carica papaya* L.) en el distrito de Veracruz, Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(4):749-761.
- Hernández, N. R. A. (2002). Contribuciones al análisis estadístico. Mérida, Venezuela: Coedición de la Universidad de Los Andes (Facultad de Ciencias Jurídicas, Políticas y Criminológicas) y IESINFO (Instituto de Estudios en Informática). 29 p.
- Landini, F., Beramendi, M., Vargas, G. L. (2019). Uso y manejo de agroquímicos en agricultores familiares y trabajadores rurales de cinco provincias argentinas. *Revista Argentina de Salud Pública*, 10(38), 22-28.
- Madrigal, F. D. y Boza, M. P. (2013). La competitividad en las exportaciones de papaya de México: un análisis cuantitativo. *Revista de Análisis de Economía, Comercio y Negocios Internacionales* 7(2):27-54.
- Martens, S. F. (2016). ¿Son los envases vacíos de fitosanitarios un problema ambiental? <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/2134>
- Megchun, G. J. V., Rodríguez, L. D. A., Castañeda, Ch. M. R., Murguía, G. J., Lango, R. F., Leyva, O. O. R., Martínez, D. J. P. (2016). Manejo de los plaguicidas en el agroecosistema con papaya (*Carica papaya* L.) en Cotaxtla, Veracruz. *Memorias de Congreso. XXIX Reunión Científica y Tecnológica Forestal y Agropecuaria Veracruz 2016. II Reunión Internacional Científica y Tecnológica*. https://www.researchgate.net/publication/319205849_MANEJO_DE_LOS_PLAGUICIDAS_EN_EL_AGROECOSISTEMA_CON_PAPAYA_Carica_papaya_L_EN_COTAXTLA_VERACRUZ [Consultado el 20 de junio 2023].
- Miranda N., Sánchez, D., Sicilia, K. (2022). Manejo de envases vacíos de agroquímicos en la producción de arroz en el Distrito de Alanje, Provincia de Chiriquí. *Revista Semilla del Este*, 3(1), 151-160.
- Patarasiriwong, V., Wongpan, P., Korpraditskul, R. y Jeerapong, L.

- (2013). Modelo de gestión de residuos de envases de plaguicidas para Tailandia. *Revista de Ciencias e Ingeniería Ambientales*. B, 2 (1B), 1.
- Reascos P. J. L., Castillo, C. F. (2019). Buenas prácticas agrícolas, *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana* (marzo 2019), <https://www.eumed.net/rev/oe/2019/03/buenas-practicas-agricolas.html> [Consultado el 7 de julio 2023].
- SAGARPA. (2013). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Producción nacional de papaya. Recuperado de: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- Sánchez C. A. M. (2018). Formulación de estrategias para el manejo y disposición adecuada de los residuos sólidos, mediante la educación Y Acción Comunitaria en la Vereda de San Luis en el Municipio de Ubalá, Cundinamarca. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/22142>.
- Sánchez, C. M. A. (2021). Manejo de envases vacíos de agroquímicos y su impacto en la calidad ambiental de los sectores rurales del cantón buena fe, año 2020 [Tesis de maestría]. Quevedo UTEQ.
- SADER. (2019). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Manual para el buen uso y manejo de plaguicidas en campo. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/452645/MANUAL_PARA_EL_BUEN_USO_Y_MANEJO_DE_PLAGUICIDAS_EN_CAMPO.pdf
- Soto A. C. V. (2017). Glifosato y sus posibles efectos en la salud [Tesis de licenciatura]. Universidad de Sonora. Unidad Regional Sur. Recuperado de: <http://repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/20.500.12984/2025/1/sotoalmadacarlaveronical.pdf>
- Torres, D., Capote, T. (2004). Agroquímicos un problema ambiental global: uso del análisis químico como herramienta para el monitoreo ambiental. *Ecosistemas*, 13(3).
- Uribe, M. V., Castro, R. A., Paéz, I., Carvajal, N., Barbosa, E., León, L. M., Díaz, S. M. (2012). Impacto en la salud y el medio ambiente por exposición a plaguicidas e implementación de buenas prácticas agrícolas en el cultivo de tomate, Colombia, 2011. *Revista Chilena de Salud Pública* 16(2):96-106.
- Valencia, S. K., Duana, A. D., Hernández G. T. J. (2017). Estudio del mercado de papaya mexicana: un análisis de su competitividad (2001-2015). *Suma de Negocios* 8(18):131-139. <https://doi.org/10.1016/j.sumneg.2017.10.002>



Parte 4

*Perspectivas en el sector
agroalimentario*

Capítulo 13

Análisis de la influencia del sector agroalimentario en el desarrollo regional de México

María del Carmen Lozano Arizmendi ⊕ *Cesaire Chiatchoua*

Resumen

El objetivo del presente estudio es analizar la relación que tiene el sector agroalimentario sobre el desarrollo regional en México mediante el cálculo de coeficientes de correlación y modelos de Regresión Múltiple, con la finalidad de generar propuestas de mejora. Primero, se consideró la variable independiente Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo: 08 Agricultura y Desarrollo Rural y las variables dependientes Índice de Desarrollo Humano (IDH), ocupación, Producto Interno Bruto (PIB), exportaciones e Inversión Extranjera Directa. Los resultados de la primera parte, en la regresión lineal del coeficiente de correlación para estimar el impacto del Presupuesto del Gasto en diversas variables, muestran que la mayoría de las correlaciones son negativas. Esto indica que, a medida que el Presupuesto de Egresos de la Federación incrementa a lo largo de los años, la ocupación, el PIB, las exportaciones y la IED presentan un decrecimiento. Los resultados de la segunda parte corresponden al análisis de regresión múltiple. Los p-valores de este modelo para cada variable son: 0.227, 0.73, 0.164, 0.309, 0.846 y 0.003. Dado que todos los p-valores son mayores que 0.05, excepto para la variable IED que tiene es 0.003, la variable de IED tiene un efecto significativo en el IDH, ya que su p-valor es menor que 0.05. Sin embargo, las otras variables (presupuesto de egresos, ocupación en el sector agroalimentario, PIB y exportaciones) no tienen efecto significativo en el IDH, ya que sus p-valores son mayores que 0.05. Se concluye que no hay evidencia suficiente para afirmar que alguna de las variables independientes tenga un efecto significativo en el IDH.

Introducción

El desarrollo se concibe como un crecimiento constante, siendo una variable cuyo objetivo es alcanzar el bienestar de la población satisfaciendo necesidades básicas como alimentación, seguridad, salud, servicios básicos, vivienda y educación. Según Cuétara Sánchez et al., (2020), el desarrollo se define como un proceso donde interactúan positivamente varios elementos, siendo el Índice de Desarrollo Humano el instrumento utilizado para medir dicho concepto. Se articula sobre tres ejes: Salud (esperanza de vida), Educación (permanencia y acceso) e Ingreso (PIB per Cápita).

A nivel territorial, la estructura del desarrollo está compuesta por un gobierno, una sociedad civil y una participación ciudadana. Según Manet (2014) “la estructura relacional que conforma los sistemas socioeconómicos se localiza en espacios geográficos concretos, en los que fluye conocimiento, información e innovación, y en los que se desarrollan relaciones basadas en la confianza que llevan implícitos vínculos de pertenencia” (p.37). Esta confianza permite construir una sociedad justa y equitativa para todos sus habitantes.

Entonces, la estructura del desarrollo regional planteada permite garantizar la coordinación social. Según Elgueta Rosas y Espinoza Espinoza (2015), esto resulta en una adecuada articulación entre el sistema político (gobierno, sociedad civil, ciudadanía y sector privado) y el sistema económico (sectores primario, secundario y terciario), en la cual los distintos actores regionales logran niveles de colaboración, a la vez que respetan la autonomía de cada uno de estos sistemas y actores para una eficiente redistribución de los recursos y alcanzar el bienestar. De las actividades económicas, se puede mencionar la agroalimentaria, que juega un rol importante en el combate a la pobreza y el hambre, dado que el campo es el sector que proporciona seguridad alimentaria a todo el país.

Este sector agroalimentario está compuesto de actividades como la agricultura la silvicultura, la pesca y la caza entre otras, que generan alimentos y productos de origen vegetal, animal y fúngico, lo que permite satisfacer las necesidades de la comunidad. Además de satisfacer las necesidades de consumo, los excedentes de alimentos y productos sirven para actividades comerciales como las exportaciones y ventas en los mercados nacionales. Como consecuencia de lo anterior, el sector genera empleos, construcción de infraestructura, carretera, entrada de ingresos. Todo lo anterior concurre al bienestar de la población. Sin embargo, este sector enfrenta serios desafíos

como el crecimiento poblacional y el desarrollo de la región dado que la población crece de forma rápida.

El objetivo de este estudio es analizar la relación que tiene el sector agroalimentario sobre el desarrollo regional en México mediante el coeficiente de correlación y regresión múltiple, con la finalidad de generar propuestas de mejora. Después de la introducción, el primer apartado presenta el desarrollo regional y sus componentes, luego una definición del sector agroalimentario y sus elementos. El apartado dos desarrolla la metodología de investigación. Esta metodología dará los resultados presentados en la parte tres de este estudio. La parte cuatro discute los resultados y finalmente se detallan las conclusiones y recomendaciones. Partimos del hecho de que el sector agroalimentario contribuye de manera significativa al desarrollo de la región dado sus aportaciones en materia de generación de empleos, exportaciones, construcción de infraestructura y satisfacción de las necesidades.

El desarrollo regional y el sector agroalimentario en México

El desarrollo regional al ser un concepto multidimensional que incluye aspectos económicos, sociales y políticos tiene como finalidad mejorar la calidad de vida de la población en cualquier región de una nación. Por tanto, el desarrollo regional busca promover el crecimiento equitativo y a su vez, sostenible en cada región aún con sus particularidades. En consecuencia, se muestran los diversos temas relacionados con el desarrollo regional y sector agroalimentario. Se mostrará cómo ambos conceptos se interconectan jugando un papel crucial en el progreso de México.

Se analizarán las diferentes componentes del desarrollo regional, resaltando su importancia para el progreso de las localidades y su impacto en su crecimiento. A su vez se examinarán diversos aspectos del sector agroalimentario, incluyendo su composición, evolución y desafíos, y particularmente, su impacto en el desarrollo económico de las regiones.

El Desarrollo Regional y sus componentes

El desarrollo es un concepto complejo, ya que implica tanto sus componentes como el tiempo necesario para alcanzarlo. Todo gobierno aspira a satisfacer las necesidades básicas de su población en todo el territorio, desde lo nacional hasta lo regional. Según Miquel y Mon-

roy (2022, p. 276), “la región es un espacio donde los actores tienen una interacción económica, política y social para fortalecer el desarrollo de su territorio, y el desarrollo regional es una acción política, económica y social para el progreso de las regiones”. Lo anterior permite afirmar que el desarrollo regional considera como objeto a las personas y su entorno.

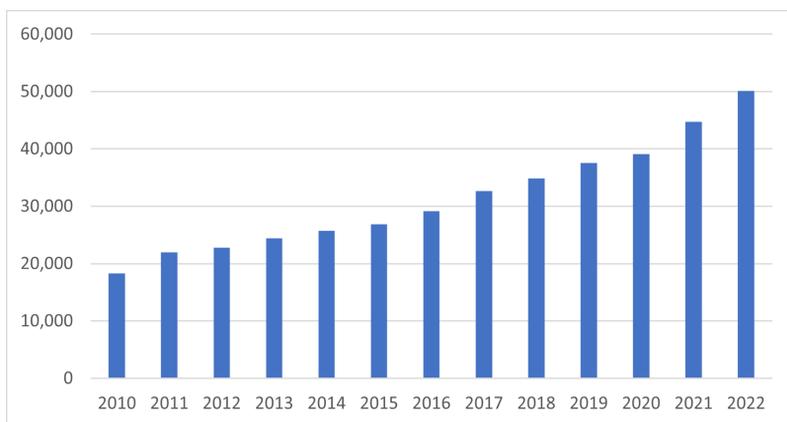
Para Escobar-Quiñonez (2020), “el desarrollo regional se concibe como un proceso integrador que gestiona un cambio para beneficio de la localidad o un proceso que busca mejorar la calidad de vida de las personas” (p.3). Este proceso integrador implica la asociación desde dese el gobierno hasta la sociedad civil, pasando por el sector privado, el mercado y las familias, dado que las necesidades y los intereses difieren. Una sinergia entre los diferentes actores mencionados es de gran interés para alcanzar los objetivos de bienestar y calidad de vida de los pobladores o comunidades.

En relación con la calidad de vida y el bienestar, es importante mencionar el Índice de Desarrollo Humano (IDH), que es el elemento que permite medir el grado de desarrollo de un país considerando dimensiones como la salud, medida con la esperanza de vida, la educación, medida en dos aspectos (promedio de años de escolaridad para adultos y expectativa de años de escolaridad para la niñez), y finalmente el ingreso per cápita, medido con la paridad del poder adquisitivo de los hogares.

El IDH proporciona valores entre cero y uno, entre más cerca está un país de 1, significa que es desarrollado y, por lo tanto, tiene mejor nivel de vida. Al contrario, entre más se acerca a 0, significa que es un país en vía de desarrollo donde las condiciones de vida son difíciles y gran parte de su población carece de los derechos sociales como la educación, la salud, acceso a vivienda, seguridad social, alimentación y servicios básicos. Además, su ingreso no permite en su gran mayoría cubrir los gastos de la canasta básica alimentaria y no alimentaria.

Existe una variedad de actividades que permiten a la población y a la región alcanzar el desarrollo. Entre estas actividades se encuentra el sector agroalimentario, que es un conjunto de actividades que garantizan la alimentación en una sociedad determinada, según Juárez Díaz et al. (2021). Este sector está compuesto por actividades de agricultura, silvicultura, pesca y ganadería. A continuación, se presenta la evolución de las exportaciones agroalimentarias de México entre 2010 y 2022.

Gráfica 1 México: valor de las exportaciones agroalimentarias 2010-2022 (millones de dólares).



Nota: SIAP con datos de Banco de México.

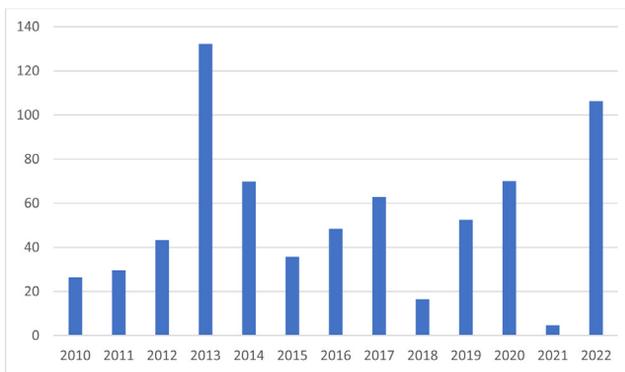
La Gráfica 1 muestra una progresión de las exportaciones, de unos 20 mil millones de dólares (MMD) en 2010 a 50 MMD en 2022, es decir, más del doble en 12 años. Este resultado indica un superávit de las exportaciones sobre las importaciones de bienes agroalimentarios, permitiendo al país posicionarse como el séptimo exportador de alimentos en el mundo. Específicamente, México ocupa los primeros tres lugares en la producción de aguacate, jitomate, berries, nuez, limón, mango, pimientos, lechuga, espárrago y cebolla.

Este resultado sobresaliente es el fruto del trabajo de tres sectores estratégicos: los productores, quienes son los actores principales por su labor diaria; el gobierno, con la creación e implementación de organismos como el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), la apertura de nuevos mercados y la atención al abasto interno; y la sociedad civil, que contribuye al buen funcionamiento de los mercados, la regulación de precios y el cumplimiento de los tratados nacionales e internacionales.

Como se observa en la Gráfica 1, la pandemia no afectó la progresión de las exportaciones, ya que las actividades del sector primario (agricultura, ganadería, silvicultura) no sufrieron interrupciones, a diferencia de otros sectores como el turismo, que experimentó cierres de hoteles y aeropuertos. Tampoco eventos internacionales como las guerras en Rusia-Ucrania y Palestina-Israel tuvieron un impacto negativo significativo.

Según la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2017), el sector agroalimentario de México registra un crecimiento sostenible anual del 12 % en sus exportaciones, duplicando el crecimiento de la economía nacional y consolidándose como un ramo productivo estratégico para el país. Por lo tanto, las exportaciones agrícolas pueden generar ingresos significativos en divisas extranjeras, contribuyendo a la estabilidad económica y al crecimiento del país (Cruz-Acosta et al., 2021).

Gráfica 2. Inversión Extranjera Directa en el sector agrícola en México de 2010 a 2022 (en millones de dólares).



Nota: elaboración propia con base en Statista Research Department, 15 oct 2023.

La inversión extranjera directa (IED) se refiere a la colocación de capital de un país emisor en otro país receptor para iniciar o continuar un proyecto ya existente. La entrada masiva de flujos de IED a finales de los años 80 e inicios de los 90 permitió a muchos países en desarrollo y emergentes avanzar en el desarrollo de infraestructura, generar empleo y aumentar los salarios de los hogares. Además, la IED está estrechamente relacionada con el crecimiento económico, ya que impulsa la producción y las exportaciones. En este sentido, Mamingi y Martin (2018, p. 1) señalaron que, “aunque el efecto de la IED en el crecimiento es positivo, su impacto es mínimo si se considera de manera aislada. También existe una fuerte y positiva interacción entre el desarrollo de la infraestructura y la IED”. A largo plazo, este efecto contribuye al desarrollo económico (Iamsiraroj, 2016; Dinh et al., 2019).

Por su naturaleza, la IED contribuye al mejoramiento del nivel de vida en los países receptores. Una IED que se alinea con las políticas nacionales de desarrollo puede generar empleos, aumentar los niveles salariales, desarrollar infraestructura, construir vínculos con socios y organizaciones internacionales, incrementar la recaudación fiscal y del gasto público, ampliar la oferta de productos y/o servicios, reducir los precios de estos productos y servicios, y fomentar el desarrollo tecnológico. Estas ventajas son clave para romper el círculo vicioso del subdesarrollo (Hayami, 2001) y representan una alternativa para combatir la pobreza (Ahmad et al., 2019; Ganic, 2019).

La Gráfica 2 ilustra la evolución de la IED recibida en el sector agroalimentario, mostrando una trayectoria poco constante con fluctuaciones significativas. En 2013, se registró la mayor entrada de inversión en este sector. En contraste, el sector agrícola recibió un flujo de IED de apenas 4.81 millones de dólares en 2021, la cifra más baja del período analizado, reflejando el impacto económico de la pandemia de COVID-19. Sin embargo, en 2022, la inversión extranjera en agricultura ascendió a más de 106 millones de dólares, convirtiéndose en la segunda cifra más alta del período, solo por detrás de los 132 millones de dólares registrados en 2013, según el Departamento de Investigación de Statista (2023).

El Sector Agroalimentario y sus elementos

El sector agroalimentario abarca todas las actividades relacionadas con la producción, procesamiento y distribución de productos agrícolas y alimenticios. Este sector desempeña un papel crucial en el desarrollo económico de todos los países, especialmente en aquellos menos desarrollados, donde genera el sustento de sus habitantes. A medida que una nación avanza económicamente, la importancia del sector agroalimentario puede parecer que disminuye, como lo demostró Ernst Engel en el siglo XIX al observar que el gasto en alimentos disminuye proporcionalmente a los ingresos. Sin embargo, los países desarrollados han demostrado que la agricultura sigue siendo fundamental para el enriquecimiento y desarrollo social.

