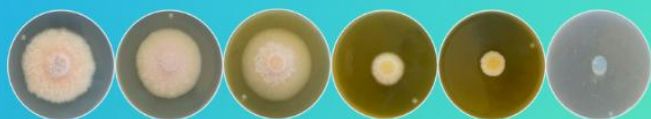


Leandris Argentel-Martínez
Ofelda Peñuelas-Rubio
Jaime Garatuza-Payán
Editores

Investigaciones Biológicas, Agrícolas y Ambientales de México

Volumen II



Pantanal Editora

2025

Leandris Argente!-Martínez
Ofelda Peñuelas-Rubio
Jaime Garatuza-Payán
Editores

**Investigaciones Biológicas, Agrícolas
y Ambientales de México**
Volumen II



Pantanal Editora

2025

Copyright© Pantanal Editora

Editor Jefe: Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Ejecutivos: Dr. Jorge González Aguilera y Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diseño: El editor. **Diseño y arte:** el editor. Imágenes de portada y contraportada: Canva.com. **Reseña:** Autor(es), organizador(es) y editor.

Consejo editorial

Grado académico y nombre

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Profa. MSc. Adriana Flávia Neu
Profa. Dra. Albys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Profa. MSc. Aris Verdecia Peña
Profa. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Profa. Dra. Denise Silva Nogueira
Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Prof. Dr. Luciano Façanha Marques
Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez
Profa. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Profa. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Profa. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Profa. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Profa. Dra. Patrícia Maurer
Profa. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Profa. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
Prof. Dr. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Ugur Azizoglu
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Profa. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Institución

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Rede Municipal de Niterói (RJ)
UNMSM (Peru)
UFMT
SED Mato Grosso do Sul
UEMA
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
Sec. Mun. de Educação, Cultura e Tecnologia de Araripe
Universidade Kayseri, Türkiye
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Consejo Científico Técnico
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior
- Esp. Maurício Amormino Júnior
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Hoja de catálogo

Catalogación en la publicación
Elaborada por Bibliotecaria Janaina Ramos – CRB-8/9166

I62

Investigaciones biológicas, agrícolas y ambientales de México - Volumen II / Organização de Leandris Argente-Martínez, Ofelda Peñuelas-Rubio, Jaime Garatuza-Payán. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2025. 250p. ; il.

Libro en PDF

ISBN 978-65-85756-56-3

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756563>

1. Ciencia. 2. Innovación tecnológica. I. Argente-Martínez, Leandris (Organizador). II. Peñuelas-Rubio, Ofelda (Organizador). III. Garatuza-Payán, Jaime (Organizador). IV. Título.

CDD 500

Índice para catálogo sistemático

I. Ciencia



Nuestros libros electrónicos son gratuitos y se permite el acceso público, la descarga y el intercambio, pero solicitamos que se dé el debido crédito a Pantanal Editora y también a los organizadores y autores. Sin embargo, no se permite el uso de libros electrónicos con fines comerciales, salvo autorización expresa de los autores y acuerdo de Pantanal Editora.

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

Prólogo

El presente libro se titula: “**Investigaciones Biológicas, Agrícolas y Ambientales de México, Volumen II**”. Ha sido conformado por un grupo de estudios experimentales y de extensión, enfocados la generación de nuevos conocimientos.

El libro está conformado por tres sesiones. La primera: “**Investigaciones biológicas**” agrupa trabajos con microorganismos promotores del desarrollo, estudio de potencial antifúngico y antagonistas de microorganismos y extractos vegetales. La segunda sesión: **Investigaciones agrícolas**” aglutina el quehacer científico para la producción de hortalizas y cereales, principalmente en condiciones experimentales de campo abierto. Estas investigaciones contribuyen a la seguridad y soberanía alimentaria nacional y a la mitigación de impactos de condiciones edafoclimáticas estresantes. La tercera sección “**Investigaciones ambientales**” confirma la importancia de cereales adaptables a condiciones climáticas desfavorables. Además otro de los trabajos aborda del uso de los manglares para la funcionalidad y estabilidad de ecosistemas costeros. En esta sección también se presenta una contribución que enfatiza en la importancia de la actividad fúngica en el saneamiento de suelos ante la presencia de metales pesados.

Se agradece a todos los autores de los respectivos capítulos, en su mayoría investigadores nacionales de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (**SECIHTI**) adscritos a diferentes centros de Educación Superior de los Estados Unidos Mexicanos. Gracias a su quehacer científico generan productos que, en medios como este, amplían las capacidades y posibilidades de acceso universal al conocimiento. Un reconocimiento especial a los miembros del Cuerpo Académico Consolidado **ITVAYA-CA-3, del Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Yaqui**, por su contribución a las tres secciones aquí agrupadas.

Los autores

Resumen

Prólogo.....	4
Ciencias biológicas	7
Capítulo 1.....	8
Uso de microorganismos promotores del desarrollo del maíz (DK-4050) bajo régimen de riego deficitario controlado	8
Capítulo 2.....	20
Caracterización fitoquímica preliminar y actividad antifúngica <i>in vitro</i> de <i>Parkinsonia aculeata</i> sobre <i>Fusarium</i> del maíz	20
Capítulo 3.....	28
Efectos de <i>Enterobacter cloacae</i> y <i>Priestia megaterium</i> en la absorción de agua y germinación de de frijol	28
Capítulo 4.....	40
Caracterización Biofísica de autohidrolizados de calamar gigante (<i>Dosidicus gigas</i>) mediante dispersión de rayos X de ángulo pequeño.....	40
Capítulo 5.....	49
Evaluación de la calidad de yogur con pitaya (<i>Stenocereus thurberi</i>) elaborado con una combinación de lactobacilos	49
Capítulo 6.....	61
Extracto del wereke (<i>Ibervillea sonora</i>) como antagonista de <i>Fusarium</i> spp	61
Ciencias agrícolas	73
Capítulo 7.....	74
Optimización del cultivo de trigo cristalino mediante el uso de enmiendas (yeso agrícola) para mejorar la calidad del grano	74
Capítulo 8.....	81
Índices de vegetación derivados de imágenes digitales para el análisis de la fenología y el desarrollo del cultivo de trigo	81
Capítulo 9.....	87
Efecto de diferentes estrategias de fertilización orgánica en el crecimiento de plántulas de Chile Piquín (<i>Capsicum annuum</i> var. <i>aviculare</i>) bajo condiciones protegidas	87
Capítulo 10	97
Evaluación de híbridos de maíz cultivados en suelo en condiciones de salinidad	97
Capítulo 11	107
Efectos del QuitoMax® en la germinación de plántulas de tomate de las variedades Amalia y Claudia en condiciones semicontroladas	107
Capítulo 12	122
Tratamiento a la semilla de maíz y su efecto en la calidad fisiológica en dos condiciones de almacenamiento	122
Capítulo 13	133

Aceites esenciales y caldos minerales como tratamieto pregerminativo en semilla de maíz	133
Capítulo 14	144
Productividad de melón Zacapa con diferentes densidades de siembra en Michoacán.....	144
Ciencias ambientales	156
Capítulo 15	157
Triticale: una opción sustentable para forraje bajo condiciones agroecológicas en el sur de Sonora	157
Capítulo 16	162
Caracterización ambiental multi-hábitat de islas artificiales, para la gestión de sitios de anidación de aves acuáticas en Bahía del Tóbari, Sonora, México	162
Capítulo 17	200
Importancia del aislamiento de hongos en suelos contaminados con metales pesados para biorremediación y biotecnología ambiental	200
Capítulo 18	219
Políticas desarticuladas sobre cuencas, manglares y pesca: impactos regionales y respuestas comunitarias desde El Topón, Pijijiapan, Chiapas.....	219
Índice	248
Editores.....	249

Ciencias biológicas



Uso de microorganismos promotores del desarrollo del maíz (DK-4050) bajo régimen de riego deficitario controlado

Recibido em: 18/04/2025

Aprobado em: 21/04/2025

 10.46420/9786585756563cap1

Leandris Argente-Martínez 

Ofelda Peñuelas-Rubio* 

Jacqueline Sierra Calderón 

Francisco Cervantes Ortíz 

Elsa Janet Sánchez Catalán 

Lorenzo Pérez-López 

Jaime Garatuz Payán 

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos representativos de México (Herrera et al., 2024). El rendimiento nacional de este cultivo es de 3.8 t ha⁻¹ (SIAP, 2022), sin embargo existen regiones agrícolas con rendimientos superiores a las 12 t ha⁻¹ mientras que en otras (Jaime-Vargas, 2024), principalmente con el cultivo de maíces nativos, se encuentra entre 2 y 6 t ha⁻¹ (Martínez-Díaz et al., 2025).

El principal aporte al rendimiento del maíz en México lo hace la fertilización química (Canizalez-Silva et al., 2024). Normalmente las aplicaciones de fertilizantes son altas en el maíz, principalmente en Sinaloa (Juárez et al., 2024).

El uso excesivo de fertilizantes atenta contra la microflora del suelo y afecta la salinidad en el extracto de saturación (Omuto et al., 2024). Los aportes de los microorganismos al suelo y a las plantas son significativos ya que la rizosfera alberga microorganismos benéficos que mejoran la productividad vegetal mediante el ciclo de nutrientes y la adaptación al estrés (Xu et al., 2025).