La relevancia de este sector no solo se debe a la necesidad de alimentación, sino también a su impacto significativo en la economía y la salud de la población en general. En México, el sector agroalimentario es una parte esencial del crecimiento económico. Según el último censo agropecuario (INEGI, 2023), México cuenta con aproximadamente 32.1 millones de hectáreas dedicadas al uso agrícola. Además, se destaca que

el 83.8 % de la fuerza laboral en el campo está compuesta por hombres, mientras que el 16.2 % corresponde a mujeres. Entre los principales desafíos que enfrenta el sector agrícola en México se encuentran los altos costos asociados con insumos y servicios, así como los factores climáticos adversos que afectan la productividad y la rentabilidad. Estos problemas recurrentes representan barreras significativas para el desarrollo y la sostenibilidad del sector en el país.

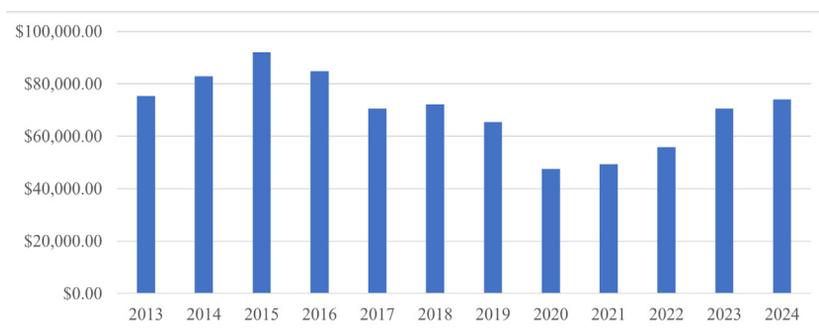
El desarrollo del sector agroalimentario también impulsa la demanda interna al generar ingresos para la población rural, lo que a su vez estimula el consumo de bienes y servicios producidos localmente, fortaleciendo así el mercado interno. Además, este sector no solo provee alimentos, sino que también contribuye con recursos y factores productivos esenciales como mano de obra, tierras y recursos naturales, los cuales son cruciales para el desarrollo de otros sectores económicos.

No obstante, un estudio realizado por Florez Vaquiro y Luna Contreras (2018, p. 110) revela que, aunque el sector agroalimentario genera ingresos para las familias, estos son insuficientes para satisfacer todas sus necesidades. Por ello, los integrantes de las familias deben buscar otras fuentes de financiamiento, como remesas de familiares. Este resultado explica el incremento de la migración tanto interna como externa y el fracaso de los programas sociales de apoyo a las comunidades rurales y urbanas.

En consecuencia, Florez Vaquiro y Luna Contreras (2018, p. 110) también observan que “la pequeña producción agrícola es cada vez menor y más fragmentada, lo que fomenta la asalarización de los campesinos y la diversificación de las fuentes de ingresos de las familias campesinas”. La falta de oportunidades y apoyo para la producción lleva a los campesinos a abandonar el campo en busca de empleo en los sectores industrial, de servicios y de comercio, lo que explica por qué el sector primario solo aporta el 3 % al PIB nacional.

Martínez-Domínguez et al. (2018) confirman que la industria, el comercio y los servicios son las principales fuentes de ingresos del sector rural, y no el sector agroalimentario. Este resultado indica que las actividades agrarias no generan suficientes empleos ni ingresos para satisfacer las necesidades de las comunidades. La falta de oportunidades en el campo obliga a los campesinos a migrar hacia estos otros sectores. En conclusión, Martínez-Domínguez et al. (2017, p. 83) señalan que “en el ámbito económico, los ingresos por actividades no agropecuarias tienen una participación significativa en la composición del ingreso total del hogar”.

Gráfica 3. Presupuesto de Egresos de la federación, 2013-2024 (Millones de pesos).



Nota: Secretaría de Hacienda y Crédito Público (o3 diciembre, 2023). Evolución del Ramo 08 “Agricultura y Desarrollo Rural”.

La Gráfica 3 ilustra la evolución del presupuesto asignado al sector agroalimentario, mostrando una tendencia irregular a lo largo de los años. Entre 2013 y 2024, se observa una estabilidad en los montos asignados, sin un crecimiento significativo durante más de una década. Se destacan fluctuaciones notables, especialmente entre 2013 y 2017, con un pico en 2015. El punto más bajo se registra en 2020, probablemente debido a la crisis pandémica. Posteriormente, se observa una recuperación clara hasta 2024; sin embargo, el presupuesto de este último año no supera ni el de 2015 ni el de 2013. Según Sánchez Cano (2014, p. 947), esto indica que “México se ha convertido en un país importador neto de alimentos, incapaz de satisfacer su demanda interna, con un desarrollo limitado de sus mercados, una productividad insuficiente y bajos niveles de ingresos para la mayoría de los productores”.

Este panorama contrasta con el análisis de Servín (2023), quien afirma que el presupuesto para 2024 será superior al de 2023 (ver Gráfica 3). No obstante, Servín también señala que este aumento no garantiza una mayor productividad en el sector debido a la reducción o eliminación de programas y la introducción de nuevos programas con orientación social y asistencial, como el Programa de Pensiones para Adultos Mayores y Sembrando Vida, que no contribuyen directamente a la producción. Esto resalta un debate sobre el gasto asistencial frente

al gasto productivo, es decir, la cantidad destinada a asistir a personas en zonas rurales en comparación con la inversión en insumos, infraestructura y capacitación en producción agroalimentaria.

En consonancia, el Centro de Análisis e Investigación (2023) y Martínez-Domínguez et al. (2018) afirman que, a pesar de los incrementos presupuestarios en 2022, la situación de pobreza rural y hambre en México sigue siendo complicada. Los esfuerzos gubernamentales para combatir estos problemas han tenido resultados poco satisfactorios. En este contexto, Robles Berlanga (2017) señala que el bajo impacto del presupuesto en el sector rural se debe a un diseño ineficaz de los programas, la inversión en bienes privados individuales que no fomentan procesos productivos locales y regionales, reglas de operación complejas y la falta de un padrón único, entre otros problemas.

Tavera Cortés et al. (2024, p. 6) concluyen que “el uso adecuado del presupuesto público es crucial para el crecimiento de la economía mexicana, mediante acciones como la creación de infraestructura, la protección de los derechos laborales, el impulso de sectores estratégicos y la promoción de igualdad de oportunidades”. Este equilibrio presupuestario es fundamental para el desarrollo local y regional.

Los estudios revisados indican que el sector enfrenta desafíos tanto internos como externos. A nivel externo, la guerra entre Rusia y Ucrania ha incrementado los precios de materias primas y energéticos, dado que estos países exportan entre el 25 y el 30 por ciento del trigo y el 80 por ciento de las semillas de girasol a nivel mundial. Navarro (2022) menciona que Bimbo, Gruma y Orbia, tres empresas mexicanas con operaciones en Ucrania, han suspendido sus actividades debido a problemas de seguridad, lo que ha resultado en una pérdida de ingresos para México y desempleo para los mexicanos.

A nivel interno, la pandemia de COVID-19 ha reducido la actividad económica global y nacional, aunque ha tenido un impacto menor en el sector primario, como la agricultura, ganadería y silvicultura. No obstante, la pandemia ha contribuido a una alta tasa de inflación debido a la disminución de la producción y los altos costos de producción derivados de la reducción de la movilidad. Además, algunos estados han enfrentado sequías (Forbes Staff, 2024).

Finalmente, la agricultura es fundamental para proporcionar alimentos, una necesidad básica para la población. Su crecimiento es esencial para sostener el desarrollo y crecimiento de otros sectores, como el industrial y de servicios, al ofrecer materias primas y alimentos para la fuerza laboral y la producción industrial, así como para el comercio al menudeo y mayoreo.

Materiales y métodos

En esta sección, se presenta los aspectos metodológicos que fueron utilizados en el estudio para analizar la relación entre el presupuesto asignado al sector agroalimentario y su impacto en el desarrollo económico y social de México. Se emplea un enfoque de investigación cuantitativo, que permite recopilar y analizar datos numéricos para comprender la relación entre las variables seleccionadas. El tipo de estudio es correlacional, lo que permite examinar las posibles asociaciones entre diferentes variables y cómo varían juntas en el tiempo.

Los datos utilizados para el análisis se presentan en la Tabla 1, la cual incluye el Índice de Desarrollo Humano (IDH), el gasto de los hogares, el empleo generado en el sector agroalimentario, el Producto Interno Bruto (PIB) del sector mencionado, las exportaciones generadas y la Inversión Extranjera Directa (IED). Estos datos son fundamentales para comprender el panorama actual del sector agroalimentario y su contribución al desarrollo económico y social del país. A través del análisis de estos datos, se busca identificar patrones, tendencias y relaciones significativas que puedan ayudar a formular recomendaciones y políticas para mejorar la eficiencia y la efectividad del presupuesto asignado a este sector.

Tabla 1. Variables del sector agroalimentario

Año	IDH	Gasto	Ocupación	PIB sector	Exportaciones	IED
2013	0.76	75402.5	193648326	16954005.7	11302098	48354425.8
2014	0.764	82900.4	194468371	18137650.6	12331797	30351269
2015	0.768	92141.8	199314020	19228614.7	13125760	35943841
2016	0.772	84827.3	203454538	20758790.5	14844819	31189434
2017	0.775	70597.2	206721117	22536210.3	15999956	34017290.5
2018	0.777	72125.4	212647164	24176670.4	16507572	34100968.9
2019	0.779	65434.9	218458195	25143108.3	17832328	34617079.3
2020	0.756	47576.9	203708302	24081765.8	18284587	28210523.4
2021	0.758	49291.5	220663459	26619086	19922267	31828837.5
2022	0.781	55789	229289594	29452832.1	21191628	36312089.3
2023		70527.9	235585535	31768334.8	21784276	36058043.8

Nota: elaboración con datos de las Gráficas 1-4. IDH de 2023 aún no se publica.

Se utilizaron dos métodos estadísticos para analizar la relación entre las variables. Por una parte, se consideró la variable independiente Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo: 08 Agricultura y Desarrollo Rural y las variables dependientes IDH, ocupación, PIB, exportaciones e IED. El coeficiente de correlación de Pearson permitirá determinar la relación lineal entre cada par de variables.

El modelo que se utilizará para esta relación se determinará por la ecuación

$$Y_{ij} = \beta_i X_i + e_{ij}$$

donde Y_{ij} representa a las variables dependientes (IDH, ocupación, PIB, exportaciones e IED), X_i la variable independiente (Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo: 08 Agricultura y Desarrollo Rural) y e_{ij} los errores considerando media cero y varianza uno (Montemayor Trejo, et al., 2017). Los cálculos se estimarán con el software Stata.

El coeficiente de correlación de Pearson toma valores entre -1 y 1. Un valor de -1 indica una correlación negativa perfecta. Un valor de 0 indica ausencia de correlación lineal.

Segundo, a través de la regresión múltiple se considerarán todas las variables independientes juntas para medir su impacto en el Índice de Desarrollo Humano. A través de examinar los coeficientes de regresión y los p-valores, se determinará la significancia estadística de cada variable independiente. El modelo de regresión lineal múltiple parte del supuesto que existe una influencia de las variables Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo 8, ocupación en el sector agroalimentario, PIB, exportaciones e IED en la variable IDH. El modelo que se empleará en esta investigación es

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \beta_3 X_{3j} + \beta_4 X_{4j} + \beta_5 X_{5j} + u_j$$

donde Y_j es la variable IDH y las X_{ij} corresponde a las variables independientes descritas, u_j los correspondientes residuos y β_i los coeficientes estimados del modelo.

El p-valor es una medida de la significancia estadística de los coeficientes en un modelo de regresión. Un p-valor pequeño (menor que 0.05) sugiere que el coeficiente es estadísticamente significativo. Un $p < 0.05$ significa que la hipótesis nula es falsa y un $p > 0.05$ que la hipótesis nula es verdadera (Mark, et al., 2016).

La hipótesis nula para esta investigación es $H_0:1=2=3=4=5=0$. Esto es, la hipótesis nula establece que no hay efecto significativo de ninguna de las variables independientes (presupuesto de egresos, ocupación en el sector agroalimentario, PIB del sector, exportaciones e inversión extranjera directa) en el Índice de Desarrollo Humano (IDH). Si los p-valores asociados con los coeficientes de las variables independientes son mayores que el nivel de significancia elegido (0.05), entonces no se rechaza la hipótesis nula.

Resultados y discusión

En esta sección, se presentan los resultados así que la conclusión del estudio que consiste en analizar la relación entre el presupuesto asignado al sector agroalimentario y su impacto en el desarrollo económico y social de México.

Los resultados derivados del análisis de correlación y regresión lineal múltiple se presentan en dos etapas. Derivado del análisis de regresión lineal se obtuvo que el coeficiente de correlación para estimar el impacto del Presupuesto del Gasto en las diversas variables se describe en la Tabla 2.

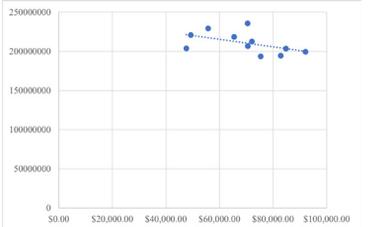
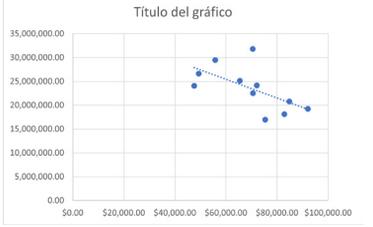
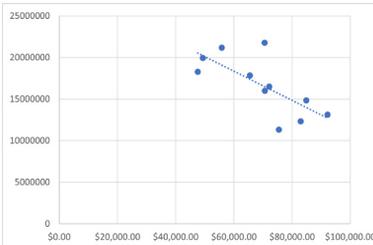
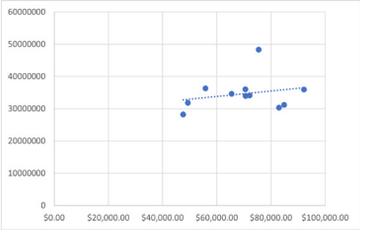
Tabla 2. Resultados coeficientes de correlación de Pearson con la variable x presupuesto

Variable	Coefficiente Pearson
Ocupación agropecuaria	-0.063
PIB sector agropecuario	-0.76
Exportaciones sector agropecuario	-0.82
Inversión Extranjera Directa	0.23

Nota: elaboración propia con datos de la investigación.

Por tanto, se obtiene en la mayoría de las correlaciones son negativas por lo que se concluye que a medida que Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo: 08 Agricultura y Desarrollo Rural se incrementa a lo largo de los años, tanto la ocupación, PIB, exportaciones e IED presentan un decrecimiento, véase Gráfica 4.

Gráfica 4. Diagrama de dispersión de las variables de estudio

<p>4a</p> 	<p>4b</p> <p>Título del gráfico</p> 
<p>a) Diagrama de dispersión Eje X: Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo vs Ocupación</p>	<p>b) Eje X: Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo vs PIB del sector</p>
<p>4c</p> 	<p>4d</p> 
<p>c) Eje X: Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo vs Exportaciones del sector.</p>	<p>d) Eje X: Presupuesto de Egresos de la Federación del Ramo vs IED</p>

Nota: elaboración propia con datos de la investigación.

EL COLEGIO DEL ESTADO DE HIDALGO

Los resultados de la segunda parte corresponden al análisis de regresión múltiple. En este caso el modelo estimado se observa

$$IDH = 0.70 + 5.17 \times 10^{-7} X_{1j} - 3.67 \times 10^{-10} X_{2j} + 9.49 \times 10^{-9} X_{3j} - 7.31 \times 10^{-9} X_{4j} + 5.17 \times 10^{-7} X_{5j}.$$

Los p-valores de este modelo para cada variable son. 0.227, 0.73, 0.164, 0.309, 0.846, 0.003. Dado que todos los p-valores son mayores que 0.05, excepto para la variable de inversión extranjera directa (IED) que tiene un p-valor de 0.003. La variable de IED tiene un efecto signi-

ficativo en el IDH, ya que su p-valor es menor que 0.05. En contraste, las otras variables (presupuesto de egresos, ocupación en el sector agroalimentario, PIB y exportaciones) no tienen efecto significativo en el IDH, dado que sus p-valores superan el umbral de 0.05. Por lo tanto, no hay evidencia suficiente para afirmar que alguna de estas variables independientes tenga un efecto significativo en el IDH.

El sector agroalimentario juega un papel crucial en el desarrollo regional y es un componente esencial de la economía nacional, según el Centro de Análisis e Investigación (2023). Los resultados del estudio indican que, a medida que aumenta el presupuesto destinado al Ramo 08 Agricultura y Desarrollo Rural, se observa una disminución en variables clave como la ocupación, el Producto Interno Bruto (PIB), las exportaciones y la Inversión Extranjera Directa (IED). En particular, se identifica una correlación más significativa entre el PIB y las exportaciones, mientras que la IED y el empleo muestran un impacto menor.

Estos hallazgos sugieren que gran parte de la IED en el país se orienta hacia sectores como la manufactura, el comercio y los servicios, en línea con lo señalado por el Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (2007). Además, coinciden con investigaciones previas, como la de Martínez-Domínguez et al. (2018), que destacan que la industria, el comercio y los servicios son las principales fuentes de ingresos en el sector rural, en detrimento del sector agrario.

Por otro lado, se observa una relación negativa débil entre el presupuesto destinado al Ramo 08 Agricultura y Desarrollo Rural y la ocupación, lo que sugiere una disminución en la relevancia del sector agropecuario como generador de ingresos. Este fenómeno, también discutido por Martínez-Domínguez et al. (2018), indica la necesidad de impulsar estrategias que fomenten el desarrollo de las comunidades rurales mexicanas.

El análisis de regresión múltiple revela que solo la IED muestra un efecto significativo en el Índice de Desarrollo Humano (IDH), mientras que el presupuesto de egresos, la ocupación en el sector agroalimentario, el PIB y las exportaciones no tienen un impacto significativo en el IDH. Este hallazgo sugiere que la entrada de flujos de inversión extranjera puede mejorar el nivel de vida de las comunidades, como argumentan Pérez Soto et al. (2022), quienes abogan por inversiones en infraestructura, maquinaria, investigación y desarrollo en el sector primario.

Conclusión

Este estudio resalta la relevancia del sector agroalimentario en el desarrollo regional de México y la necesidad urgente de revisar las políticas y estrategias relacionadas con el presupuesto público. Para fomentar un crecimiento económico más equitativo y sostenible en todas las regiones del país, es fundamental fortalecer la transparencia, la rendición de cuentas y la estabilidad económica. Esto ayudará a prevenir la corrupción y garantizar un uso eficiente de los recursos públicos en el sector primario, especialmente en un año electoral que podría ofrecer nuevas oportunidades para implementar cambios significativos en este ámbito.

Con el crecimiento continuo de la población, se recomienda al gobierno reorientar la política agroalimentaria en alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Los principales cambios esperados deben enfocarse en construir un sistema agroalimentario que sea productivo, justo, saludable, inclusivo y sostenible. Esto implica adaptar la producción de alimentos para hacer frente a los efectos del cambio climático.

Finalmente, a partir del T-MEC y el capítulo referente a las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), se sugiere reestructurar la política agrícola para reducir la brecha de desigualdad y potenciar el desarrollo de los productores de pequeñas y medianas empresas. Esta reestructuración no solo fortalecerá el dinamismo agroexportador de las regiones, sino que también promoverá una explotación responsable de los recursos naturales.