Estos microorganismos suelen presentar un potencial significativo como biofertilizantes en aplicaciones agrícolas (Galindo et al., 2022; Argente-Martínez et al., 2025). Además de su función como biofertilizantes, estos microorganismos son cruciales para procesos ecológicos como el reciclaje de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica y la mineralización (Zhou et al., 2024).

Múltiples especies vegetales semidesérticas albergan microorganismos rizosféricos que mejoran la adaptación a condiciones adversas, como la sequía, la salinidad y las altas temperaturas típicas de los ambientes semiáridos (Lian et al., 2024). *Parkinsonia aculeata* L., una especie de leguminosa nativa del sur

* Autor correspondiente: openuelas.rubio@itvy.edu.mx

de Estados Unidos y el noroeste de México, exhibe una notable adaptabilidad a condiciones adversas, probablemente facilitada por sus rizobacterias asociadas (Argentel-Martínez et al., 2024). Debido a su capacidad de prosperar en condiciones adversas, se han identificado numerosas bacterias con propiedades promotoras del crecimiento (Peñuelas-Rubio et al., 2024).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) se clasifican en varios grupos según sus mecanismos de promoción del crecimiento: biofertilizantes, bioestimulantes, agentes de biocontrol y agentes de biorremediación. Actualmente, las PGPR se consideran una herramienta prometedora para la agricultura sostenible, ya que permiten la gestión ecológica de una nutrición vegetal eficiente, a la vez que protegen la salud del suelo y el medio ambiente (Fadiji et al., 2023).

Teniendo en cuenta los escenarios actuales de cambio climático, la biotecnología del microbioma ha sido una alternativa clave y exitosa para la obtención de consorcios microbianos que promuevan el desempeño fisiológico, agronómico de las plantas y la productividad de los ecosistemas como el maíz (Devi et al., 2024).

La evaluación de los efectos de los microorganismos promotores del crecimiento en la fisiología vegetal es un primer paso fundamental para evaluar su posible contribución al rendimiento agronómico de los cultivos (Eshaghi et al., 2024). Estas evaluaciones, que involucran diversos materiales genéticos en diversas condiciones experimentales, facilitan la toma de decisiones rápidas, precisas y eficaces para su implementación y validación, basadas en correlaciones entre las respuestas fisiológicas y el rendimiento agronómico de los cultivos (Argentel-Martínez et al., 2021).

Además, la identificación de cepas microbianas con características multifuncionales permitirá el desarrollo de bioinoculantes robustos, allanando el camino para prácticas agrícolas sostenibles y resilientes al clima. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto un consorcio bacteriano dual compuesto por *Enterobacter cloacae* y *Priestia megaterium*, aisladas de la rizosfera del palo verde, en el intercambio de gases y la fenología del maíz (usando como modelo experimental el híbrido comercial DK-4050) aplicado a los 15 días posteriores a la emergencia. para determinar sus efectos sobre el intercambio de gases, la fenología y el rendimiento de biomasa.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en áreas de cultivo del instituto Tecnológico del Valle del Yaqui en un suelo vertisuelo de más de 35 años de explotación con el cultivo del trigo. En este sitio experimental se cuenta con riego por goteo.



Figura 1. Imágenes del diseño experimental y desarrollo inicial del híbrido de maíz DK-4050 (a), fotografía aérea del cultivo en la fenofase de V12 (b) y del sistema de riego deficitario controlado por goteo.

Condiciones edafoclimáticas ocurridas durante el desarrollo del cultivo

El cultivo se estableció el 17 de octubre de 2024 sobre un suelo vertisol a una humedad del suelo del 85%, a una profundidad de 8 cm sobre el cantero, logrando una cantidad de 11 semillas por metro lineal. Durante el ciclo de cultivo las temperaturas oscilaron entre 4 y 35 grados. Siendo los meses de noviembre y diciembre los de menores temperaturas máximas y mínimas. La humedad relativa se mantuvo entre los 50 -56%. La precipitación fue nula durante todo el ciclo experimental (Figura 2).

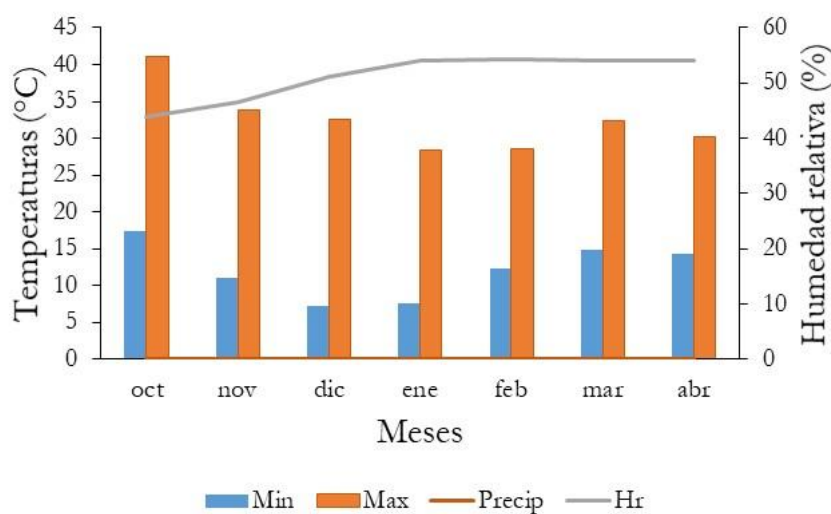


Figura 2. Variabilidad de las variables climáticas ocurridas en los meses de octubre de 2024 hasta abril de 2025. Min: temperatura mínima, Max: temperatura máxima, Precip: precipitación y Hr: humedad relativa.

Tratamientos establecidos y diseño experimental

Para la investigación se establecieron dos tratamientos: T1: tratamiento aplicando un consorcio bacteriano a los 15 días posteriores a la emergencia y T2: tratamiento control sin aplicación del consorcio. Los tratamientos fueron distribuidos siguiendo un diseño experimental completamente aleatorizado con tres repeticiones por tratamiento.

Variables evaluadas

Intercambio de gases del cultivo

Se determinó la actividad fotosintética máxima (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en las fenofases de V3; V6; V9; V12 y R2. Estas mediciones se realizaron con un sistema portátil de medición de fotosíntesis de tipo PP-System (Portable Photosynthetic System). Esta medición se realizó en la parte central de las tres hojas más expuestas a la luz solar, entre las 11:30 h y 13:00 h en días soleados. Con el mismo dispositivo se determinó la transpiración (E) ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la eficiencia fenofásica de uso de agua a nivel hoja se determinó mediante el cociente entre A y E (Silva et al., 2024).

Tiempo de ocurrencia de las fenofases

En cada tratamiento se determinó el tiempo de ocurrencia de las fenofases desde la emergencia hasta la cosecha, para analizar la contribución del consorcio bacteriano al desarrollo morfológico del cultivo. Se tomó en cuenta la ocurrencia de una fenofase cuando más del 51% de las plantas presentaban características morfológicas similares.

Rendimiento de biomasa

Se evaluó el rendimiento de las plantas hasta la fenofase de R3: grano lechoso. Para ello se tomaron 30 plantas por tratamiento, pesando las plantas completas con mazorcas. La medición se realizó en una báscula portátil (SUMILAB). Cada planta se seccionó cuidadosamente para evitar pérdidas de material vegetal, y se introdujeron en bolsas ziploc de 60*60 cm y se pesaron en fresco. Posteriormente se determinó la biomasa seca del material vegetal transcurridas 72 horas en horno de secado a una temperatura de 74°C. El rendimiento de biomasa fresca (expresado en t ha^{-1}) se determinó mediante el producto de la masa promedio obtenida en la muestras, multiplicado por la cantidad de plantas por parcela (expresada en ha). Con los datos de rendimiento de biomasa fresca y seca se determinó el índice de productividad de biomasa mediante el cociente del valor obtenido de biomasa seca y el de biomasa fresca.

Atenciones de cultivo, plagas y riego

Las labores de limpia se desarrollaron manual y semimecanizada, dado que la nula pluviometría limitó el desarrollo de malezas. Para el control del gusano cogollero se aplicó extracto de palo verde a razón de 2.5 L ha^{-1} , a los 15 y 35 días después de la emergencia, estas aplicaciones propiciaron el control efectivo de la plaga.

Se aplicaron tres riegos, todos por goteo. El de nacencia se aplicó inmediatamente después de la siembra a razón de 85 gotas por minuto, durante 24 horas. Similar cantidad se aplicó en la fenofase de V7 y el último se aplicó en la fenofase de floración masculina. Esta dosificación de riego se realizó bajo

el concepto de régimen de riego deficitario controlado, aplicando solo en las fenofases más críticas del cultivo.

Análisis estadísticos

Una vez comprobado el cumplimiento de los supuestos teóricos de homogeneidad de varianza de los datos de cada variable evaluada se realizaron comparaciones de las medias de los dos tratamientos conformados mediante la prueba de distribución teórica de probabilidades de t-student. El procesamiento estadístico se realizó en el paquete estadístico profesional STATISTICA, versión 14.0 para Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El híbrido comercial DK-4050 presentó un incremento de la actividad fotosintética conforme transcurrió la fenología de las plantas en ambos tratamientos. El tratamiento con la aplicación del consorcio microbiano (T1) presentó los valores más altos de fotosíntesis en todas las fenofases evaluadas. El mayor valor de fotosíntesis se obtuvo en la fenofase V12. Este comportamiento se obtuvo en los dos tratamientos (Figura 3).