Bibliografía

- Ahmad, F., Draz, M., Su, L., Ozturk, I., Rauf, A. y Ali, S. (2019). Impact of FDI on poverty reduction in the ASEAN and SAARC economies. *Sustainability*, 11(9), 25-65. RePEc:gam:jsusta:v:11:y:2019:i:9:p:2565-d:228084.
- Centro de Análisis e Investigación. (2023). Presupuesto para el campo y desarrollo rural. FUNDAR. [HTTPS://FUNDAR.ORG.MX/PEF2022/PRESUPUESTO-PARA-EL-CAMPO-Y-DESARROLLO-RURAL/](https://fundar.org.mx/PEF2022/PRESUPUESTO-PARA-EL-CAMPO-Y-DESARROLLO-RURAL/)
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2007). Comentarios al Informe sobre el Comportamiento de la Inversión Extranjera Directa en México Enero - junio de 2007. CEFP/039/2007 [chromeextension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.cefpe.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefpe/cefpe0392007.pdf](https://www.cefpe.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefpe/cefpe0392007.pdf)

- Cruz-Acosta, J. J., Cartuche-Nagua, L. J y León-Serrano, L. A. (2021). Modelo econométrico: Análisis del impacto de las exportaciones en el crecimiento económico del Ecuador, 2009-2019. *Polo del Conocimiento*, 6(9), 2076-2095. 10.23857/pc.v6i9.3156.
- Cuétara Sánchez, L. M., Cartay Angulo, R. C y Labarca Ferrer, N. J. (2020). Desarrollo y crecimiento económico: Análisis teórico desde un enfoque cuantitativo. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVI(1), 233-253.
- Dinh, T., Hong Vo, D., The Vo, A y Cong Nguyen, T. (2019). FDI and economic growth in the short run and long run: Empirical evidence from developing countries. *Journal of Risk and Financial Management*, 12, 176-187. DOI: 10.3390/jrfm12040176.
- Elgueta Rosas, R y Espinoza Espinoza, V. (2015). Tres perspectivas sobre el desarrollo regional endógeno. *Revista Austral de Ciencias Sociales*, 28, 9-28 <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45955899001>
- Escobar-Quiñonez, E. (2020). Incidencia del comercio justo en el desarrollo agroalimentario en los territorios étnicos del Norte de Cauca: caso producción de plátano en Padilla, Cauca. *Cooperativismo & Desarrollo*, 28(118), 1-34. <https://doi.org/10.16925/2382-4220.2020.03.07>
- Florez Vaquiro, N y Luna Contreras, M. (2018). Hogares rurales y estrategias familiares de vida en México. *Revista Latinoamericana de Población*, 12(23), 109-147.
- Forbes Staff. (22 febrero, 2024). Sequía en México, presión al alza sobre la inflación: BofA <https://www.forbes.com.mx/sequia-en-mexico-presion-al-alza-sobre-la-inflacion-bofa/>
- Ganić, M. (2019). Does FDI contribute to poverty reduction? Empirical evidence from Central European and Western Balkan countries. *Scientific Annals of Economics and Business*, 66 (1), 15-27. DOI:10.2478/saeb-2019-0003.
- Hayami, Y. (2001). *Development economics: From the poverty to the wealth of nations*. Oxford University Press: Oxford.
- Iamsiraroj, S. (2016). The FDI-economic growth nexus. *International Review of Economics & Finance*, 42(C), 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2015.10.044>.
- INEGI (2023). Resultados oportunos del censo agropecuario 2022. Comunicado De Prensa Núm. 312/23 31 De mayo de 2023. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_ResOpt/CA_ResOpt2022.pdf

- Juárez Díaz, D. Coria Páez, A. L., Jiménez Arenas, O. L., & Tejeida Padilla, R. (2021). The agri-food system in rural areas of Mexico City in the context emerging by SARS-COV-2. *Systemic Approach Reflections. Textual*, 77,469-499. 10.5154/r.textual.2021.77.16
- Manet, L. (2014). Modelos de desarrollo regional: teorías y factores determinantes *Nósis*, 23(46), 18-56.
- Mark D. B., Lee K. L., Harrell J. F. (2016) Understanding the Role of P Values and Hypothesis Tests in Clinical Research. *JAMA cardiology*, 1(9), 1048-1054. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2016.3312>
- Mamingi, N y Martin, K. (2018). La inversión extranjera directa y el crecimiento en los países en desarrollo: el caso de los países de la Organización de Estados del Caribe Oriental. *Revista de la CEPAL*,124, 1-106. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/62907c60-c835-4d7c-b71c-9634b8869283/content>
- Martínez-Domínguez, M., de Souza, M y Mora-Rivera. J. (2018). Cambios en el empleo e ingreso de los hogares rurales de México, 2002-2007. *Región y sociedad*, 30(71). 10.22198/rys.2018.71.a772
- Martínez-Domínguez, M., Mora-Rivera, J. J., Yúnez-Naude, A., Parral-Inzunza, F., Jaramillo-Villanueva, J. L y Carranza-Cerda, I. (2017). Cambios sociodemográficos y económicos de los hogares en el México rural, 2002-2007. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 14(1), 83-104.
- Miquel, M., y Monroy, S. (2022). Elementos claves del Desarrollo Regional. Una mirada desde México. *TERRA*, (10), 271-285. DOI 10.7203/terra.10.2417
- Montemayor Trejo, J. A., Munguía López, J., Segura Castruita, M. A., Yescas Coronado, P., Orozco Vidal, J. A., & Woo Reza, J. L. (2017). La regresión lineal en la evaluación de variables de ingeniería de riego agrícola y del cultivo de maíz forrajero. *Acta universitaria*, 27(1), 40-44. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1255>
- Navarro, M. F. (2022). Impacto económico en México, del conflicto entre Rusia y Ucrania. *UAM Cuajimalpa*. <https://www.cua.uam.mx/news/miscelanea/impacto-economico-en-mexico-del-conflicto-entre-rusia-y-ucrania>
- Organización Internacional del Trabajo. (OIT, 2024). Base de datos de los indicadores Clave del Mercado de trabajo.
- Pérez Soto, F; Hernández Pérez, J y Figueroa Hernández, E. (2022): Efecto de la Inversión Extranjera Directa sobre El PIB de México. In: Isaac Egurrola Jorge E.; Morales García de Alba, Emma Regina; y

- Treviño Aldape, Abiel [Coords.] (2022). La economía sectorial reconfigurando el territorio y nuevos escenarios en la dinámica urbano rural. UNAM-AMECIDER, México. Páginas 31-46. En: <http://ru.iiec.unam.mx/5821/>. ISBN UNAM 978-607-30-6944-1, AMECIDER 978-607-8632-31-2.
- Robles Berlanga, H. M. (2017). Los efectos del presupuesto en el sector rural. Fundar, Centro de Análisis e Investigación. 1era Edición.
- Sánchez Cano, J. E. (2014). La política agrícola en México, impactos y retos. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 35(18), 946-956
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14131676004>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2017). Crecen exportaciones agroalimentarias de México al mundo 12 por ciento al año: SAGARPA.<https://www.gob.mx/agricultura%7Csonora/es/articulos/crecen-exportaciones-agroalimentarias-de-mexico-al-mundo-12-por-ciento-al-ano-sagarpa-147183>
- Servin, A. (27 octubre, 2023): Aumentan recursos para el campo, pero no en programas que fomentan la productividad: Especialistas. *El Economista*.
<https://www.eleconomista.com.mx/los-especiales/Aumentan-recursos-para-el-campo-pero-no-en-programas-que-fomentan-la-productividad-Especialistas-20231027-0046.html>
- Tavera Cortés, M. E., Torres Sandoval, A. J y Sandoval Gómez, R. J. (2024). Asignación eficiente del presupuesto en México. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(28), 5-33. <https://doi.org/10.23913/ride.v14i28.1764>

Capítulo 14

Aportaciones del Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya en la evolución y perspectivas de la biotecnología agrícola en el Bajío

Guillermo Antonio Silva Martínez, Fabiola Estefanía Tristán Flores, Ramón Gerardo Guevara González, Humberto Ramírez Medina, Juan Antonio Cervantes Montelongo, Gabriel Márquez Rojas, Juan Manuel Pichardo González & Gerardo Acosta García.

Resumen

La biotecnología agrícola en el Bajío, México, ha evolucionado significativamente, en parte, gracias a las contribuciones generadas por el Laboratorio de Biología Molecular “Dr. Lorenzo Guevara Olvera” del Tecnológico Nacional de México en Celaya. Este laboratorio, fundado en 1998, ha sido un pilar fundamental en el estudio y aplicación de la biotecnología en la región. La investigación agrobiotecnológica en el Bajío, se ha centrado en cultivos importantes como el ajo, el maíz y el chile. Este enfoque ha permitido el desarrollo de nuevas variedades de cultivos con mejoras significativas, fortaleciendo así la competitividad del sector agroalimentario y promoviendo la innovación tecnológica en la región. Por otro lado, el papel de la economía social y solidaria juega un papel fundamental, al garantizar un acceso equitativo a las tecnologías agrícolas y promover la colaboración entre diversos actores, fortaleciendo la seguridad alimentaria mediante prácticas agrícolas sostenibles y el desarrollo de variedades de cultivos mejoradas.

Estos avances en biotecnología agrícola ofrecen perspectivas prometedoras para el Bajío al abordar desafíos como la seguridad alimentaria, la sustentabilidad ambiental y la rentabilidad para los agricultores. La investigación continua en este campo seguirá siendo crucial para enfrentar los desafíos futuros y aprovechar las oportunidades de desarrollo en la región.

Contribuciones de la biotecnología en el Bajío

La biotecnología agrícola ha revolucionado la forma en que se producen los alimentos y ha desempeñado un papel crucial en la búsqueda de soluciones sostenibles para los desafíos de seguridad alimentaria en todo el mundo. En regiones como el Bajío, en México, donde la agricultura es una parte vital de la economía y la cultura, la biotecnología agrícola ha ganado una importancia significativa. La introducción de la biotecnología agrícola en el Bajío ha sido un proceso gradual, pero ha tenido un impacto significativo en la forma en que se cultiva y produce una amplia gama de cultivos en la región. En este capítulo analizaremos la evolución y perspectivas de la biotecnología agrícola en el Bajío desde las aportaciones del Laboratorio de Biología Molecular “Dr. Lorenzo Guevara Olvera” del Tecnológico Nacional de México (TecNM) en Celaya.

Aportaciones del Laboratorio de Biología Molecular en el Instituto Tecnológico de Celaya

El Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya ha sido un pilar fundamental en el avance de la biotecnología agrícola en la región del Bajío. Desde su fundación en 1998, el laboratorio ha impulsado investigaciones innovadoras que abordan problemas críticos en cultivos regionales, tales como el ajo, el chile y el maíz. Estas investigaciones han generado soluciones que no solo aumentan la productividad y la resistencia de los cultivos, sino que también promueven prácticas agrícolas sostenibles y tecnológicamente avanzadas, desarrollando estrategias para aumentar el rendimiento en campo, consolidando así su papel como un pilar en la generación de conocimiento en biotecnología agrícola dentro de la zona del Bajío.

Cultivos y patógenos en el Bajío

El Bajío mexicano, conocido por su destacada producción agrícola y su papel fundamental en la economía nacional, demanda una fuerza laboral capacitada para enfrentar los desafíos actuales y futuros. La biotecnología en su aplicación hacia el entorno agrícola, con su capacidad para mejorar la resistencia de los cultivos, aumentar los rendimientos y reducir la dependencia de los agroquímicos, se posiciona como una herramienta estratégica para impulsar la productividad y la sostenibilidad en la región. Sin embargo, factores bióticos y abióticos

pueden alterar la productividad agronómica. Uno de los principales intereses del Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya, ha sido comprender los mecanismos moleculares que subyacen a las interacciones planta-patógeno, con el fin de desarrollar estrategias efectivas para el manejo de enfermedades o generar variedades resistentes a estos, abonando sustancialmente a la seguridad alimentaria.

*Ajo y *Stromatinia cepivora*.*

El ajo es uno de los cultivos de gran importancia económica para el país, en el 2020 se reportó un volumen de producción de 86,500 toneladas. Esto permitió que México se posicionará como el noveno lugar en exportación a nivel mundial. Este alimento se cultiva en 21 entidades del país siendo los estados que mayor porcentaje de producción reportan Zacatecas (58%), Guanajuato (15%), Sonora (5%), Puebla (5%) y Baja California (4%) (SIAP, 2023).

El ajo es una hortaliza perteneciente al género *Allium* al igual que las cebollas, puerros y chalotes. Este cultivo es de los más antiguos y su uso se ha reportado desde Europa siendo los españoles quienes lo trajeron a América. Las características nutrimentales del ajo lo hacen un alimento con alto valor, rico en vitamina C, B6 y manganeso. Se le han atribuido cualidades importantes como que ayuda a la disminución de los niveles de colesterol malo (LDL), capacidad antioxidante que protege contra el daño celular y el envejecimiento, además de que ciertos compuestos que son útiles como agentes antimicrobianos (Tudu et al., 2022).

Existen diferentes variedades de ajo, la más común es el ajo blanco perla, también existe el rosa o morado, gigante o miniatura, todos con cualidades organolépticas y nutrimentales únicas. En nuestro país, se tiene preferencia por el ajo morado que se produce en Zacatecas y Guanajuato (SIAP, 2022).

La enfermedad que más afecta en México al cultivo del ajo, cebolla, puerro y cebollín es la pudrición blanca, causada por el hongo *Stromatinia cepivora*. Este hongo puede provocar la pérdida de hasta un 100% del cultivo de estas hortalizas, impactando de manera negativa a los productores. El manejo de esta enfermedad se realiza por varias estrategias como son saneamiento de parcelas, control químico y biológico, rotación de cultivos, solarización, etc.; sin embargo, ninguna de las medidas antes descritas, ha sido totalmente efectiva. De las opciones anteriores, la más recurrida es el uso de fungicidas de síntesis química como Benomil y Tebuconazol, cuyo continuo o inadecuado

uso ocasiona un impacto negativo sobre el medio ambiente y el suelo. Estos compuestos reducen la microbiota y pueden ser un riesgo para la salud humana (Delgadillo-Sánchez et al., 2002). Sin embargo, por características epidemiológicas del patógeno, los esclerocios, que representan su forma de propagación e infección, una vez establecidos son muy difíciles de erradicar por su etapa de latencia (Coley-Smith, 1960).

Normalmente los síntomas de la enfermedad aparecen en la temporada media del cultivo, sin embargo, este patógeno ataca durante todas las etapas de crecimiento de la planta difundiendo en los medios a través del movimiento del suelo, el agua y en partes de las plantas infestadas. Una vez introducido en un área, el patógeno se dispersa gradualmente por equipos contaminados y materiales de siembra (Lu et al., 2011; Reveles Hernández et al., 2014). La disponibilidad de resistencia genética indudablemente podría ayudar a mejorar otras medidas de control. El género *Allium* consta de alrededor de 850 especies, de las cuales sólo una pequeña porción ha sido evaluada para resistencia a la pudrición blanca y sólo pocas de las evaluadas han mostrado resistencia a *S. cepivora* (Bansal, 1992). Entre las especies de *Allium* resistentes se encuentran *A. caeruleum* (Adams y Papavizas, 1971), *A. tel-avivense* (Bansal, 1992), *A. sativum* variedad blanco perla y *A. ampeloprasum*, también llamado ajo elefante (Barbison, 2014).

En el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya, se ha establecido *in vitro* la interacción entre *S. cepivora* y *A. sativum* (compatible) y *A. ampeloprasum* (incompatible); en un periodo de 15 días, el hongo alcanza a cubrir al ajo susceptible (*A. sativum* var. tacáztcuaro), mientras que al ajo elefante solamente lo cubre en parte de la raíz sin la presencia de rasgos característicos de la progresión de la enfermedad (Medina et al., 2012). Éste último punto abre una ventana de oportunidad importante para establecer las bases moleculares de la interacción *S. cepivora-Allium*, las cuales, no han sido esclarecidas. Por ello, es de suma importancia dilucidar el mecanismo de interacción, principalmente la resistencia al patógeno por parte del ajo elefante. En este contexto se está desarrollando actualmente un análisis masivo transcripcional con tecnología de última generación como es la secuenciación dual de ARN, de la interacción planta-patógeno con el objetivo de identificar los cambios transcripcionales que se producen tanto en la planta como en el hongo durante su interacción. Lo anterior nos permitirá identificar diferencias genéticas y metabólicas importantes que se presenten en el ajo elefante y el hongo patógeno y así, con este conocimiento, generar nuevas aplicaciones o estrategias medioambientalmente sostenibles que permitan el control de esta enfermedad.

Maíz y *Ustilago maydis*

El maíz (*Zea mays*) representa un cultivo estratégico para México y para el mundo, este grano es un producto global. Actualmente es el cultivo número uno en el mundo por arriba del arroz y el trigo desde 1996 y 1997 respectivamente (FAOSTAT, 2017). En México, el maíz no solo se trata de un alimento básico, sino de un componente fundamental del patrimonio gastronómico, cultural y de la identidad de los mexicanos. En nuestro país, el cultivo del maíz es el más importante para la economía ya que ocupa la mayor superficie productiva (38.2%) en comparación con otros cultivos (CIMMYT, 2019). México es considerado cuna y salvaguarda de la biodiversidad del maíz. De un total de 220 razas de América Latina, aquí se han identificado 64 de ellas, de las cuales 59 son totalmente nativas (CONABIO, 2017).

A nivel internacional, México ocupa el noveno lugar en cuanto a producción y rendimiento de acuerdo con lo reportado por la USDA en el 2015/2016. En los primeros lugares están Estados Unidos, Canadá, Argentina y los países de la Unión Europea, seguidos por China y Ucrania.

Lo reportado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021), indica que en el país se cultivan principalmente dos variedades de maíz: blanco y amarillo. El maíz blanco se destina sobre todo para consumo humano, mientras que el maíz amarillo se emplea comúnmente para consumo pecuario. Cabe resaltar que las variedades nativas se destinan al consumo humano especialmente.

El 54.5% del maíz blanco se produce en cuatro estados: Sinaloa, Jalisco, México y Michoacán y el 59.0% de la producción de maíces de otros colores se concentra en México y Chiapas. Un dato importante y alarmante es que la producción de maíz amarillo satisface solamente el 24% de los requerimientos nacionales, y que, a pesar de su relevancia como cultivo, México presenta bajos índices de productividad promedio en comparación con los principales países productores. Para el año comprendido entre 2015/2016, el rendimiento promedio para maíz grano se situó en 3.47 t/ha, mientras que en Estados Unidos fue de 10.96 t/ha, siendo el promedio mundial de 5.38 t/ha (Martínez-Gutiérrez et al., 2018).

De acuerdo con las estadísticas, México consume maíz a un ritmo mayor del que lo produce, lo que nos hace más dependientes de las importaciones, principalmente de Estados Unidos, donde tanto los productores como consumidores encuentran precios más competitivos. Lo anterior, en términos económicos equivale aproximadamente a un costo anual de 2 500 millones de dólares (FAOSTAT, 2016; SIAVI,

2017). El panorama establecido brinda ventanas de oportunidad para el aprovechamiento sustentable de todos nuestros recursos naturales, en este caso, el maíz.

Una oportunidad viable es el “caviar mexicano” o “trufa mexicana” también llamada “huitlacoche”. Esta enfermedad es causada por el hongo *Ustilago maydis*, patógeno exclusivo del maíz y su antecesor el teozintle, la cual se caracteriza principalmente por el desarrollo de tumores o agallas en las mazorcas (Ruiz-Herrera, 2008). Esta “enfermedad” en algunos países ha tenido un gran impacto económico en su hospedante natural, el maíz. La producción de este cultivo ha tenido pérdidas económicas de millones de dólares anuales, debido a este hongo (Saville et al., 2012). Sin embargo, en México es comestible y se le considera como un auténtico “delicatessen” que ha invadido la cocina internacional con gran aceptación (León-Ramírez et al., 2014). En las últimas décadas *U. maydis* ha llegado a ser un modelo altamente atractivo para analizar problemas fundamentales del desarrollo patogénico de los hongos, principalmente la morfogénesis, virulencia, diferenciación celular y procesos de adaptación a cambios del medio ambiente (Base y Steinberg, 2004; León-Ramírez et al., 2014).

En el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya, nos enfocamos en la aplicación de estrategias de genómica funcional que permitan desarrollar la sustentabilidad de cultivos importantes en México como por ejemplo el maíz. Para esto utilizamos al hongo modelo *U. maydis*. Específicamente, estamos interesados en analizar la función de genes relacionados con la adaptación a cambios de pH del medio, el dimorfismo, virulencia y patogénesis cuando se encuentra establecida la interacción planta-patógeno.