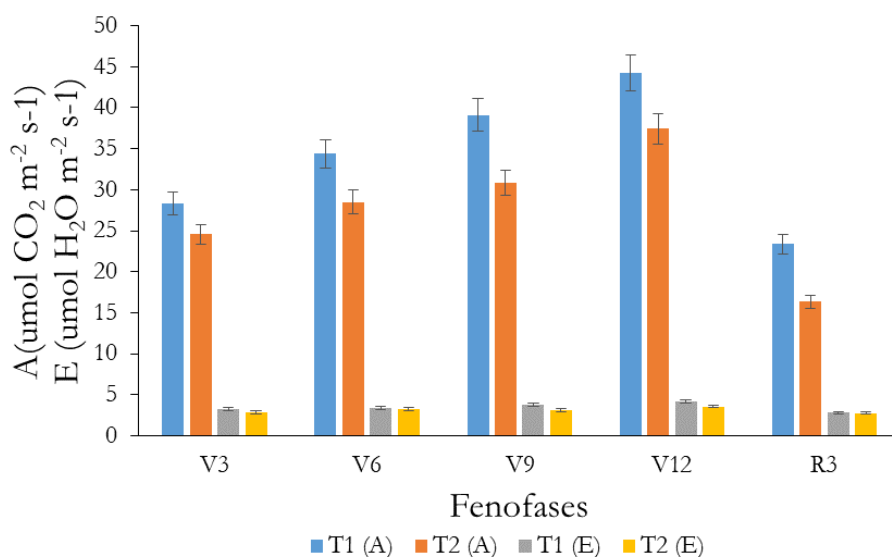


Figura 3. Actividad fotosintética máxima y transpiración del híbrido comercial de maíz DK-4050 con la aplicación de un consorcio bacteriano (T1) y su respectivo control (T2). Barras rectangulares representan desviaciones estándar de la media en cada fenofase del desarrollo.

En la fenofase de R3 se obtuvo el valor más bajo de actividad fotosintética en ambos tratamientos (Figura 3). Esta reducción puede estar ocasionada por la senescencia de la hoja o por el cambio de metabolismo durante el llenado de los granos donde mayormente tiene lugar la tasa de movilización de los carbohidratos y proteínas principalmente (Pérez-López, et al., 2024). Los valores de actividad fotosintética obtenidos en este híbrido se consideran en el rango de plantas que crecen en condiciones favorables de cultivo de acuerdo con los resultados informados por Yang et al. (2022), quienes

encontraron valores entre 25-40 en maíces cultivados en suelos donde se desarrollaba y mono y policultivo modificando la densidad de población.

La transpiración, aunque presentó diferencias significativas entre tratamientos en las fenofases V3, V6, V9 y V12, nunca superó los 5 μmol de H_2O $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y el valor más alto se obtuvo en los dos tratamientos en la fenofase de V12, similar a lo obtenido en la actividad fotosintética. En la fenofase de R3 la transpiración no presentó diferencias significativas entre tratamientos.

Las variaciones obtenidas en la actividad fotosintética fue lo que propició la variabilidad en la eficiencia de uso de agua en cuatro de fenofases del cultivo (Tabla 1). El tratamiento T1 presentó siempre mayores valores de transpiración, lo que demuestra que la planta cuenta con un buen estatus hídrico en el suelo, confiriéndoles tolerancia a las condiciones de sequía (Saleem et al., 2021). Además, los microorganismos del suelo mejoran de las capacidades de absorción de agua y por consiguiente nutrientes (Ech-Chatir et al., 2025), principalmente el potasio cuyo rol en el régimen hídrico de las plantas es importante (Luo et al., 2024).

Tabla 1. Eficiencia foliar de uso de agua en las fenofases de V3, V6, V9, V12 y R3 del híbrido comercial de maíz DK-4050.

Tratamientos	V3	V6	V9	V12	R3
T1	8.72**	10.09**	10.46**	10.77ns	8.31**
T2	8.62	8.77	9.96	10.48	5.92

NS y ** representan a ausencia y diferencias altamente significativas por la prueba de t-student ($p < 0.001$), respectivamente.

La deficiencia hídrica se reconoce como uno de los principales desafíos abióticos del maíz. Esto se debe a que un estrés hídrico puede reducir significativamente la producción y la calidad del grano (Gelaw; Sanan-Mishra, 2024). En el presente estudio se demuestra cómo el consorcio bacteriano aplicado coadyuva a mitigar el efecto del régimen de riego deficitario, donde solo se aplicó el 75% del riego. El consorcio bacteriano propició un mejor estatus hídrico reflejado en un impacto positivo en el intercambio gaseoso de las plantas. Esto podría estar relacionado con la activación de mecanismos fisiológicos compensatorios en las plantas para mitigar los efectos negativos de la deficiencia hídrica, asegurando así la producción.