En el 2018 se reportó un miembro importante de una vía de señalización que permite a los hongos adaptarse a cambios de pH de su entorno. Esta vía no se encuentra totalmente descrita para hongos de la división Basidiomycota donde se ubica *U. maydis*. La importancia de este conocimiento radica en entender la manera en que se adaptan los hongos a su medio, con la finalidad de poder desarrollar herramientas que nos permitan su control tanto en infecciones en plantas como en seres humanos (Cervantes-Montelongo y Ruiz-Herrera, 2018).

En los aspectos de diferenciación celular, dimorfismo y control de pH se ha establecido el papel importante del gen UMAG_00031 (Cervantes-Montelongo et al., 2020). Este gen codifica para una proteína relacionada con procesos adaptativos a cambios de pH independientes de la vía de señalización más importante, la vía Pal/Rim, además de su implicación en el dimorfismo. Los conceptos de dimorfismo y

adaptación a cambios de pH son relevantes para el establecimiento de una infección, lo que refleja el interés de nuestro grupo de trabajo para indagar en este tipo de procesos.

En un estudio previo, analizamos la respuesta transcripcional masiva de *U. maydis* a cambios de pH. De este estudio se encontró que el pH alcalino representa un mayor factor de estrés para el hongo en comparación con un pH ácido. Lo anterior concuerda con el número de genes afectados a nivel transcripcional siendo mayor a pH alcalino (797) contra el valor de pH ácido (301) (Cervantes-Montelongo et al., 2016). Estos resultados nos han brindado la oportunidad de continuar investigando por diferentes estrategias el papel de estos genes en procesos de gran relevancia para la instalación de una infección causada por hongos de interés agronómico y médico.

Estrategias de aumento de rendimiento en campo

El aumento del rendimiento en campo es un objetivo fundamental en la agricultura moderna, ya que está estrechamente relacionado con la seguridad alimentaria, la rentabilidad de los agricultores y la sostenibilidad ambiental. Para lograr este objetivo, se emplean una variedad de estrategias que abarcan desde prácticas agronómicas tradicionales hasta tecnologías innovadoras de vanguardia. A continuación, ahondaremos en algunas de estas estrategias estudiadas en el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya.

Bases moleculares de la señalización y efectos de giberelinas en Capsicum annuum.

El género *Capsicum* pertenece a la familia Solanácea y agrupa alrededor de 35 especies (Hernández-Pérez et al., 2020). El genoma de varias especies y cultivares de *C. annuum* ha sido secuenciado y analizado. Entre ellos, *C. annuum* cv. CM334 (Criollo de Morelos 334) (Kim et al., 2014), *C. annuum* var. glabriscum “Chiltepin” (GCA_000950795.1) (Qin et al., 2014) y *C. annuum* cv. Zunla-1 “Zunla-1” (GCA_000710875.1), proporcionando recursos genéticos para estudios a nivel molecular (Liu et al., 2023). Las giberelinas son diterpenoides tetracíclicos, sintetizados por organismos diversos, que inducen crecimiento y desarrollo en plantas (Keswani et al., 2022). El ácido giberélico (GA3), una de las principales giberelinas bioactivas, regula muchos procesos celulares como alargamiento de los segmentos nodales, germinación de semillas, floración, formación y maduración de fruto, entre otros (Cas-

tro-Camba *et al.*, 2022). En *C. annuum*, el ácido giberélico incrementa la anchura de las hojas, induce floración, altura de la planta y formación de frutos (revisado por Sahu *et al.*, 2019). El estrés hídrico es un factor abiótico que afecta el crecimiento y desarrollo de plantas y por lo tanto el rendimiento de los cultivos (Ozturk and Turkyilmaz-Unal, 2023). La aplicación de giberelinas se ha propuesto como una estrategia para aminorar los efectos adversos de la sequía (Salvi *et al.*, 2021). En nuestro grupo de investigación abordamos el estudio de la señalización y efectos de la aplicación de giberelinas en *C. annuum* y otras plantas de interés agrícola. En el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya, analizamos genomas e identificamos secuencias de genes mediante Bioinformática y corroboramos su transcripción mediante PCR en tiempo real. Además, identificamos proteínas mediante Proteómica. Estos estudios han permitido caracterizar genes y proteínas que median la respuesta a giberelinas y estrés abiótico. Nuestros resultados contribuyen al entendimiento de los efectos fisiológicos de la aplicación de ácido giberélico y por lo tanto en el mejoramiento de la productividad del cultivo de *C. annuum*.

Aplicación de fitohormonas exógenas en chile ancho y jalapeño

El chile es una especie perteneciente a la familia de las Solanáceas que se cultiva en gran parte del mundo. México ocupa el segundo lugar en producción de este cultivo después de China. Este cultivo forma parte básica en la comida mexicana y posee diferentes características como forma, tamaño, color, sabor y grado de pungencia, además de que es rico en diferentes nutrientes esenciales, particularmente vitaminas, minerales y carotenoides. El género *Capsicum*, incluye un promedio de 25 especies y tiene su centro de origen en las regiones tropicales y subtropicales de América, probablemente en el área Bolivia-Perú. Se han encontrado semillas de formas ancestrales de más de 7.000 años; se propone que desde dicha zona ocurrió su diseminación al resto de América (Srinivasan, *et al.*, 2016).

México es un excelente centro de domesticación de especies y posee una diversidad genética amplia, que incluye *C. annuum*, una especie cultivada, entre muchas otras (Loaiza-Figueroa *et al.*, 1989). Este cultivo se ve afectado por diferentes factores tanto bióticos como abióticos, entre los factores abióticos se encuentran las bajas temperaturas, las cuales afectan severamente la fisiología y el desarrollo de las plantas causando pérdidas en los cultivos que superan el 50 %, resultando una seria amenaza para los cultivos. De acuerdo con datos estadísticos, los

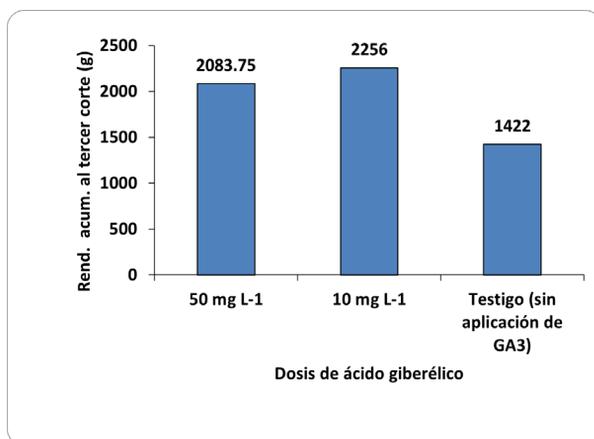
rendimientos en los cultivos de Chile han disminuido dramáticamente, principalmente en el centro y norte del país, esto debido a las condiciones ambientales adversas como heladas y sequías causantes de estrés hídrico en plantas (SADR, 2021).

Se ha demostrado que la aplicación exógena de las fitohormonas giberelinas en *Capsicum*, puede tener efectos positivos en el aumento del rendimiento de producción y tamaño del fruto (Pérez-Jiménez 2015, Pichardo-González et al., 2018). Algunos estudios en tomate y *Arabidopsis* indican que la respuesta a este estímulo hormonal se encuentra localizada específicamente en el tejido del ovario (Dorcey et al 2009, Barro-Trastoy et al., 2020).

En el Laboratorio de Biología Molecular se han empleado las giberelinas como un elicitador para incrementar el número de frutos por planta. Los experimentos fueron realizados primeramente en invernadero donde se encontró que la concentración 10 mg/mL permite incrementar el rendimiento y tamaño del fruto (Pichardo-González et al., 2018). Para evaluar el efecto de las giberelinas en el tamaño, forma y calidad del fruto, es importante estudiar el efecto de estas hormonas en la morfología del ovario y el desarrollo de los óvulos en estadios tempranos, ya que existen reportes que afirman que la forma y el tamaño del fruto se determina por la división y elongación celular, que ocurre en estadios pre-antesis (Reyes-Olalde et al., 2017). Por ello, una vez caracterizado el desarrollo de la flor de Chile, hemos analizado el efecto de las aplicaciones exógenas de giberelinas en el mismo. Para ello se aplicó la dosis recomendada de ácido giberélico (GA_3 ; 10 mg/L) o la mezcla comercial promalin (GA_4+GA_7+BA ; 10 mg/L), en una única aplicación en meristemos florales en estadio 3 y 8 se analizó el efecto de los tratamientos mediante cortes histológicos del tejido del ovario. Por otro lado, se ha reportado que la citoquina BA promueve la división celular (Svolacchia et al., 2023), esto explica el incremento en el tamaño y número de células que se observa con el tratamiento con promalin. Por esta razón, la combinación de la citoquinina BA con giberelinas, como tratamientos exógenos incrementaron el tamaño del fruto y el rendimiento en plantas de Chile tratadas (Sandoval-Oliveros, et al., 2018).

Para conocer si los tratamientos realizados en invernadero tienen el mismo efecto en campo, como el observado en invernadero, se estableció un proyecto en colaboración con productores del estado de Guanajuato miembros del Comité Nacional de Productores de Chile (CONAPROCH). Los resultados mostraron que las giberelinas pueden generar incremento en el rendimiento del cultivo comparado con plantas control (Figura 1).

Figura 1. Rendimiento de plantas de chile ancho variedad *Secuoya* crecidas en campo con tratamiento de giberelinas.



Los resultados han sido presentados en diferentes foros incluyendo reuniones con productores de otros estados los cuales debido a los resultados positivos en campo han empezado a realizar aplicaciones de giberelinas en sus cultivos. Obviamente estos resultados podrían cambiar dependiendo de las condiciones ambientales de cada zona, por lo que puede requerir un ajuste de la concentración. Tomados juntos los resultados que se han obtenido en el Laboratorio de Biología Molecular, a lo largo más de 25 años, enfocados al mejoramiento del cultivo de plantas de chile mediante la aplicación de hormonas, contribuye a la generación del conocimiento y la mejora en la capacidad de producción de chile en invernadero y campo.

Aplicación de giberelinas exógenas en plantas de amaranto (Amaranthus hypochondriacus)

El amaranto pertenece a la familia Amaranthaceae, la cual se conforma por 70 géneros y 800 especies, en el género *Amaranthus* está la división Magnoliophyta (angiosperma), de la clase Magnoliopsida (dicotiledóneas), que incluye alrededor de 60 especies (El-Ghamery et al., 2017; Mlakar Grobelnik et al., 2009; Sauer, 1967). México es el décimo productor de la variedad nativa, *Amaranthus hypochondriacus*, y se encuentra entre los principales 5 países que lo exportan (FAO, 2023). El amaranto proporciona un contenido de proteína entre 13 y 19 %, con alto contenido de lisina, aminoácido esencial presente en poca cantidad en cereales (Akin Idowu et al., 2013). Además, contiene

fibra (14%) y lípidos (5-13%), es rico en ácidos grasos insaturados, donde el ácido oleico es el más abundante (Bender & Schönlechner, 2021; Silva Sánchez & Barba de la Rosa, 2007). También, posee cantidades significativas de bioactivos como saponinas, fitoesteroles, ácidos fenólicos, antocianinas, flavonoides, vitamina A, vitamina C y polifenoles (Procopet & Oroian, 2022; Rastogi & Shukla, 2013). Por todo lo anterior el amaranto ha resurgido en los últimos años debido a sus características agronómicas y nutricionales (Khandaker et al., 2010; Velarde-Salcedo et al., 2013).

El genoma y transcriptoma completo de *A. hypochondriacus*, ya fue descrito, es un diploide ($2n=32$) que codifican para al menos 24,829 proteínas, esto ha sido la base para descifrar su valor nutricional, su función biológica, así como para mejorar el cultivo (Sunil et al., 2014). Sin embargo, se conoce poco sobre los mecanismos de regulación genética en etapas tempranas del desarrollo de la semilla, la regulación epigenética produce cambios fenotípicos hereditarios sin cambiar la secuencia del ADN, a través de los mecanismos de: metilación del ADN, modificación de histonas y microARN (miARN) (Surani et al., 1984; Swain et al., 1987; L. Zhang et al., 2020).

La información molecular respecto al proceso de embriogénesis en amaranto es limitada, etapa fundamental para el desarrollo de la semilla, por lo que caracterizar su metiloma y sus efectos en el transcriptoma en etapas tempranas del desarrollo de la semilla de amaranto permitirá establecer las bases para la generación de estrategias que permitan mejorar su calidad y producción. La metilación de ADN ocurre mediante la incorporación de un grupo metilo al carbono 5 de las citosinas (C), mediante la acción de una enzima del tipo ADN metil-transferasa. Esta metilación del ADN puede ocurrir en regiones densas de Citosina-Guanina (islas CpG) o en los contextos CHG y CHH (donde H puede ser; A, C o T), bloqueando la unión de factores de transcripción conduciendo al silenciamiento génico (H. Zhang et al., 2018). En el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya, se obtuvo el primer metiloma de *A. hypochondriacus* en etapas tempranas en el desarrollo, donde se identificó el porcentaje de metilación en el contexto CpG, el cual se encuentra en alrededor del 80%, superando casi al doble al contexto CHG y existe un menor porcentaje en el contexto CHH. Además, se encontraron que las islas CpG se encuentran mayormente metiladas en las primeras etapas de desarrollo, lo que podría estar indicando que solo ciertos genes cumplen su función en esas etapas y posteriormente se metilan de manera autónoma para inhibir su transcripción (Ortiz Martínez, 2022). Sin embargo, es nece-

sario continuar analizando la información generada por el metiloma, con la finalidad de identificar genes específicos que sean regulados por la metilación del ADN, desencadenando cambios en sus niveles de expresión que a su vez dan lugar a la formación de la semilla de Amaranto. Lo cual aporta al entendimiento del desarrollo y formación de las etapas tempranas del Amaranto.

En el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya, se está trabajando en la identificación de marcas en histonas en etapas tempranas del desarrollo de la semilla, lo cual se va a correlacionar con el análisis del transcriptoma y metiloma. Se utilizará la inmunoprecipitación de la cromatina (ChIP) técnica utilizada para el estudio de la unión de histonas a regiones específicas de ADN *in vivo*, a partir de las secuencias obtenidas de cada marca se determinará la activación o represión (Shen et al., 2000; Spencer, 2003). Las modificaciones post-traduccionales de histonas seccionadas son: la metilación de la histona H3 en la lisina 4 (meH3K4) y la metilación en la histona H3 en la lisina 27 (meH3K27). La meH3K4 es una modificación muy conservada que se encuentra presente en los promotores de los genes transcritos activamente en el que parece tener un papel en el inicio de la transcripción, mientras que la meH3K27, asociada con el silenciamiento de genes que regulan el desarrollo (Boumber et al., 2011; de la Serna et al., 2006; Garcia et al., 2007). Con este análisis se tendrá un panorama general y particular de los efectos de las marcas en histonas en la expresión de genes necesarios para el desarrollo temprano de la semilla de Amaranto, lo cual permitirá conocer los mecanismos epigenéticos de regulación para dirigirlos a la mejora del rendimiento y calidad del cultivo.

Una manera de regular el desarrollo de la semilla es a través de fitohormonas un grupo de sustancias químicas que regulan el desarrollo de las plantas en concentraciones muy bajas ($< 1\text{mM}$, frecuentemente, $< 1\mu\text{M}$) (Azcon-Bieto & Talon, 2008). Las giberelinas son un grupo de ácido diterpenos tetracíclicos, solubles en compartimentos intercelulares e intracelulares (He et al., 2020); participan en el desarrollo de las plantas, se ha reportado su papel en la elongación del tallo, germinación y dormancia de la semilla, expansión de la hoja, promoción en la transición de fases de desarrollo, incluso en el estrés biótico y abiótico (Wu et al., 2023).

En el Laboratorio de Biología Molecular del TecNM en Celaya, se han evaluado 3 dosis (1, 10 y 100 μM) de giberelina exógenas (GA3) aplicadas de manera foliar al inicio de la fase reproductiva de *A. hypochondriacus*, las variables evaluadas fueron: altura total de la planta, número de hojas, largo y ancho de hojas, elongación del tallo, longitud

y peso de la inflorescencia. Los resultados muestran que la concentración de 100 μM GA3 presentó un mayor efecto en la altura de la planta, peso de inflorescencia, tamaño y número de hojas; la comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.03$) mostró que con la concentración de 100 μM GA3 se obtuvieron inflorescencias de mayor peso (Rodríguez Cañada, 2022). Además, se procederá con el análisis de regulación de genes regulados por giberelinas en etapa de semilla temprana y su relación con la metilación del ADN, con la finalidad de conocer los mecanismos moleculares observados en el aumento de rendimiento de la semilla.

La perspectiva, a largo-mediano plazo, es lograr potencializar el rendimiento y calidad nutrimental de los cultivos de *A. hypochondriacus*, identificando los mecanismos moleculares de regulación fundamentales en etapas del desarrollo temprano de la semilla.

Horizonte del Uso de Nuevas Tecnologías y su Impacto al Sector Primario y Secundario de la Cadena Agroalimentaria

Guanajuato, uno de los estados más importantes en México en términos de producción agroalimentaria, se encuentra en una posición única para beneficiarse del avance tecnológico en el sector. Tanto en el sector primario, que incluye la producción agrícola y ganadera, como en el sector secundario, que abarca la transformación y procesamiento de alimentos, las nuevas tecnologías están desempeñando un papel cada vez más crucial (Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural, 2021). En la última década, el avance tecnológico ha revolucionado diversos aspectos de nuestras vidas, y el sector agroalimentario no ha sido la excepción. Desde la implementación de la biotecnología hasta la adopción de la inteligencia artificial (IA) y la agricultura de precisión, estas nuevas tecnologías están remodelando el panorama de la producción de alimentos, desde la semilla hasta el plato (Uzhinskiy, 2023).

Nuevas tecnologías de agricultura

En el sector primario, la implementación de la biotecnología está permitiendo a los agricultores guanajuatenses mejorar la productividad y la resistencia de sus cultivos. Las tecnologías emergentes están permitiendo una producción agrícola más sostenible al reducir el uso de recursos naturales y minimizar la huella ambiental. El cambio climático está generando condiciones climáticas extremas y amenazando la seguridad alimentaria global. Las nuevas tecnologías,

como los cultivos modificados genéticamente para resistir sequías o inundaciones, pueden ayudar a los agricultores a adaptarse a estas condiciones cambiantes y mantener la productividad incluso en entornos desafiantes. CRISPR-Cas9, una herramienta molecular para la edición de genomas ofrece la posibilidad de crear variedades con características específicas de manera más precisa y eficiente (González et al., 2023; Peter Van Esse et al., 2020). El desarrollo y adopción de variedades genéticamente modificadas, resistentes a enfermedades comunes en la región, como aquellas causadas por geminivirus en el cultivo de chile, puede reducir las pérdidas y aumentar los rendimientos (Mejía-Teniente et al., 2015). Además, permitirá que estos cultivos se adapten a condiciones climáticas extremas, aumentando la seguridad alimentaria y reduciendo la dependencia de agroquímicos. El uso de tecnologías genéticas de precisión en la agricultura está ganando terreno en Guanajuato, con agricultores que utilizan tecnologías de mapeo satelital y sistemas de riego inteligente para optimizar el uso de agua y fertilizantes, especialmente importante en un estado donde la disponibilidad de agua es una preocupación constante (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2022). La agricultura de precisión, impulsada por la recopilación y análisis de datos a través de sensores remotos, drones y sistemas de información geográfica (SIG), ha optimizado el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas (Taylor, 2023). Esto no solo reduce los costos de producción, sino que también minimiza el impacto ambiental al disminuir la contaminación y la erosión del suelo.