En un suelo con un contenido bajo de agua, pero con la presencia de microorganismos benéficos promotores del desarrollo se favorece la disponibilidad de nutrientes, estimulando el crecimiento del área foliar y aumentando la producción de fotoasimilados y el rendimiento del cultivo (Silva et al., 2024).

Una E más alta permite mantener la temperatura foliar, la planta termorregula más, el mesófilo y el transporte de nutrientes a la parte aérea de la planta, ya que las plantas en condiciones de sequía pueden ser susceptibles a la cavitación. Esta situación puede afectar significativamente capacidad de transporte de agua y nutrientes (Lim et al., 2015).

La EUA se caracteriza por la cantidad de carbono asimilado como biomasa o grano producido por unidad de agua utilizada por el cultivo la respuesta de la EUA a nivel foliar está directamente asociada con diversos procesos fisiológicos que controlan los gradientes de CO₂ y agua, como los déficits de presión de vapor foliar (Lamêgo et al., 2024). De este modo, a mayor conductancia estomática en condiciones de régimen de riego deficitario sugiere una reducción de CO₂ en el mesófilo foliar debido a la integridad del aparato fotosintético, seguida de una alta regeneración de la enzima RUBISCO, lo que facilita el proceso de carboxilización (Jing et al., 2025).

La fenología del híbrido de maíz DK-4050 ocurrió sin diferencias significativas desde la emergencia hasta la fenofase V11 (Figura 4). A partir de la fenofase V12 las diferencias entre los tratamientos fueron significativas hasta la cosecha. La diferencia de tiempo de ocurrencia de la maduración del grano fue de 23 días (T1= 166 y T2=143 días) (Figura 4). El tratamiento con la aplicación del consorcio bacteriano cumplió con la fenología normal del cultivo en condiciones óptimas según reportes del descriptor varietal (DEKALAB, BAYER®) (185-195 días después de la emergencia). Esta comparación respecto al descriptor varietal demuestra que aún en condiciones de riego deficitario el consorcio bacteriano propicia el desarrollo normal de las plantas.

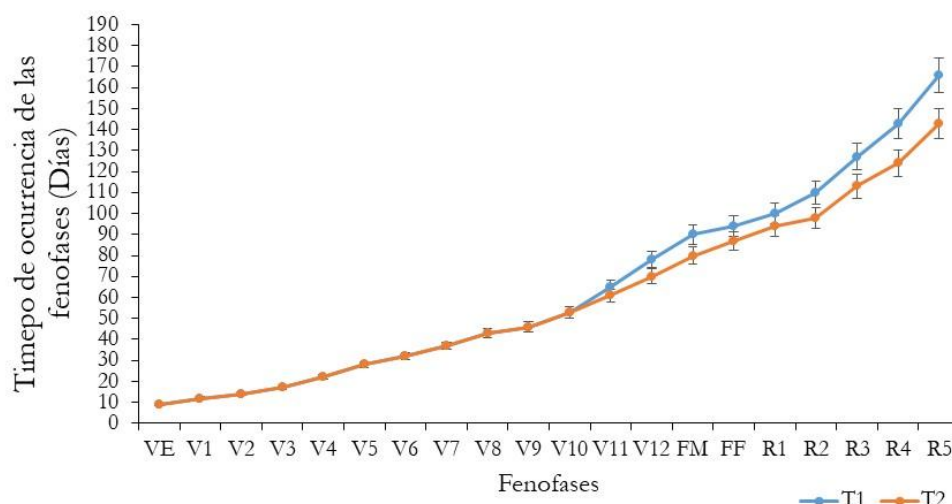


Figura 4. Tiempo de ocurrencia de las fenofases del híbrido comercial de maíz DK-4050 con la aplicación de un consorcio bacteriano (T1) y su respectivo control (T2). Barras rectangulares representan desviaciones estándar de la media en cada fenofase del desarrollo.

El acortamiento de la fenología del cultivo tiene grandes implicaciones bioquímicas en las plantas que afectan principalmente el rendimiento (Żydelis et al., 2021). Estas afectaciones pueden ocasionar reducción en la calidad de las cosechas por reducciones principalmente en el contenido de proteínas en el grano de maíz, según reportes de estimaciones realizadas por Jamsheed et al. (2023). Por estas razones el establecimiento de alternativas de fertilización a través de consorcios bacterianos impulsa la producción de grano de maíz en ecosistemas afectados por baja diversidad de microorganismos en el suelo.

El rendimiento de biomasa del cultivo al ser tratado con el consorcio promotor del desarrollo fue significativamente superior que cuando no se aplicó el consorcio (Figura 4). Este resultado demuestra la factibilidad del uso del consorcio aplicado para obtener un buen rendimiento aún en condiciones de riego deficitario controlado.

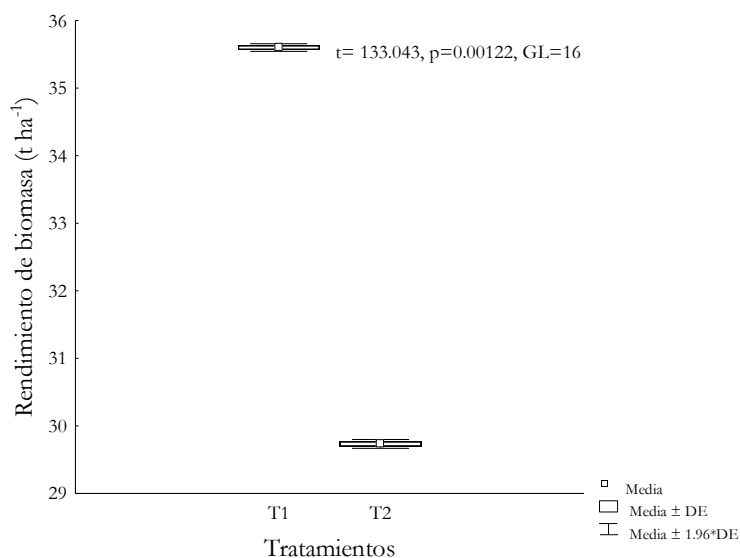


Figura 5. Rendimiento de biomasa del híbrido comercial de maíz DK-4050 con la aplicación de un consorcio bacteriano (T1) y su respectivo control (T2). Barras rectangulares representan desviaciones estándar (DE) de la media en cada fenofase del desarrollo. [t: valor calculado de t-student, p: probabilidad y GL: grados de libertad].

Aunque en el presente estudio no se evaluó un tratamiento con un consorcio bacteriano, pero al 100% de irrigación, la diferencia estadística demuestra la contribución del microorganismo al incremento del rendimiento (Figura 5). Tomando en consideración que las atenciones de cultivo, riego y fertilización fueron exactamente iguales se infiere que la variabilidad existente fue función de los tratamientos establecidos. Estos trabajos se podrán corroborar con estudios detallados de respiración de suelo y con el estudio imagenológico confocal donde se podrá observar la presencia de bacterias en las raíces (entendiendo que ambas usadas son endofíticas (Hwang et al., 2022, Panigrahi; Rath, 2021).

La explicación preliminar sobre el aporte de estos microorganismos es significativa en la promoción del desarrollo fisiológico y el rendimiento del maíz radica en el hábitat natural de estas bacterias. Ambas fueron obtenidas de un ecosistema semiárido y salino (Peñuelas-Rubio et al., 2024). Con este precepto se infiere que el mayor aporte bioquímico de las bacterias se realiza bajo condiciones de poca disponibilidad hídrica, activándose mecanismos enzimáticos de regulación bioquímica no dependientes del agua, por ejemplo, la acción de las enzimas liasas que no dependen del agua (Moosavi et al., 2024; LiRu et al., 2024).

CONCLUSION

El consorcio bacteriano dual a base de *P. megaterium* y *E. cloacae* aplicado al híbrido comercial DK-4050 promovió la actividad fotosintética de las plantas durante las fenofases iniciales y finales del cultivo. Su contribución al desempeño fisiológico contribuyó a la ocurrencia de la fenología conforme al descriptor varietal y propició un incremento del rendimiento de biomasa en la fenofase de R3 con un promedio de 35.5 t ha⁻¹, superior al tratamiento donde no se aplicó que solo rindió 29.5 t ha⁻¹. Estos resultados demuestran la factibilidad del uso del consorcio aplicado para incrementar el rendimiento de maíz en sistemas de producción bajo riego deficitario controlado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argentel-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., Hasanuzzaman, M., & Aguilera, J. G. (2024). Actualizing the worldwide distribution and main uses of *Parkinsonia aculeata* L., Sp. Pl. Vegetos, 37(4), 1203-1210.
- Argentel-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., Herrera-Sepúlveda, A., González-Aguilera, J., Sudheer, S., Salim, L. M., ... & Azizoglu, U. (2025). Biotechnological advances in plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agriculture. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 41(1), 21.
- Argentel-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., Ponce, J. A. L., Arredondo, T., Garatuza-Payan, J., & Yepez, E. A. (2021). Correlation among vegetative and reproductive variables in wheat under a climate change simulation. Bragantia, 80, e4221.
- Canizalez-Silva, M., Blanco-Macías, F., España-Luna, M. P., Rosa-Rodríguez, R. D. L., Lozano-Gutiérrez, J., & Lara-Herrera, A. (2024). Microorganismos en la biofertilización del cultivo de maíz como complemento a la fertilización química. Ecosistemas y recursos agropecuarios, 11(1).
- Devi, R., Alsaffar, M. F., AL-Taey, D. K., Kumar, S., Negi, R., Sharma, B., & Ahluwalia, A. S. (2024). Effect of indigenous mineral availing microbial consortia and cattle manure combination for growth of maize (*Zea mays* L.). Vegetos, 1-12.
- Ech-Chatir, L., Ouhammadou, R., Ikan, C., Boutasknit, A., Hashem, A., Avila-Quezada, G. D., ... & Meddich, A. (2025). Co-inoculation of compost with arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria to alleviate the adverse impact of drought stress in maize. Pak. J. Bot, 57, 4.
- Eshaghi, E., Mousae, S., Hendiyani, A., Khave, A. H., & Nosrati, R. (2024). Evaluation of the potential of multi-trait PGPR isolates as inoculants for maize (*Zea mays* L.) growth. Iranian Journal of Microbiology, 16(6), 812.
- Fadiji, A.E., Yadav, A.N., Santoyo, G., Babalola, O.O. (2023) Understanding the plant-microbe interactions in environments exposed to abiotic stresses: an overview. Microbiol Res, 271, 127368.
- Galindo, F.S., Rodrigues, W.L., Fernandes, G.C. et al. (2022) Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. Eur J Agron 134:1–10.