Impacto en la cadena agroalimentaria

En el sector secundario, Guanajuato se destaca por su industria alimentaria diversificada, que incluye la producción de alimentos procesados, lácteos, cárnicos y bebidas (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2022). La digitalización y el uso de herramientas acopladas a la IA están mejorando la eficiencia y la transparencia en todas las etapas, desde la producción hasta la distribución y la venta al por menor. Los sistemas de monitoreo y trazabilidad basados en *blockchain* permiten a los consumidores rastrear el origen y el proceso de producción de los alimentos, aumentando la confianza y la seguridad alimentaria. Además, permiten una gestión más eficiente de inventarios y una respuesta rápida a la demanda del mercado, reduciendo el desperdicio de alimentos (Jahanbin et al., 2023). La IA aplicada a la calidad y seguridad alimentaria garantiza productos más

seguros y consistentes para los consumidores (Ahmad et al., 2024). La innovación en la creación de nuevos productos alimenticios de fuentes convencionales y no convencionales, como snacks saludables y alimentos funcionales, impulsará el crecimiento de la industria agroalimentaria en el estado. La biotecnología y la ingeniería genética están impulsando la innovación en la creación de nuevos alimentos con perfiles nutricionales mejorados y características funcionales únicas (Mancera-Castro et al., 2022; Martínez-Ramírez et al., 2024; Teniente-Martínez et al., 2022). Desde carne cultivada en laboratorio hasta alimentos fortificados con nutrientes específicos, estas tecnologías tienen el potencial de abordar desafíos como el hambre y la malnutrición en todo el mundo (Treich, 2021).

Perspectivas y Desafíos en la Región del Bajío

Sin embargo, el acceso equitativo a estas tecnologías sigue siendo un desafío, especialmente para pequeños agricultores y empresas agroalimentarias en el estado de Guanajuato. Surgen preocupaciones éticas y regulatorias en torno a la modificación genética y el uso de datos en la agricultura. Además, Guanajuato enfrenta desafíos relacionados con la gestión sostenible de recursos naturales y la mitigación de impactos ambientales. La implementación de tecnologías sostenibles en la producción y procesamiento de alimentos puede ayudar a abordar estos desafíos, asegurando la viabilidad a largo plazo del sector agroalimentario en la región. Es innegable que, a pesar de los avances, Guanajuato enfrenta desafíos significativos en la adopción generalizada de nuevas tecnologías en el sector agroalimentario. La falta de acceso a financiamiento y capacitación técnica, especialmente para pequeños productores y empresas agroalimentarias, puede limitar la capacidad de aprovechar plenamente el potencial de estas tecnologías. No podemos negar que estas nuevas tecnologías ofrecen oportunidades significativas para mejorar la productividad, la sostenibilidad y la competitividad en un estado con un papel crucial en la producción de alimentos en México.

Prospectiva de la Economía Social y Solidaria de la Biotecnología en el Bajío

La Economía Social y Solidaria (ESS) está formada por la iniciativa de las personas y las acciones de las personas. Se basan en los principios y valores de la solidaridad y la cooperación, a través de cooperativas,

asociaciones, empresas, mercados sociales, grupos de consumo y redes que trabajan juntos para crear una economía más justa e inclusiva, con la finalidad de satisfacer sus necesidades individuales, de grupo o comunidad, sin tener prioridad el lucro ni la acumulación económica (Goodland & Daly, 1996; Porritt, 2012; Coraggio, 2002).

El Consejo Económico y Social Europeo (CESE) define a las ESS como un grupo de empresas privadas con independencia de decisión y libertad de participación, creadas para satisfacer las diversas necesidades de sus socios a través del mercado, produciendo bienes y servicios sin financiación ni lucro del ámbito de estas empresas. El papel de la ESS es, por tanto, estimular la actividad y devolver al mercado a quienes han sido excluidos. Se cree que es la piedra angular de otra economía centrada en el ser humano. Su misión es mejorar las condiciones de vida de todos. Hay un actor social, una persona que construye su propia realidad, y las transformaciones territoriales, económicas y sociales se ven en pequeños proyectos. (Soto Téllez, 2012).

En el contexto de la biotecnología agrícola, esto implica garantizar que los pequeños agricultores y las comunidades locales tengan acceso equitativo a las tecnologías y conocimientos necesarios para mejorar sus prácticas agrícolas. Esto se puede lograr a través de iniciativas de capacitación, acceso a créditos y fomento de la colaboración entre agricultores, investigadores y organizaciones de la sociedad civil. Al involucrar a las comunidades locales en la toma de decisiones y empoderarlas para participar en la cadena de valor agrícola, se puede promover una distribución más justa de los beneficios y fortalecer la resiliencia de la agricultura frente a los desafíos económicos y ambientales (García y Morales, 2018; García-Ruiz et al., 2020).

Impacto y Futuro de la Biotecnología en la Economía Social

La agenda global ha incorporado redes de ciencia, tecnología e innovación para promover nuevas formas de gobernanza socioeconómica y científica. La creciente complejidad de las cuestiones políticas, sociales y ambientales, junto con su interacción, ha generado relaciones entre representantes de diversas disciplinas y otros actores que participen en la observación, análisis y propuesta de soluciones a cuestiones de políticas públicas relacionadas con la alimentación, la energía, la nutrición, cambio climático y agua. La transformación de los sistemas de gestión de la innovación y el conocimiento ha llevado a un replanteamiento de su estructura de gobernanza, que está pasando de una administración vertical y unilateral a una gestión de organi-

zaciones descentralizadas y flexibles respecto a los diferentes actores presentes en la zona regional o local.

La biotecnología agrícola ofrece herramientas poderosas para fortalecer la seguridad y la soberanía alimentarias en el Bajío. Al desarrollar variedades de cultivos mejoradas genéticamente que son más resistentes a enfermedades, tolerantes a condiciones climáticas extremas y con mayores rendimientos, además de emplear fitohormonas en cultivos para promover mayor rendimiento y usar inhibidores que impiden el crecimiento de patógenos, se apoya el aumento en la producción de alimentos de manera sostenible. Estos avances garantizan el acceso adecuado a alimentos nutritivos y seguros para la población. La promoción de la economía social y solidaria puede asegurar que estos beneficios lleguen a los pequeños agricultores y las comunidades locales, fortaleciendo su capacidad para producir alimentos de manera independiente y sostenible (Hartwich et al., 2017; Li y Wu, 2020).

La biotecnología también puede fomentar la innovación y la colaboración en el sector agrícola del Bajío. Al promover la participación de diversos actores y crear espacios de intercambio de conocimientos y experiencias, se pueden generar nuevas ideas y soluciones para abordar los desafíos agrícolas y alimentarios de la región. La colaboración entre agricultores, investigadores, empresas y organizaciones de la sociedad civil puede impulsar el desarrollo y la adopción de tecnologías biotecnológicas adaptadas a las necesidades y condiciones específicas del Bajío, fortaleciendo así la capacidad local para enfrentar los desafíos del siglo XXI.

Importancia de la Formación Social de los Profesionales

En el dinámico panorama agroalimentario del Bajío, la biotecnología agrícola ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado en gran parte por la formación de recursos humanos altamente capacitados. La capacitación y el fortalecimiento de profesionales en biotecnología no solo impulsa la innovación científica y tecnológica, sino que también generan un impacto significativo en la competitividad y productividad del sector agroalimentario. Dada la importancia de Guanajuato en la producción agrícola de México, se ha reconocido la necesidad de profesionales especializados en biotecnología para aprovechar al máximo su potencial agrícola y enfrentar los desafíos venideros.

La formación de recursos humanos en biotecnología agrícola abarca diversas áreas de especialización, desde la biología molecular

y la genómica hasta la bioinformática y la ingeniería genética. Los programas educativos en Universidades -como lo es el Tecnológico Nacional de México, en sus diferentes campus del estado- e instituciones de investigación del Bajío -como el CINVESTAV Unidad Irapuato, INIFAP Campus Experimental Bajío, por nombrar algunos- juegan un papel fundamental en la preparación de profesionales capacitados para abordar los desafíos específicos del sector agroalimentario regional. Este amplio desarrollo se ha centrado en programas educativos que integran conocimientos multidisciplinarios, combinando biología, genética, agronomía e ingeniería genética. El impacto de esta formación de recursos humanos en el sector agroalimentario del Bajío es palpable a diferentes niveles. Por ejemplo: los profesionales formados en biotecnología agrícola están impulsando la innovación tecnológica en la región, desarrollando nuevas variedades de cultivos con características mejoradas, como resistencia a enfermedades, tolerancia a condiciones ambientales extremas y mayor calidad nutricional. Estas innovaciones están contribuyendo a la mejora de la productividad y la competitividad del sector agrícola del Bajío. De la misma forma, dicha formación promueve la adopción de prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente; aplicando técnicas como la biorremediación, el control biológico de plagas y la agricultura de precisión, que reducen la dependencia de los agroquímicos y minimizan el impacto ambiental de la agricultura en la región.

De esta manera, el Bajío se está consolidando como un nicho de desarrollo en biotecnología agrícola a nivel nacional e internacional, gracias en parte a la calidad de los recursos humanos formados en la región. Ya que la masa crítica de especialistas en biotecnología, actualmente se encuentran contribuyendo al posicionamiento de empresas agroalimentarias del Bajío en mercados internacionales, al desarrollar productos innovadores y de alta calidad que cumplen con los estándares internacionales.

Además, en definitiva, una de las principales actividades de los profesionales, es actuar como agentes de cambio al difundir sus conocimientos y experiencia en el sector agroalimentario. La colaboración entre instituciones académicas, centros de investigación y empresas agrícolas facilitarán la transferencia de tecnología y la adopción de prácticas innovadoras en la producción agrícola. Al impulsar la innovación, la transferencia de conocimientos y el desarrollo de capacidades locales, contribuye significativamente a la competitividad, la productividad y la sostenibilidad de esta importante región agrícola de México.

Agradecimientos

Este trabajo es un homenaje al incansable esfuerzo y la visión del Dr. Lorenzo Guevara Olvera, reconocido precursor de la biotecnología en la región del Bajío. Su labor como miembro fundador del Laboratorio de Biología Molecular del Departamento de Ingeniería Bioquímica del Instituto Tecnológico de Celaya (hoy Tecnológico Nacional de México en Celaya) ha dejado una huella indeleble en la comunidad científica y académica. Nuestro más sincero agradecimiento al Dr. Lorenzo Guevara Olvera por sus contribuciones pioneras en el campo de la biotecnología agrícola en el Bajío. Su trabajo visionario y sus incansables esfuerzos han sido fundamentales para el desarrollo y el avance de esta disciplina en la región. Bajo su liderazgo, el Laboratorio de Biología Molecular del Instituto Tecnológico de Celaya ha alcanzado importantes logros y ha marcado un camino de excelencia y compromiso con la ciencia y la educación.

El Dr. Lorenzo Guevara Olvera, con su destacada trayectoria y dedicación, fue fundamental en la creación y desarrollo del Laboratorio de Biología Molecular, actualmente denominado en su honor. Su regreso al ITC en 1998, después de una estancia posdoctoral en la Universidad Estatal de Ohio, marcó el inicio de una serie de gestiones y esfuerzos que resultaron en el establecimiento de este laboratorio, que ha sido crucial para la formación de estudiantes y profesionales en el campo de la biotecnología. Fue el precursor de las primeras tesis de Maestría en Ingeniería Bioquímica y ha sido instrumental en el desarrollo del Doctorado en esta disciplina. Además, varios exalumnos que pasaron por el laboratorio son ahora profesores investigadores, lo que demuestra la influencia y el impacto del laboratorio en la formación de futuros científicos. Los trabajos realizados en sus instalaciones, desde niveles de licenciatura hasta doctorado y posdoctorado, han sido reconocidos tanto a nivel regional como internacional.

El impacto del laboratorio se extiende más allá de sus instalaciones, evidenciado en la formación de exalumnos que hoy son profesores e investigadores activos, contribuyendo al crecimiento y la expansión de la biotecnología. La influencia del Dr. Lorenzo Guevara Olvera y el laboratorio se refleja en la continua colaboración con instituciones como la Universidad Autónoma de Querétaro, fortaleciendo las redes de interacción nacionales e internacionales.

Agradecemos profundamente el legado del Dr. Lorenzo Guevara Olvera, cuya visión y dedicación siguen inspirando a nuevas generaciones de científicos y profesionales en la biotecnología, asegurando un futuro prometedor para el desarrollo científico en el Bajío y más allá.

Bibliografía

- Ahmad, A., Liew, A. X. W., Venturini, F., Kalogeras, A., Candiani, A., Di Benedetto, G., Ajibola, S., Cartujo, P., Romero, P., Lykoudi, A., De Grandis, M. M., Xouris, C., Lo Bianco, R., Doddy, I., Elegbede, I., D'Urso Labate, G. F., García del Moral, L. F., & Martos, V. (2024). AI can empower agriculture for global food security: Challenges and prospects in developing nations. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1328530>
- Akin Idowu, P., Odunola, O. A., Gbadegesin, M. A., Oke, A., Orkpeh, U., & Uterdzua. (2013). Assessment of the protein quality of twenty-nine grain amaranth (*Amaranthus* spp. L.) accessions using amino acid analysis and one-dimensional electrophoresis. *African Journal of Biotechnology*, 12(15), 1802–1810. <https://doi.org/10.5897/AJB12.2971>
- Azcon-Bieto, J., & Talon, M. (2008). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Universidad de Barcelona.
- Barro-Trastoy, D., Carrera, E., Baños, J., Palau-Rodríguez, J., Ruiz-Rivero, O., Tornero, P., Alonso, J. M., López-Díaz, I., Gómez, M. D., & Pérez-Amador, M. A. (2020). Regulation of ovule initiation by gibberellins and brassinosteroids in tomato and *Arabidopsis*: two plant species, two molecular mechanisms. *The Plant journal: for cell and molecular biology*, 102(5), 1026–1041. <https://doi.org/10.1111/tpj.14684>
- Barro-Trastoy, D., Gomez, M. D., Tornero, P., & Perez-Amador, M. A. (2024). Hormonal Regulation of Ovule Initiation in *Arabidopsis*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(6), 1725–1735. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11234-w>
- Base, C. W., & Steinberg, G. (2004). *Ustilago maydis*, model system for analysis of the molecular basis of fungal pathogenicity. *Molecular Plant Pathology*, 5(2), 83–92. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00210.x>
- Bender, D., & Schönlechner, R. (2021). Recent developments and knowledge in pseudocereals including technological aspects. *Acta Alimentaria*, 50(4), 583–609. <https://doi.org/10.1556/066.2021.00136>
- Boumber, Y., Younes, A., & Garcia-Manero, G. (2011). Mocetinostat (MGCD0103): A review of an isotype-specific histone deacetylase inhibitor. *Expert Opinion on Investigational Drugs*. <https://doi.org/10.1517/13543784.2011.577737>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2019). *Maíz para México, Plan Estratégico 2030*. <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/308853f3-18bd-4d84->

8421-97fd2306bcf5/content

- Cervantes-Montelongo, J. A., Aréchiga-Carvajal, E. T., & Ruiz-Herrera, J. (2016). Adaptation of *Ustilago maydis* to extreme pH values: A transcriptomic analysis. *Journal of Basic Microbiology*, 56(11), 1222-1233. <https://doi.org/10.1002/jobm.201600130>
- Cervantes-Montelongo, J. A., & Ruiz-Herrera, J. (2018). Identification of a novel member of the pH responsive pathway Pal/Rim in *Ustilago maydis*. *Journal of Basic Microbiology*, 9(1), 14-23. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800180>
- Cervantes-Montelongo, J. A., Silva-Martínez, G. A., Pliego-Arreaga, R., Guevara-Olvera, L., & Ruiz-Herrera, J. (2020). The UMAG_00031 gene from *Ustilago maydis* encodes a putative membrane protein involved in pH control and morphogenesis. *Archives of Microbiology*, 202(8), 2221-2232. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01936-6>
- Coraggio, J. L. (2002). La economía social como vía para otro desarrollo social. *Economía social y solidaria El trabajo antes que el capital*. Abya Yala-Flacso, Ecuador. <https://www.coraggioeconomia.org/jlc/archivos%20para%20descargar/economiasocial.pdf>
- Coley-Smith, J. R. (1960). Studies of the biology of *Sclerotium cepivorum* Berk. IV. Germination of sclerotia. *Annals of Applied Biology*, 48(1), 8-18.
- de la Serna, I. L., Ohkawa, Y., & Imbalzano, A. N. (2006). Chromatin remodelling in mammalian differentiation: lessons from ATP-dependent remodellers. *Nature Reviews Genetics*, 7(6), 461-473. <https://doi.org/10.1038/nrg1882>
- Delgadillo-Sánchez, F., Zavaleta-Mejía, E., Osada-Kawasoe, S., Arévalo-Valenzuela, A., González-Hernández, V. A., Nieto-Ángel, D., & Torres-Pacheco, I. (2002). Densidad de inóculo de *Sclerotium cepivorum* Berk y su control mediante tebuconazole en ajo (*Allium sativum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 25, 349-354. <https://doi.org/10.35196/rfm.2002.4.349>
- Dorcey, E., Urbez, C., Blázquez, M. A., Carbonell, J., & Perez-Amador, M. A. (2009). Fertilization-dependent auxin response in ovules triggers fruit development through the modulation of gibberellin metabolism in *Arabidopsis*. *The Plant journal : for cell and molecular biology*, 58(2), 318-332. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03781.x>
- El-Ghamery, A. A., Sadek, A. M., & Abdelbar, O. H. (2017). Comparative anatomical studies on some species of the genus *Amaranthus*

(Family: Amaranthaceae) for the development of an identification guide. *Annals of Agricultural Sciences*, 62(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aogas.2016.11.001>

FAO. (2023). FAO y Gobierno Mexicano: Alianza para el fortalecimiento a la Cadena de Valor del Amaranto con “Un país, un producto prioritario.”

FAOSTAT, FAO. (2017). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://faostat3.fao.org/>

FAOSTAT, FAO. (2017). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/faostat/en/#-data>

García, B. A., Hake, S. B., Diaz, R. L., Kauer, M., Morris, S. A., Recht, J., Shabanowitz, J., Mishra, N., Strahl, B. D., Allis, C. D., & Hunt, D. F. (2007). Organismal differences in post-translational modifications in histones H3 and H4. *Journal of Biological Chemistry*, 282(10), 7641–7655. <https://doi.org/10.1074/jbc.M607900200>

García, M. C., & Morales, M. R. (2018). Social and solidarity economy for rural development: Opportunities for innovation in agri-food systems. *Sustainability*, 10(10), 3610. <https://doi.org/10.3390/su10103610>

García-Ruiz, J. R., Ferrer-Pérez, H., & Maroto-Molina, F. (2020). Social and solidarity economy: Economic development and support for social inclusion in rural areas. *Land Use Policy*, 97, 104765. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104765>

González, M., Kopecká, R., Kameniarová, M., Cerný, M., Brzobohatý, B., & Novák, J. (2023). Abiotic stress in crop production. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7), 6603. <https://doi.org/10.3390/ijms24076603>

Goodland, R., & Daly, H. (1996). Environmental Sustainability: Universal and Non Negotiable. *Ecological Applications*, 6(4), 1002–1017. <https://doi.org/10.2307/2269583>

He, J., Xin, P., Ma, X., Chu, J., & Wang, G. (2020). Gibberellin metabolism in flowering plants: An update and perspectives. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00532>

Hernández-Pérez, T., Gómez-García, M. D. R., Valverde, M. E., & Paredes-López, O. (2020). *Capsicum annuum* (hot pepper): An ancient Latin-American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2972–2993. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12634>

Jahanbin, P., Wingreen, S. C., Sharma, R., Ijadi, B., & Reis, M. M. (2023).

- Enabling affordances of blockchain in agri-food supply chains: A value-driver framework using Q-methodology. *International Journal of Innovation Studies*, 7(4), 307–325. <https://doi.org/10.1016/J.IJIS.2023.08.001>
- Kezwani, C., Singh, S. P., García-Estrada, C., Mezaache-Aichour, S., Glare, T. R., Borriss, R., Rajput, V. D., Minkina, T. M., Ortiz, A., & Sansinenea, E. (2022). Biosynthesis and beneficial effects of microbial gibberellins on crops for sustainable agriculture. *Journal of Applied Microbiology*, 132(4), 1597-1615. <https://doi.org/10.1111/jam.15348>
- Khandaker, L., Masum Akond, A., Ali, M. B., & Oba, S. (2010). Biomass yield and accumulations of bioactive compounds in red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) grown under different colored shade polyethylene in spring season. *Scientia Horticulturae*, 123(2), 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.09.01>
- Kim, S., Park, M., Yeom, S. I., Kim, Y. M., Lee, J. M., Lee, H. A., Seo, E., Choi, J., Cheong, K., Kim, K. T., Jung, K., Lee, G. W., Oh, S. K., Bae, C., Kim, S. B., Lee, H. Y., Kim, S. Y., Kim, M. S., Kang, B. C., ... Seo, Y. S., ... van Deynze, A. (2014). Genome sequence of the hot pepper provides insights into the evolution of pungency in *Capsicum* species. *Nature Genetics*, 46(3), 270-278. <https://doi.org/10.1038/ng.2877>
- León-Ramírez, C. G., Sánchez-Arreguín, J. A., & Ruiz-Herrera, J. (2014). Ustilago maydis, a delicacy of the Aztec cuisine and a model for research. *Natural Resources*, 5(5), 256-267. <https://doi.org/10.4236/nr.2014.56024>
- Li, J., & Wu, Z. (2021). Application of biotechnology in agricultural production and its impact on sustainable development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 687(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/687/1/012039>
- Liu, F., Zhao, J., Sun, H., Xiong, C., Sun, X., Wang, X., Wang, Z., Jarret, R., Wang, J., Tang, B., Xu, H., Hu, B., Suo, H., Yang, B., Ou, L., Li, X., Zhou, S., Yang, S., Liu, Z., ... Zou, X. (2023). Genomes of cultivated and wild *Capsicum* species provide insights into pepper domestication and population differentiation. *Nature Communications*, 14, 5487. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41251-4>
- Loaiza-Figueroa, F., Ritland, K., Cancino, J. A. L., & Tanksley, S. D. (1989). Patterns of genetic variation of the genus *Capsicum* (Solanaceae) in Mexico. *Plant Systematics and Evolution*, 165, 159-188.
- Lu, X., Ross, C. F., Powers, J. R., Aston, D. E., & Rasco, B. A. (2011). Determination of total phenolic content and antioxidant activity

of garlic (*Allium sativum*) and elephant garlic (*Allium ampeloprasum*) by attenuated total reflectance-Fourier transformed infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10), 5215-5221. <https://doi.org/10.1021/jf201254f>

- M. Ozturk, B. Turkyilmaz-Unal (2023). Exogenous application of phytohormones and phytometabolites to plants to alleviate the effects of drought stress. In M. Ozturk, R. Ahmad-Bhat, M. Ashraf, F.M. Policarpo-Tonelli, B. Turkyilmaz-Unal, & G. Hamid-Dar (Eds.), *Phytohormones and Stress Responsive Secondary Metabolites* (pp. 1-12). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91883-1.00001-2>
- Mancera-Castro, P., Bernardino-Nicanor, A., Juárez-Goiz, J. M. S., Teniente-Martínez, G., & González-Cruz, L. (2022). Effect of the type of thermal treatment on the nutritional and nutraceutical characteristics of Pacaya inflorescences (*Chamaedorea tepejilote* Liebm). <https://doi.org/10.3390/foods2022-13015>
- Martínez-Gutiérrez, A., Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Cardoso-Galvão, J.C., Vázquez-Carrillo, G., & Turrent-Fernández, A. (2018). Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(7), 1447-1458. Epub 30 de septiembre de 2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>
- Martinez-Ramirez, E. Z., Gonzalez-Cruz, L., Bernardino-Nicanor, A., Silva-Martínez, G. A., Falfan-Cortes, R. N., Gonzalez-Montiel, S., & Gomez-Aldapa, C. A. (2024). Hibiscus acid inhibitory capacity of angiotensin converting enzyme: An in vitro and in silico study. In *Plant Foods for Human Nutrition* (Vol. 79, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01142-5>
- Matsuo, S., Kikuchi, K., Fukuda, M., Honda, I., & Imanishi, S. (2012). Roles and regulation of cytokinins in tomato fruit development. *Journal of experimental botany*, 63(15), 5569-5579. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers207>
- Medina, H. R., Acosta-García, G., Muñoz-Sánchez, C. I., Hernández-Álvarez, M. I., González-Chavira, M. M., Delgadillo-Sánchez, F., Torres-Pacheco, I., Guevara-González, R. G., & Guevara-Olvera, L. (2012). Profiling the transcriptome of *Sclerotium cepivorum* Berk to white rot on garlic (*Allium sativum* Linnaeus). *African Journal of Microbiology Research*, 6(13), 2752-2760. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.1354>
- Mejía-Teniente, L., de Jesús Joaquin-Ramos, A., Torres-Pacheco, I., Rivera-Bustamante, R. F., Guevara-Olvera, L., Rico-García, E., &

- Guevara-Gonzalez, R. G. (2015). Silencing of a germin-like protein gene (CchGLP) in geminivirus-resistant pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) BG-3821 increases susceptibility to single and mixed infections by geminiviruses PHYVV and PepGMV. *Viruses*, 7(12), 6141–6151. <https://doi.org/10.3390/v7122930>
- Mlakar Grobelnik, S., Turinek, M., Jakop, M., Bavec, M., & Bavec, F. (2009). Nutrition value and use of grain amaranth: Potential future application in bread making. *Agricultura*, 6, 43–53. https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Culture-plantes-alimentaires/FICHES_PLANTES/amarante/Nutrition%20value%20and%20use%20of%20grain%20amaranth_potential%20future%20crop.pdf
- Ortiz Martínez, Z., (2022). Análisis de los perfiles de metilación del ADN del desarrollo de semilla en *Amaranthus hypochondriacus*. [Tesis de Maestría]. Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- Pérez-Jiménez, M., Pazos-Navarro, M., López-Marín, J., Gálvez, A., Varó, P., & del Amor, F. M. (2015). Foliar application of plant growth regulators changes the nutrient composition of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae*, 194, 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.002>
- Peter Van Esse, H., Reuber, T. L., & Van Der Does, D. (2020). Genetic modification to improve disease resistance in crops. *New Phytologist*. <https://doi.org/10.1111/nph.15967>
- Pichardo-González, J. M., Guevara-Olvera, L., Couoh-Uicab, Y. L., González-Cruz, L., Bernardino-Nicanor, A., Medina, H. R., González-Chavira, M., & Acosta-García, G. (2018). Efecto de las gibberelinas en el rendimiento de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(5), 925-934. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.1502>
- Porritt, J. (2012). *Capitalism*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849770668>
- Procopet, O., & Oroian, M. (2022). Amaranth seed polyphenol, fatty acid and amino acid profile. *Applied Sciences*, 12(4), 2181. <https://doi.org/10.3390/app12042181>
- Putero, L. y Rodríguez, S. L. (2014). América del Sur: crisis mundial, desarrollo y economía social. *Ciges*. https://biblioteca.clacso.edu.ar/Argentina/ciges/20171030032324/pdf_822.pdf
- Qin, C., Yu, C., Shen, Y., Fang, X., Chen, L., Min, J., Cheng, J., Zhao, S., Xu, M., Luo, Y., Yang, Y., Wu, Z., Mao, L., Wu, H., Ling-Hu, C., Zhou, H., Lin, H., González-Morales, S., Trejo-Saavedra, D. L., Tian, H., ... Hu, K., Zhang Z. (2014). Whole-genome sequencing of cultivated and

- wild peppers provides insights into *Capsicum* domestication and specialization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14), 5135-5140. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400975111>
- Rastogi, A., & Shukla, S. (2013). Amaranth: A new millennium crop of nutraceutical values. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(2), 109–125. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.517876>
- Reveles-Hernández, M., Velázquez-Valle, R., Reveles-Torres, L. R., & Cid-Ríos, J. A. (2014). Guía para la producción de cebolla en Zacatecas. Folleto Técnico No. 62. Campo experimental Zacatecas. CIRNO-CINIFAP. Zac., México.
- Reyes-Olalde, J. I., Zúñiga-Mayo, V. M., Serwatowska, J., Chavez Montes, R. A., Lozano-Sotomayor, P., Herrera-Ubaldo, H., Gonzalez-Aguilera, K. L., Ballester, P., Ripoll, J. J., Ezquer, I., Paolo, D., Heyl, A., Colombo, L., Yanofsky, M. F., Ferrandiz, C., Marsch-Martínez, N., & de Folter, S. (2017). The bHLH transcription factor SPATULA enables cytokinin signaling, and both activate auxin biosynthesis and transport genes at the medial domain of the gynoecium. *PLoS genetics*, 13(4), e1006726. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1006726>
- Rodríguez Cañana, M.,(2022). Efecto de giberelinas exógenas en el desarrollo de *Amaranthus hypochondriacus*. [Tesis de Licenciatura]. Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- Ruiz-Herrera, J. (2008). Ustilago maydis: ascenso de un hongo mexicano de la gastronomía local al mundo científico. *Nova Scientia*, 1, 118-135. <https://doi.org/10.21640/ns.v1i1.246>
- Sahu, S., Kumar, V., & Sharma, H. G. (2019). Effect of plant growth regulators on growth and yield of chilli: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(1), 2122-2132. <https://www.phytojournal.com/archives/2019/vol8issue6/PartAI/8-5-536-574.pdf>
- Salvi, P., Manna, M., Kaur, H., Thakur, T., Gandass, N., Bhatt, D., & Muthamilarasan, M. (2021). Phytohormone signaling and crosstalk in regulating drought stress response in plants. *Plant Cell Reports*, 40(8), 1305–1329.
- Sandoval-Oliveros, R., Guevara-Olvera, L., Beltrán, J. P., Gómez-Mena, C., & Acosta-García, G. (2017). Developmental landmarks during floral ontogeny of jalapeño chili pepper (*Capsicum annuum* L.) and the effect of gibberellin on ovary growth. *Plant Reproduction*, 30(2), 119-129.
- Sauer, J. D. (1967). *The Grain Amaranths and Their Relatives: A Revi-*

- sed Taxonomic and Geographic Survey. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 54(2), 103–137. <https://doi.org/10.2307/2394998>
- Saville, B. J., Donaldson, M. E., & Doyle, C. E. (2012). Investigating host induced meiosis in a fungal plant pathogen. In A. Swan (Ed.), *Meiosis - Molecular Mechanisms and Cytogenetic Diversity* (pp. 411-450). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/30032>
- Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural. (2021). Diagnóstico Agrologístico del Estado de Guanajuato. https://sdayr.guanajuato.gob.mx/contenido/adjuntos/evaluaciones/2020/Diagnostico_Agrologistico_del_Estado_de_Guanajuato_2021_FP.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) dependiente de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural SADER, Gobierno de México (13 de mayo de 2021). <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/estima-agricultura-crecimiento-de-2-6-porcentaje-en-la-produccion-de-maiz-grano-en-ano-agricola-2021?idiom=es>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2022). Guanajuato Infografía agroalimentaria 2022. https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/infomun/media/docs/infografia_agroalimentaria.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) dependiente de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural SADER, Gobierno de México (6 de julio de 2023). En 2022, en México se cosecharon 94 mil 428 toneladas de ajo [Infografía]. Facebook. <https://www.facebook.com/siap.sader/posts/en-2022-en-m%C3%A9xico-se-cosecharon-94-mil-428-toneladas-de-ajo-833-de-las-cuales-pr/666434808862237/>
- Shen, X., Mizuguchi, G., Hamiche, A., & Wu, C. (2000). A chromatin remodelling complex involved in transcription and DNA processing. *Nature*, 406(6795), 541–544. <https://doi.org/10.1038/35020123>
- SIAVI. (2017). Estadísticas mensuales. Secretaría de Economía, Fracción 1005.90.03 <http://www.economia-snci.gob.mx>
- Silva Sánchez, C. (2007). Caracterización fisicoquímica amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) cultivado en San Luis Potosí [Tesis doctoral, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica]. Repositorio Institucional del IPICYT <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/3052/TDIPICYTS5C32007.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Soto Téllez, F. (2012), *Economía Social y Solidaria Reflexiones para una Política Pública*, Centro de Estudios Estratégicos Nacionales. https://ceen.org.mx/wp-content/uploads/2015/11/ECONOMIA_SOLIDARIA.pdf

- Spencer, V. (2003). Chromatin immunoprecipitation: a tool for studying histone acetylation and transcription factor binding. *Methods*, 31(1), 67–75. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(03\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(03)00089-6)
- Srinivasan K. (2016). Biological Activities of Red Pepper (*Capsicum annuum*) and Its Pungent Principle Capsaicin: A Review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(9), 1488–1500. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.772090>
- Sunil, M., Hariharan, A. K., Nayak, S., Gupta, S., Nambisan, S. R., Gupta, R. P., Panda, B., Choudhary, B., & Srinivasan, S. (2014). The draft genome and transcriptome of *Amaranthus hypochondriacus*: A C4 dicot producing high-lysine edible pseudo-cereal. *DNA Research*, 21(6), 585–602. <https://doi.org/10.1093/dnares/dsu021>
- Surani, M. A. H., Barton, S. C., & Norris, M. L. (1984). Development of reconstituted mouse eggs suggests imprinting of the genome during gametogenesis. *Nature*, 308(5959), 548–550. <https://doi.org/10.1038/308548a0>
- Svolacchia, N., & Sabatini, S. (2023). Cytokinins. *Current biology: CB*, 33(1), R10–R13. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.11.022>
- Swain, J. L., Stewart, T. A., & Leder, P. (1987). Parental legacy determines methylation and expression of an autosomal transgene: A molecular mechanism for parental imprinting. *Cell*, 50(5), 719–727. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(87\)90330-8](https://doi.org/10.1016/0092-8674(87)90330-8)
- Taylor, J. A. (2023). Precision agriculture. In R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 710–725). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00261-5>
- Teniente-Martínez, G., Bernardino-Nicanor, A., Valadez-Vega, M. D. C., Montañez-Soto, J. L., Juárez-Goiz, J. M. S., & González-Cruz, L. (2022). In vitro study of the antihypertensive, antioxidant and antiproliferative activities of peptides obtained from two varieties of *Phaseolus coccineus* L. *CYTA - Journal of Food*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2022.2090611>
- Treich, N. (2021). Cultured meat: Promises and challenges. *Environmental and Resource Economics*, 79(1). <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00551-3>
- Tudu, C. K., Dutta, T., Ghorai, M., Biswas, P., Samanta, D., Oleksak, P., Kumar Jha, N., Radha, M. K., Procków, J., De la Lastra Pérez, J. M., & Dey, A. (2022). Traditional uses, phytochemistry, pharmacology and toxicology of garlic (*Allium sativum*), a storehouse of diverse phytochemicals: A review of research from the last decade focusing on health and nutritional implications. *Frontiers in Nutrition*, 9, 949554. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.929554>

- Uzhinskiy, A. (2023). Advanced technologies and artificial intelligence in agriculture. *Advanced Technologies and Artificial Intelligence in Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/appliedmath3040043>
- Velarde-Salcedo, A. J., Barrera-Pacheco, A., Lara-González, S., Montero-Morán, G. M., Díaz-Gois, A., González de Mejía, E., & Barba de la Rosa, A. P. (2013). In vitro inhibition of dipeptidyl peptidase IV by peptides derived from the hydrolysis of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) proteins. *Food Chemistry*, 136(2), 758–764. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.08.032>
- Wu, R., Liu, W., Liu, K., Liang, G., & Wang, Y. (2023). Genome-wide identification and expression of the GRAS gene family in oat (*Avena sativa* L.). *Agronomy*, 13(7), 1807. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071807>
- Zhang, H., Lang, Z., & Zhu, J. K. (2018). Dynamics and function of DNA methylation in plants. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 19(8), 489–506. <https://doi.org/10.1038/s41580-018-0016-z>
- Zhang, L., Lu, Q., & Chang, C. (2020). Epigenetics in health and disease (pp. 3–55). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3449-2_1

Capítulo 15

Producción potencial de chia e incorporación en alimentación avícola para incrementar los ácidos grasos poliinsaturados en huevo y carne

Arturo F. Castellanos Ruelas, Genovevo Ramírez Jaramillo, José Gabriel Rosado Rubio, David A. Betancur Ancona & Luis A. Chel Guerrero

Resumen

El propósito de este trabajo fue conocer el potencial productivo de la chía (*Salvia hispánica* L.) en México, en particular en el estado de Yucatán y su perfil de ácidos grasos poliinsaturados. Asimismo, se evalúa como alimento para aves. Se realizó un mapeo a nivel nacional de acuerdo con los requerimientos de calidad del suelo, altitud, agua y temperatura. SE utilizó un programa informático se detectaron las zonas de potencial productivo óptimo, subóptimo y no aptos. Semillas del estado de Chiapas fueron sometidas a tratamiento con de horno de microondas, para facilitar a la extracción del aceite y se determinó la composición en ácidos grasos. La chía se incorporó en niveles crecientes (0, 7.5 y 15%) en dietas comerciales para gallinas ponedoras y en

dietas para pollos de engorda (0, 5 y 10%). Los resultados mostraron la existencia de 2'512,359 has con potencial alto y 3'659,089 has con potencial mediano. En Yucatán se identificaron zonas pequeñas, en los municipios del oriente, en el sureste, del suroeste y en la zona centro. La suma de los contenidos de ácidos linoleico y linolénico alcanzó niveles cercanos a un 80% habiéndose facilitado la extracción total de ácidos grasos mediante el uso del horno de microondas. Esta proporción fue mayor que la obtenida en aceites de reconocida calidad. Los niveles máximos de incorporación en las dietas de aves, sostuvieron su productividad y enriquecieron en ácidos $\omega 3$ y $\omega 6$ el huevo y los lípidos corporales. Se concluye que el potencial productivo de la chía en México es muy grande pudiendo satisfacer un mercado en expansión; la chía puede incorporarse a la dieta de gallinas ponedoras y pollos de engorda con la finalidad de enriquecer la yema y la carne con ácidos $\omega 3$ y $\omega 6$ de alto valor nutricional para la población humana.

Introducción

El crisol del tiempo permitió a México entregar al mundo su conocimiento sobre una gran variedad de recursos alimenticios originados en esta tierra. En efecto, el cultivo y la recolección de maíz, cacao, frijol, vainilla, tomate, aguacate, chía, entre otros muchos productos del campo, permitieron el desarrollo de las culturas prehispánicas (Beltrán y Romero, 2007). En tiempos actuales, sería difícil concebir a nivel internacional que pudiéramos prescindir de sus beneficios (INTA, 2012). Eso es solo una pequeña muestra de las 61,765 especies vegetales localizadas en nuestro país (CONABIO, 2024).

Los conceptos de una alimentación balanceada ya existían en el mundo prehispánico. No se habían acuñado todavía los términos de “aminoácidos esenciales”, “alimentos funcionales”, “probióticos”, “fibra dietética”, “ácidos grasos poliinsaturados”. Pero la carne de los animales de cacería aportó los aminoácidos esenciales; mediante la nixtamalización del maíz, se logró mejorar el aprovechamiento de los almidones; la fermentación del maíz en atoles o pozol propició el desarrollo de bacterias lácticas; el consumo de insectos o de granos enteros les proveyó a la población la fibra dietética necesaria; el pescado y la chía fueron sus fuentes de ácidos $\omega 3$ y $\omega 6$. El rescate de estas tradiciones alimenticias, junto con el desarrollo de nuevo conocimiento, son una alternativa para mejorar la alimentación y nutrición de la población del México actual.

La chía (*Salvia hispánica* L) es una planta herbácea de la familia de

las lamiáceas, cuyo centro de origen es el área montañosa de México y de Guatemala. Su semilla es rica en ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) (Ayerza y Coates, 2007; Ciau, 2007), en particular el ácido α linolénico ($\omega 3$) y el gama linolénico ($\omega 6$) (Álvarez *et al.*, 2008). Estos ácidos grasos se consideran esenciales para el hombre debido a que no es capaz de sintetizarlos a la velocidad que se requieren, por lo que tienen que ser aportados por la dieta (Mataix, 2009). En lo general, son abundantes en las plantas, en particular las oleaginosas y son escasos en los productos de origen animal. Su importancia radica en que juegan un papel preponderante en el mantenimiento de la integridad del tejido nervioso (Mataix, 2009). Obviamente que los niños serán los más beneficiados de su consumo, por estar formando su organismo.

El consumo de estos AGPI de 18 carbonos también está asociado a una disminución en la presentación de isquemia del corazón (Mattson, 2007). Otros beneficios son reconocidos en la dieta mediterránea, en la cual AGPI de más de 20 carbonos contenidos en el pescado como las plantas marinas, se consideran como los mediadores más importantes de la disminución de enfermedades cardiovasculares (Leaf, 2007; De Logeril y Salen, 2007). Diversos autores asocian los beneficios del consumo del pescado no solo a su riqueza en los AGPI, sino también al consumo de una dieta más saludable (Cundiff *et al.*, 2007).

La fracción proteica de la chía se ha revelado importante en la obtención de péptidos bioactivos para coadyuvar a prevenir la Diabetes Tipo II (Vuksan *et al.*, 2007; Valenzuela y Segura, 2022) o bien como antihipertensivos suprimiendo la acción de la Enzima Convertidora de la Angiotensina (López, *et al.*, 2019). Seguramente que en un corto estos hidrolizados proteicos con bioactividad irrumpirán en el mercado de los alimentos nutraceuticos.

Para poder incorporar la chía a los procesos industriales de elaboración de alimentos enriquecidos y nutraceuticos destinados una numerosa población humana como la de México, o bien, a la alimentación animal, se requiere saber si acaso su potencial productivo puede satisfacer la demanda del futuro mercado. Muchas investigaciones en nuestro país son llevadas a cabo con productos agrícolas que demuestran valor como antioxidantes (brócoli, frutos rojos) cuya producción apenas alcanza para un mercado selecto de compradores de nivel económico alto. De ahí la importancia de conocer la capacidad productiva del país, antes de llevar a cabo investigación con productos exóticos que a futuro habrá que importarlos.

Al incluir la chía en la formulación de alimentos balanceados para gallinas de postura y pollos de engorda, se puede enriquecer el huevo

y la carne de pollo con AGPI, lo cual sería benéfico para el consumo humano. Lo anterior debido a que las aves pueden incorporar los lípidos dietéticos directamente en el huevo (Marshall *et al.*, 1994) o en sus propias reservas grasas sin modificar la estructura química (Yau *et al.*, 1991).

El Cuerpo Académico Desarrollo Alimentario ha invertido numerosos años investigado sobre el uso de la chía tanto para la alimentación humana, como avícola. Los proyectos de investigación han generado numerosas publicaciones científicas que han sido publicadas en revistas internacionales. Con base en la disponibilidad de esta información, se planteó hacer una reseña de estos datos disponibles en el dominio público, para integrarlos en un documento coherente con el objetivo de:

- Conocer las áreas del potencial productivo de la chía en México, con énfasis en el estado de Yucatán.
- Cuantificar el perfil de AGPI de un cultivar de Chiapas, sometiéndola a un proceso térmico previo a la extracción.
- Incrementar el contenido de AGPI en la yema del huevo y en la carne de aves mediante la incorporación de chía en la alimentación de gallinas de postura y pollos de engorda

Materiales y Métodos

Se hará una descripción sintética de las metodologías empleadas por los distintos autores, identificando la fuente de información.

Diagnóstico del potencial productivo de la chía (Ramírez *et al.*, 2022) Se calcularon datos en tres niveles de potencial productivo:

1. Zonas con potencial óptimo.
2. Zonas con potencial subóptimo.
3. Zonas no aptas o con potencial inferior al subóptimo.

Los requerimientos agroecológicos fueron integrados por Ruiz *et al.* (1999) obteniéndolos de información publicada por INIFAP (1993), Ramírez (1995), Ramírez *et al.*, (2006), especificando las condiciones para el cultivo en sus diferentes escenarios (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones Agroclimáticas Requeridas por el Cultivo de Chía de Temporal en México

	Óptimo	Subóptimo	No Aptos	Comentarios
Clima^a	C y Aw	Am y B	D, E y H	
Altitud (m.s.n.m)	400-2500	200-400	<200 y >2500	
Temperatura media anual (°C)	20-30	15-20 y 30-35	<15 y >35	Es una especie de zonas templadas y tropicales
Precipitación (mm)	500-1000	300-500 1000-1500	<300 y >1500	Tolerante a la sequía.
Suelo	Arenoso-limoso y arcillo-limoso, con buen drenaje ^b . pH de 7.5 a 5. Textura de tipo migajón limoso suave, con manto freático renovable. (Fluvisol, Acrisol, Luvisoles, Nitosoles, Histosoles, Xerosoles, Regosol, Planosol, Andosol, Castañozem). Suelos Cambisoles son de potencial mediano		Suelos inundables. (Gleysoles, Vertisoles, Rendzinas, Leptosoles, Solonchaks)	Requiere suelos aireados

^aGarcía, (1988). ^bAyerza y Wayne (2006).

Para determinar las zonas potenciales, los datos se procesaron y analizaron utilizando el software Arc/View versión 3.3., que representa datos georreferenciados, analiza las características y patrones de distribución de esos datos y genera informes con los resultados de dichos análisis (ESRI, 1996).

Calidad nutrimental del aceite de chia (Rosado et al., 2012)

Se midió en el aceite de Chía procedente de semillas el estado de Chiapas y adquirida en Mérida, Yuc. El aceite se obtuvo mediante el proceso de extracción por solventes, usando hexano; a otro lote previamente se le aplicó radiación de un horno de microondas. El aceite se analizó mediante el uso de un cromatógrafo de gases, empleando un detector de ionización de flama.

La Harina Integral de chía (HICH) se incorporó a dos experimentos. La semilla se compró en Mérida y una pequeña parte fue producida en el área donde se llevaron a cabo los trabajos en el municipio de Ucú, Yuc., México, donde se disponía de una pequeña área de cultivo. Previa a su molienda, la semilla se deshidrató en un horno de convección a 60°C durante 24 h.

En el primer experimento se estudiaron 36 gallinas Babcock de 40 semanas de edad, con peso inicial de 1.3 ± 0.05 kg, se asignadas al azar a 3 tratamientos contando 6 jaulas con dos aves en cada una. A las gallinas se les ofreció dietas prácticas con tres grupos experimentales: 0% (testigo), 7.5% y 15% de HICH reemplazando (p/p) el alimento balanceado. El experimento duró 122 días.

En el segundo experimento se observaron 36 pollitos de la línea Cobb con siete días de vida, se asignaron de una manera totalmente al azar a 3 tratamientos con 4 jaulas cada uno y cada jaula con 3 pollitos. Se alimentaron con alimento comercial durante seis semanas. La HICH se incorporó a razón de 0%, 5% y 10% (p/p), reemplazando al alimento comercial, en dietas de tipo práctico. La composición proximal de la HICH se obtuvo mediante la aplicación de la metodología descrita por la AOAC (1997).

Se estimó el cambio de peso de las aves. A las gallinas también se les calculó el porcentaje de postura y el peso de huevo. Se muestrearon las yemas de huevos durante 6 periodos semanales comprendidos entre de la cuarta y la decimosexta semana del experimento. Cada 8 semanas se sacrificó un pollo de cada tratamiento para llevar a cabo el análisis histopatológico de muestras de riñón, hígado y páncreas; además de hacer observaciones de la condición general de salud de las aves.

La composición en ácidos grasos de la yema del huevo y de las muestras obtenidas de los pollos (piel, pechuga, muslo, molleja e hígado) se llevó a cabo por cromatografía de gases, considerando el efecto del nivel creciente de HICH en la dieta.

Para los análisis, la yema y los tejidos fueron secados en una liofilizadora, se pulverizaron, luego los lípidos se extrajeron según el método modificado de Blygh y Dyer (1959) y fueron derivatizados (Knapp, 1979). El análisis de los lípidos se hizo mediante el empleo de un cromatógrafo de gases acoplado a un detector de másico, con columna capilar de sílice fundida. Se empleo helio como gas acarreador. Para identificar a los ácidos grasos eludidos se compararon con los tiempos de retención de estándares. Para tal fin se utilizaron los siguientes estándares:

Palmítico, Esteárico, Palmitoléico, Oléico, Linoléico y Linolénico. Los resultados se interpretaron en forma porcentual.

Se determinó el colesterol en la yema de huevo utilizando el mismo cromatógrafo, equipado con una columna capilar. La identificación del colesterol se llevó a cabo con el tiempo de retención del pico del estándar correspondiente analizado bajo las mismas condiciones. Los resultados se interpretaron calculando las áreas a los picos registrados.

Métodos estadísticos

A los resultados obtenidos del contenido de AGPI del aceite de chía se les calculó el promedio y la desviación estándar (Montgomery, 2010). Las variables: peso de las aves, porcentaje de postura y peso del huevo, contenido en ácidos grasos en la yema, y en los tejidos muestreados, se les calculó la media y su desviación estándar. También se analizaron mediante un análisis de varianza para un diseño totalmente al azar y las medias se compararon mediante el método de Duncan (Montgomery, 2010).

Resultados

Al igual que con la Metodología, se presentarán solo los resultados importantes, para facilitar la comprensión de la información.

Diagnóstico del potencial productivo de la Chía.

Actualmente la superficie sembrada de chía en México es de 6,238 has, distribuidas principalmente en los estados de Michoacán, Puebla, Querétaro, Zacatecas y Jalisco, con una producción de 4771 tons y un valor de producción de aproximadamente 273 millones de pesos (SIAP, 2021; Ramírez *et al.*, 2022). Las estadísticas de producción se pueden considerar bajas para abastecer un mercado potencial muy grande para la alimentación humana y animal. Para ejemplificar este caso, en el año 2021, se produjeron en México 18'536,000 tons de alimento balanceado para aves de engorda y de postura (CONAFAB, 2021). Asumiendo que a la mitad de esa producción se le añadiera el 0.5% de aceite de chía, se requerirían 46,340 tons de anuales de aceite. De chía en semilla se requeriría más de lo doble.

El estudio detectó 2'512,359 ha con potencial alto; la superficie de potencial mediano fueron 3'659,089 ha (Tabla 2). Las de potencial alto en México se distribuyen principalmente en los estados del Pacífico al

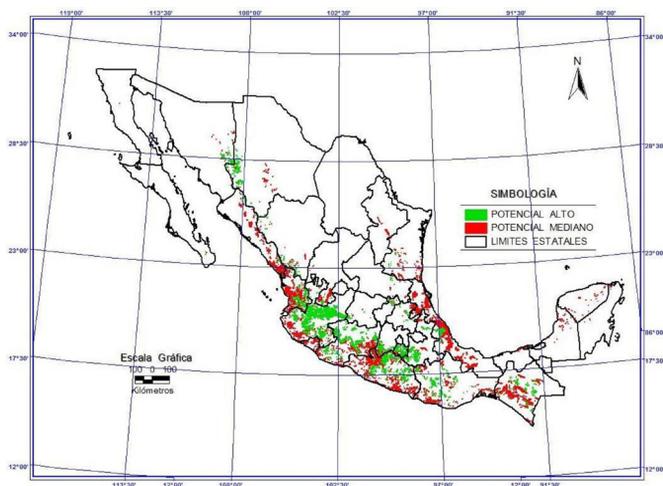
sur de Sinaloa; existen algunas áreas importantes en la región Centro como son Estado de México, Morelos, Puebla y en la región del Golfo de México, en Veracruz.

Tabla 2. Superficies por Estado con el Mayor Potencial para el Cultivo de Chía de Temporal en la República Mexicana

Estado	Potencial Óptimo.	Potencial Subóptimo	Total
Jalisco	502,471	256,066	758,537
Michoacán	251,236	329,228	580,464
Morelos	200,988	109,742	310,730
Nayarit	125,617	365,809	491,426
Estado de México	125,600	109,742	235,342
Puebla	125,002	73,161	198,163
Veracruz	125,000	731,627	856,627
Guerrero	150,741	292,647	443,388
Chiapas	100,494	256,066	356,560

El enorme potencial para producir chía en México contrasta con la pequeñísima superficie que se cultiva actualmente. En la Gráfica 1 se presenta la misma información de manera mas objetiva para apreciar las zonas potencial óptimo (Alto) y subóptimo (Mediano).

Gráfica 1. Distribución de las Zonas Potenciales para el Cultivo de Chía en México



Los terrenos clasificados no aptos, pueden adaptarse al cultivo, en caso de que mejoren el manejo orientado a superar las limitaciones a la producción que impongan algunos factores ambientales.

En Yucatán se identificaron zonas pequeñas. Los municipios donde se ubicaron fueron:

- Oriente: Calotmul, Valladolid, Temozón, Chemax y Tizimín.
- Sur: Tzucacab y Peto.
- Centro-sur: Oxkutzcab, Muna y Santa Elena
- Centro: Suma, Tinum y Sudzal

El empleo del software Arc/View versión 3.3., sirve para detectar áreas de cultivo de temporal y no detecta el efecto que puede tener el riego. En este caso, es posible que áreas diagnosticadas con potencial subóptimo, al regarse, puedan considerarse óptimas. De la misma manera el programa tiene una resolución de 360x360 m, lo cual significa que identifica superficies de 12.96 ha. Con esta premisa, es posible que existan superficies de terreno más pequeñas que la cartografía no las detecte. Finalmente, el resultado obtenido no identifica cuerpos de agua o áreas con problemas de fases químicas conforme a los mapas del INEGI (1974) a escala 1:1'000,000. Por lo tanto, es factible que el área considerada con cierto potencial esté sobreestimada.

Calidad nutrimental del aceite de chía

En La Tabla 3 se aprecia la calidad nutrimental del aceite. Para ambos tratamientos (con o sin horno de microondas) el ácido linoléico (18:2 ω 6) y el ácido linolénico (18:3 ω 3) son los más abundantes. Comparando los dos tratamientos se observa que el ácido linoléico se encuentra en mayor proporción en la chía tratada (\approx 21% vs \approx 19%) pero tienen menor porcentaje del ácido linolénico (\approx 59% vs \approx 65%). Esta composición es similar a la reportada por Ayerza (2011), quién trabajó con muestras de Ecuador y Argentina.

Tabla 3. Contenido de Ácidos Grasos en Muestras de Chía Sometidas a Extracción del Aceite con o sin Uso de Horno de Microondas

Muestras	Ácido graso (% de la grasa) *				
	16	18:00	18:1 ω 9	18:2 ω 6	18:3 ω 3
Tratada con horno de microondas.	7.8a	2.4 a	9.3a	21.6 a	58.9 a
Desv. Est.	0.5	0.7	0.5	0.2	1.2
Testigo sin tratamiento	7.1b	2.1a	6.3c	19.4c	65.2c
Desv. Est.	0.3	0.2	0.3	0.1	0.9

Letras diferentes en la misma columna indica *a-b= P<0.05; a-c=P<0.01

El empleo del horno de microondas permitió extraer más ácidos grasos, excepto para el 18:3 ω 3. Es importante observar que la suma de los porcentajes de ácidos linoléico y linolénico alcanza casi un 80%. Este resultado es mucho mayor que el observado en otros aceites como los de algodón, soya, Maíz o girasol, que tiene entre 55% y 65%. Los abundantes AGPI pueden atravesar el oviducto y enriquecer la yema de huevo. Mediante el suministro de chía a gallinas de postura, se ha podido incrementar el contenido de AGPI y de esta manera mejorar su valor nutricio para los consumidores (Coorey *et al.*, 2015).

Incorporación de la chía en alimentos para aves

La composición proximal de la HICH fue la siguiente: 22.6% de proteína cruda, 25.2% extracto etéreo, 39.8% de fibra cruda, 4.9% materia mineral y 7.5% extracto libre de nitrógeno. El contenido en extracto etéreo es elevado y similar al observado en las semillas oleaginosas. Al incluir la HICH en los alimentos balanceados, en todos los casos como era de esperarse, propició un incremento en el contenido de extracto etéreo, así como en fibra cruda por su elevado porcentaje en la HICH (Vázquez *et al.*, 2009).

Experimento en Gallinas de Postura

La conversión alimenticia observada fue la siguiente: $1.94^a \pm 0.28$, $1.64^b \pm 0.23$ y $1.72^b \pm 0.31$, para los tratamientos Testigo, 7.5% de HICH y 15% de HICH respectivamente. La inclusión de HICH en el alimento, propició una mejor conversión alimenticia en las aves. El resultado de la evolución del peso de las gallinas y de su productividad se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Peso de las gallinas de postura, porcentaje de postura y peso del huevo en función del porcentaje de inclusión de Harina Integral de Chía (HICH) (Media \pm desviación estándar).

Nivel de incorporación de Chía	Etapa experimental		Productividad	
	Peso Inicial	Peso Final	Porcentaje de postura	Peso del huevo
Testigo (0%)	1.35a \pm 0.04	1.39a \pm 0.09	84.3a \pm 0.21	61.9a \pm 0.69
7.5% de HICH	1.33a \pm 0.02	1.29a \pm 0.10	81.7b \pm 0.37	63.0a \pm 0.98
15% de HICH	1.33a \pm 0.03	1.21c \pm 0.11	80.7b \pm 0.54	65.3c \pm 1.10

*Letras diferentes en la misma columna indica a-b= p<0.05; a-c= p<0.01

El porcentaje de postura disminuyó en relación con el grupo Testigo por efecto de la adición de HICH en la dieta (p<0.05). Otros autores han encontrado que el porcentaje de postura no se modificó por la inclusión de la chía entera hasta un 28% (Ayerza y Coates, 2002), No obstante, la disminución en la postura, el peso del huevo se incrementó (p<0.01) en los grupos con HICH, resultando en una productividad similar de huevo entre los tres lotes experimentales (p>0.05).

La composición en ácidos grasos de la yema de huevo se muestra en la Tabla 5.

TABLA 5. PPorcentaje de Ácidos Grasos de la Yema de Huevo de Gallinas de Postura Alimentadas con Harina Integral de Chía (HICH) (Media \pm Desviación Estándar) *

Nivel de incorporación de Chía	Porcentaje de ácidos grasos					
	C16:0	C18:0	C16:1	C18:1	C18:2	C18:3
Testigo (0%)	40.8 ^a \pm 2.9	9.6 ^a \pm 3.6	3.3 ^a \pm 1.0	30.8 ^a \pm 3.0	15.2 ^a \pm 3.7	0
7.50%	38.1 ^{ab} \pm 2.3	10.6 ^a \pm 1.9	3.2 ^a \pm 1.1	30.7 ^a \pm 2.9	15.4 ^a \pm 1.7	1.9 ^a \pm 1.1
15%	35.9 ^b \pm 2.0	9.9 ^a \pm 2.7	3.6 ^a \pm 1.0	29.3 ^a \pm 2.7	16.9 ^a \pm 1.6	4.4 ^a \pm 1.8

*Letras diferentes en la misma fila indican (p<0.05).

Al incrementar la chía en el alimento, disminuyó el porcentaje de ácido palmítico. El resultado fue inverso para el C18:3 ω 3 ya que se incrementó al pasar de ser indetectable hasta representar un 4.4%.

La reducción en el porcentaje de ácido palmítico en la yema del huevo y el enriquecimiento en ácido ω 3 representa una ventaja para la salud de los consumidores, ya que la ingesta de este tipo de alimentos reduce el riesgo asociado con enfermedades cardiocoronarias (American Heart Association, 1999; Vuksan, *et al*, 2007). Resultados similares fueron reportados previamente (Ayerza y Coates, 1999; Ayerza y Coates, 2000) incorporando niveles de chía entera de un 30% en el alimento de aves de postura. El contenido de colesterol en la yema de huevo no se vio afectado por los tratamientos.

Pollos de engorda

La Tabla 6 da cuenta de los resultados de la productividad de los pollos. La incorporación de HICH tuvo un doble efecto, no afectó el peso final de las aves, pero sí mejoró la conversión alimenticia. Este resultado benéfico redundaba en una mayor eficiencia de los pollos alimentados con HICH.

Tabla 6. Peso final y conversión alimenticia de pollos de engorda alimentados con Harina Integral de Chía (HICH) (Media \pm desviación estándar)

	Porcentaje de incorporación de HICH		
	Testigo (%)	5.00%	10.00%
Peso final (Kg)	1.909a \pm 0.31	2.204a \pm 0.21	2.10a \pm 0.38
Conversión alimenticia	1.94a \pm 0.28	1.64b \pm 0.23	1.72b \pm 0.31

***Letras diferentes en filas indican ($p < 0.05$).**

Los resultados del contenido en ácidos grasos de los tejidos de los pollos de engorda se encuentran en la Tabla 7. Se ponen todos los resultados obtenidos por considerarse una referencia para otros trabajos en la misma línea de pensamiento.

Tabla 7. Porcentaje De Ácidos Grasos En Tejidos

Tejido y nivel de chia	Porcentaje de ácidos grasos						
	C16:0	C18:0	C16:1	C18:1	C18:2	C18:3	
Piel							
Testigo 0%	34.2a ± 3.5	9.5a ± 2.0	3.5a ± 1.8	32.8a ± 3.6	19.4a ± 4.1	1.2a ± 1.0	
5%	33.7ab ± 4.6	7.6a ± 3.1	6.2a ± 1.9	27.9a ± 3.6	22.5b ± 2.8	2.7b ± 1.9	
10%	27.5b ± 2.3	9.8a ± 1.6	5.2a ± 1.3	29.1a ± 4.1	23.4b ± 2.9	4.9c ± 0.6	
Pechuga							
Testigo 0%	28.4a ± 4.6	15.3a ± 4.0	5.3a ± 1.4	36.1a ± 4.9	14.0a ± 2.6	2.0a ± 1.3	
5%	25.4ab ± 3.3	14.9a ± 4.1	5.5a ± 1.6	35.9a ± 4.3	15.1b ± 3.2	4.6ab ± 2.5	
10%	19.1b ± 4.1	13.1a ± 3.9	5.2a ± 2.4	34.3b ± 3.9	19.1b ± 3.5	8.5b ± 2.2	
Muslo							
Testigo 0%	36.2a ± 2.9	9.2a ± 3.9	3.8a ± 1.9	27.3a ± 2.5	20.6 ^a ± 4.4	3.4a ± 0.5	
5%	27.3b ± 3.9	9.1a ± 2.9	5.6a ± 1.0	33.1b ± 2.7	21.3a ± 2.2	4.5ab ± 1.1	
10%	24.2b ± 3.3	10.6a ± 4.21	4.9a ± 1.0	29.9ab ± 3.1	22.2a ± 4.4	7.9b ± 2.3	
Molleja							
Testigo 0%	33.0a ± 3.5	9.4a ± 2.6	3.9a ± 0.8	30.9b ± 4.3	19.2a ± 2.7	3.9a ± 0.7	
5%	30.1ab ± 3.4	7.8a ± 3.9	4.6a ± 2.1	35.1a ± 3.5	19.5a ± 2.7	4.2ab ± 0.8	
10%	25.7b ± 2.8	10.9a ± 2.7	5.6a ± 2.9	28.4b ± 3.3	22.7b ± 3.5	6.2b ± 1.2	
Hígado							
Testigo 0%	37.1a ± 3.5	14.1a ± 3.7	3.2a ± 1.5	28.4b ± 3.6	16.1a ± 2.6	1.5a ± 0.6	
5%	28.8b ± 2.3	16.8a ± 0.6	4.2a ± 0.6	30.5a ± 2.6	18.4ab ± 1.8	1.6a ± 0.2	
10%	26.9b ± 2.7	16.7a ± 3.9	3.3a ± 1.3	24.6b ± 3.0	22.2b ± 2.2	5.9b ± 1.1	

El ácido palmítico se redujo en todos los tejidos ($p < 0.05$) a medida que se incrementó el porcentaje de HICH en el alimento; en cambio el ácido esteárico no se afectó. La misma reducción en ácido palmítico en los tejidos de las aves utilizadas en este experimento, fue reportada anteriormente (Ayerza *et al.* 2002) en la carne blanca de pollos de engorda alimentados con un 10% de chía en el alimento. El ácido palmítico se considera uno de los más hipercolesterolémicos (Bonanome y Grundy, 1988). Otros autores empleando un 10% de semilla de lino como fuente de AGPI para la alimentación de pollos de engorda, también observaron una reducción en el contenido de ácidos saturados en la grasa de las aves (Crespo y García, 2002).

No se encontraron diferencias en el porcentaje de ácido palmitoléico. En cuanto al ácido oléico, la respuesta observada fue muy variable, ya que se incrementó en el muslo, molleja e hígado.

El ácido linoléico mostró incremento en casi todos los tejidos. En cambio, el ácido linolénico se incrementó en todos los tejidos, sobre todo cuando se incorporó un 10% de HICH en la dieta ($p < 0.05$). Este incremento en el ácido linolénico también ha sido observado por otros autores (Ayerza *et al.* 2002).

Las aves, a diferencia de los rumiantes, depositan en sus tejidos los AGPI sin cambio alguno, siempre y cuando no serán utilizados como fuente de energía inmediata. En cambio, los rumiantes por medio de su microflora ruminal saturan en el rumen aquellos ácidos grasos insaturados y de esta forma saturada, los depositan en sus tejidos.

Otra vía que afecta la composición de la grasa es la de antioxidantes, ya que cuando se administran en dietas para pollos abundantes en aceites vegetales, propician una disminución en el depósito de ácidos grasos saturados en los tejidos (Ajuyah *et al.* 1993). La Chía contiene Quercitina y Kaempferol (Reyes-Caudillo *et al.* 2008), además de ácido Clorogénico, ácido Caféico y flavonoles (Taga *et al.* 1984), antioxidantes naturales que cumplen con la función descrita. Por lo tanto, esta es una segunda posible vía como la HICH pudiera participar en la reducción de los ácidos grasos saturados en los productos de las aves.

En la necropsia de las aves del grupo Testigo se observó en el hígado cierta fragilidad a la compresión y ligera hepatomegalia por congestiónamiento graso, lo cual es ocasionado por efectos nutrimentales (Baez, 1994). En cambio, el hígado de las aves experimentales no mostró alteraciones.

Los análisis histopatológicos del páncreas y riñón de todas las aves se encontraron histológicamente normales. En cambio, en el hígado de las aves del grupo Testigo presentaron congestión en los hepatocitos con vacuolas en el citoplasma, habiéndose diagnosticado infiltración hidrópica y grasa difusa. Un ave del grupo con 5% de HICH también mostró los mismos resultados histopatológicos.

Es importante recalcar que, en los experimentos llevados a cabo con las aves, se observó una mejoría en la utilización del alimento por parte de las aves que recibieron la HICH. Esto sin duda representa un beneficio adicional por el empleo de esta semilla. Así mismo, de igual importancia es el hecho que el nivel de colesterol del huevo no se vio afectado por el empleo de HICH.

El aumento en AGPI va a conferirle a los productos avícolas la característica de nutraceuticos; o sea que aportan un beneficio demostrado para la salud humana (Mataiz, 2009), Indudablemente que esto redundaría en un incremento en el precio de venta.

Conclusiones

Se localizaron las zonas óptimas para el cultivo de chíá de temporal, siendo estas, los estados que se encuentran al sur de Sinaloa en la vertiente del Pacífico. En el Golfo de México solo se identificó al estado de Veracruz. En el centro del país, Puebla, Morelos y el estado de México son propicios para la siembra de la chíá. En el estado de Yucatán se localizaron pequeñas zonas en el sureste y suroeste colindando con Campeche y Quintana Roo, así como algunos manchones en el centro.

El aceite obtenido de la chíá adquirida en el estado de Chiapas tiene la misma calidad nutrimental que la encontrada en chíá estudiada por otros autores y reportados en la literatura especializada. Tiene una elevada cantidad de AGPI, lo cual le confiere una mejor calidad nutrimental comparado con aceites de reconocida calidad como los de soya y maíz.

Finalmente, es factible incorporar 15% de harina integral de chíá en la alimentación de aves de postura y un 10% en la dieta de pollos de engorda ya que propician un enriquecimiento en AGPI en la yema de huevo, como en los tejidos corporales del pollo de engorda, especialmente en ácido α -linolénico ($\omega 3$), en detrimento del ácido palmítico. El nivel de incorporación de chíá fue limitado por los protocolos experimentales de estos ensayos y es posible que alcancen niveles mayores. Al poner en el mercado este tipo de productos es factible que incrementen su valor financiero, en función de su aumento en el valor nutricio.

Agradecimientos

Los autores reconocen el trabajo de Mayday Ine Salazar-Vega por su activa participación.

Bibliografía

- Álvarez CL, Valdivia LM, Aburto JM, Tecante A. (2008). Chemical characterization of the lipid fraction of Mexican Chia seeds (*Salvia hispanica* L.). *Journal. Food Proprieties*. 11(3),687-697.
- Ajuyah A, Hardin R, Sim J. (1993). Effect of dietary full fat flaxseed with and without antioxidant on the fatty acid composition of major lipid classes of chicken meats. *Poultry Science*.72,125-136.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemists (1997) *Official Methods of Analysis*. 20th Ed. Washington, DC. USA.
- Ayerza, R. (2011). The seed's oil content and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica* L.) var. Iztac 1, grown under six tropical ecosystems conditions. *Interciencia*, 36 (8), 620-624.
- Ayerza R, Coates W. (1999). An ω -3 fatty acid enriched chia diet: its influence on egg fatty acid composition, cholesterol and oil content. *Canadian Journal of Animal Science*. 79,53-58.
- Ayerza R, Coates W. (2000). Dietary levels of chia: influence on yolk cholesterol, lipid content and fatty acid composition, for two strains of hens. *Poultry Science*. 79(5):724-739.
- Ayerza R, Coates W. (2002) Dietary levels of chia: influence on hen weight, egg production, and egg sensory quality. *British Poultry Science* 43:283-290.
- Ayerza R, Coates W, Lauria M (2002) Chia seed (*Salvia hispánica* L) as an omega-3 fatty acid source for broilers; influence on fatty acid composition, cholesterol and fat content of white and dark meat, growth performance and sensory characteristics. *Poultry Science*. 81(6):826-37.
- Ayerza R, Coates W. (2007). Effect of dietary alpha-linolenic fatty acid derived from chía when fed as ground seed, whole seed and oil on lipid content and fatty acid composition of rat plasma. *Annals of Nutrition and Metabolism*. 51: 27-34.
- Ayerza R. Wayne C. (2006). *Redescubriendo un alimento olvidado de los aztecas chía*. Buenos Aires, Argentina. Ed. Nuevo Extremo
- American Heart Association. (1999). Homocysteine, folic acid and cardiovascular disease. [Cited 2007 may 21] [about 5 p.]. Available in:

http://www.americanheart.org/Heart_and_Stroke_A_Z_Guide/homocys.Html

- Báez J. (1994). *Patología de Aves*. 1ª ed. Ed. Trillas. México, DF. México.
- Beltrán OM, Romero M. (2003.) La chía alimento milenario. *Industria Alimentaria*. 2003; Sept- oct. [cited 2007 Julio 18] [about 7 p.]. Available in: <http://www/alfa-editores.com/historico/alimentaria/sept20oct%20203%IA%20la%20chia%20alimento%20milenario.pdf>
- Blight EG, Dyer WJ. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*. 36:911-912.
- Bonanome A, Grundy SM (1988) Effect of dietary stearic acid on plasma cholesterol and lipoprotein levels. *New England Journal of Medicine*. 318(19):1244-1248.
- Ciau, SA. (2007). Caracterización fisicoquímica del aceite y la goma obtenidas de las semillas de chía (*Salvia hispánica* L.). Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Química, UADY.
- CONABO. (2024). Consultado en línea el 25/04/2024. EN: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAFAB. (2021). Consejo Nacional de Fabricantes de Alimentos Balanceados y de la Nutrición Animal. *La Industria Alimentaria Animal de México*. <https://conafab.org/old/informativos/anuario-estadistico>
- Crespo N, García E. (2002). Nutrient and fatty acid deposition in broilers fed different fatty acid profiles. *Poultry Science*. 81:1533-42.
- Cundiff DK, Lanou AJ, Nigg CR. (2007). Relation of omega-3 fatty acid intake to other dietary factors known to reduce coronary heart disease risk. *American Journal of Cardiology*. 99(9):1230-1233.
- Coorey R, Novinda A, Williams H, Jayasena V. (2015). Omega-3 Fatty Acid Profile of Eggs from Laying Hens Fed Diets Supplemented with Chia, Fish Oil, and Flaxseed. *Journal of Food Science* 80, (1), S187. DOI: 10.1111/1750-3841.12735
- De Logeril M, Salen P. (2007). Mediterranean diet and n-3 fatty acids in the prevention and treatment of cardiovascular disease. *Journal of Cardiovascular Medicine*. 8(Supl.1):S38-41.
- E.S.R.I. (1996). (Environmental Systems Research Institute). *Automation of Map Generalization*. The Cutting-Edge Technology. ESRI. USA.
- García E. (1988). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, UNAM. México, D. F.

- INIFAP. (1993). Determinación del Potencial Productivo de Especies Vegetales por Distrito de Desarrollo Rural en Yucatán, SARH – INIFAP. Mérida, Yuc.
- INTA. (2012). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Chía, una alternativa productiva en auge. República Argentina, [en línea]. Disponible en: <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=11751>. 2 de Julio de 2012. [2012, 14 de septiembre].
- Leaf A. (2007). Prevention on sudden cardiac death by n-3 polyunsaturated fatty acids. *Journal Cardiovascular Medecin*. 8(Supl. 1):S27-9.
- López DN, Galante M, Raimundo G, Spelzini D, Boeris V. 2019. Functional properties of amaranth, quinoa and chia proteins and the biological activities of their hydrolyzates. *Food Research International*. 116,419-429. doi: 10.1016/j.foodres.2018.08.056. Epub 2018 Aug 23.
- Marshall AC, Kubena KS, Hinton KR, Hargis PS, Van Elswyk ME. (1994). N-3 fatty acid enriched table eggs: a survey of consumer acceptability. *Poultry Science*. 73:1334-1340.
- Mataix VJ. (2009). *Nutrición y Alimentación Humana*. 2ª edición. Ed. Ergon. Barcelona, España.
- Mattson PC. (2007). *Fisiopatología, Salud enfermedad. Un enfoque conceptual*. Ed. Médica Panamericana. 7ª edición. Madrid, España.
- Montgomery CD. (2010). *Diseño y analisis de experimentos*. Editorial Limusa Wiley. Segunda edición. pp 21 – 54
- Ramírez, G. (1995). Áreas con Potencial para el Cultivo de Palma Aceitera en Campeche. INIFAP – Campo Experimental Edzná. Publicación especial.
- Ramírez JG, Castellanos RA, Ramírez SJH, Lozano CMG. (2022). Productive Potential of *Vigna unguiculata* L. under Mexican Rainfed Conditions. *Open Access Library J*. Vol.9, e9564.
- Ramírez JG, Góngora GS, Pérez ML, Chel GL, González ET, Tun SJ, Escalante RE, Ledón VJ, Castillo AJ. (2006). Estudio Estratégico de la Cadena Agroindustrial Chile Habanero. CD interactivo. INIFAP - ENPRODAY. Campo Experimental Mocochoá., Yucatán.
- Reyes-Caudillo E, Tecante A, Valdivia-López MA. (2008). Dietary fiber content and antioxidant activity of phenolic compounds present in Mexican Chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Food Chemistry*. 107(2):656-663.
- Rosado-Rubio G, Betancur-Ancona D, Chel-Guerrero L, Ixtaina, VY, Tomás MC, Nolasco SM. (2012). Efecto del pretratamiento de semillas de chía con microondas (MW) sobre el rendimiento y

la composición del aceite extraído. V Congreso Internacional de Ciencia y tecnología de los Alimentos, 2012. 14-16 de noviembre. Córdoba, Argentina.

Ruíz C, Medina JA, G., González, IJ, Ortiz C, Flores HE, Martínez RA. Byerly KF. (1999). Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México México. 362 p.

Salazar VM, Rosado RJG, Chel GLA, Betancur ADA, Castellanos RAF. (2010). Composición en ácido graso alfa linolénico ($\omega 3$) en huevo y carne de aves empleando chia (*Salvia hispánica* L.) en el alimento. En: Utilización de recursos naturales tropicales para el desarrollo de alimentos. Betancur ADA, Chel GLA y Castellanos RAF, Eds. Universidad Autónoma de Yucatán. ISBN 978-607-7573-77-7. 260-271

SIAP-SADER. (2021). (Sistema de Información Agropecuaria). Documento de Consulta. Cd. De México.

Taga MS, Miller EE, Pratt DE. (1984). Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants. *J. of American Oil Chemistry Society*. 61(5):928-931.

Valenzuela ZF, Segura CMR. 2022. Amaranth, quinoa and chia bioactive peptides: a comprehensive review on three ancient grains and their potential role in management and prevention of Type 2 diabetes. *Crit Rev Food Science and Nutrition* 62(10):2707-2721. doi: 10.1080/10408398.2020.1857683.

Vázquez OA, Rosado RJG, Chel GLA, Betancur A D (2009). Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia. (*Salvia hispánica* L). *Food Science and Technology*. 42:168-173.

Vuksan V, Whitham D, Sievenpiper J L, Jenkins AL, Rogovik, L, Bazinet R. P, Vidgen, E, Hanna A. (2007). Supplementation of Conventional Therapy with the novel grain salba (*Salvia hispanica* L.) improves major and emerging cardiovascular risk factors In Type 2 Diabetes: Results Of A Randomized Controlled Trial. *Diabetes Care*.30(11), 2804-2810.

Yau JC, Denton JH, Bailey CA, Sams AR. (1991). Customizing the fatty acid content of broiler tissues. *Poultry Science*. 70:167-172.

La presente obra *Experiencias del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos en el sector agroalimentario*, es la culminación de diversos esfuerzos entre El Colegio del Estado de Hidalgo (CEH), la Red de Atención al Sector Agroalimentario (RASA) y el Nodo Hidalgo de la RASA (primer esfuerzo nacional).

Los capítulos que fueron incluidos previa dictaminación exhaustiva, visibilizan la disímil incidencia existente desde el sur hasta el norte de México, por parte de profesores/profesoras, especialistas y estudiantes de posgrado, todos ellos preocupados y ocupados por la realidad que vive el sector agroalimentario de nuestro país. Es así que se plantean perspectivas desde la ciencia básica, transferencia tecnológica, problemáticas regionales y mejoramiento de distintas variedades de cultivos importantes para la alimentación.

Así pues, la presente obra suma y demuestra la virtuosidad existente entre la ciencias básicas y las ciencias sociales. Ojalá que la obra sea del interés del sector académico, estudiantes, productores y público en general.

Dr. Edgar Iván Roldán Cruz