- Gelaw, T. A., & Sanan-Mishra, N. (2024). Molecular priming with H₂O₂ and proline triggers antioxidant enzyme signals in maize seedlings during drought stress. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1868(7), 130633.
- Herrera, F. I. M., Villagómez, L. I. Q., Martínez, M. C. R., & Islas, H. J. (2024). Modelo tridimensional para predecir la distribución de temperaturas durante el almacenamiento de granos en silos. *Jóvenes En La Ciencia*, 29, 1-10.
- Hwang, H. H., Chien, P. R., Huang, F. C., Yeh, P. H., Hung, S. H. W., Deng, W. L., & Huang, C. C. (2022). A plant endophytic bacterium *Priestia megaterium* StrainBP-R2 isolated from the halophyte *Bolboschoenus planiculmis* enhances plant growth under salt and drought stresses. *Microorganisms*, 10(10), 2047.
- Jaime-Vargas, J. A. (2024). El maíz amarillo como eje de la seguridad y soberanía alimentaria en México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 34(63).
- Jamsheed, B., Bhat, T. A., Saad, A. A., Nazir, A., Fayaz, S., Eldin, S. M., ... & Verma, N. (2023). Estimation of yield, phenology and agro-meteorological indices of quality protein maize (*Zea mays* L.) under different nutrient omissions in temperate ecology of Kashmir. *Journal of King Saud University-Science*, 35(7), 102808.
- Jamsheed, B., Bhat, T. A., Saad, A. A., Nazir, A., Fayaz, S., Eldin, S. M., ... & Verma, N. (2023). Estimation of yield, phenology and agro-meteorological indices of quality protein maize (*Zea mays* L.) under different nutrient omissions in temperate ecology of Kashmir. *Journal of King Saud University-Science*, 35(7), 102808.
- Jing, B., Shi, W., Chen, T., Zhai, Z., & Song, J. (2025). Optimizing root distribution and water use efficiency in maize/soybean intercropping under different irrigation levels: The role of underground interactions. *Soil and Tillage Research*, 249, 106490.
- Juárez, H. D. G., Mejías, E. S. S., Abraham, A. R. R., Córdova, J. J. L., & Olivares, R. A. P. (2024). Efectividad de tres dosis de nitrógeno en dos densidades de siembra de maíz amiláceo (*Zea mays* L.). *Revista Alfa*, 8(24), 691-706.
- Lamêgo, D. L., Amaral Junior, A. T. D., Kamphorst, S. H., Lima, V. J. D., Silva, S. P. D., Figueiredo, J. D. S., ... & Rezende, C. E. D. (2024). Gene Effect of Morphophysiological Traits in Popcorn (*Zea mays* L. var. *evarta*) Grown Under Contrasting Water Regimes. *Agriculture*, 14(12), 2157.
- Lian, J., Chen, J., Yang, X., Zhao, Y., Luo, X., Han, C., & Li, J. (2024). Responses of desert steppe plant diversity and microbial diversity to precipitation change. *Biodiversity Science*, 32(6), 24044.
- Lim, C.W.; Baek, W.; Jung, J.; Kim, J.H.; Lee, S.C. Function of ABA in stomatal defense against biotic and drought stresses. *Int. J. Mol. Sci.* 2015, 16, 15251–15270.
- LiRu, C. A. O., FeiYu, Y. E., LiXia, K. U., ChenChen, M. A., YunYun, P. A. N. G., LIANG, X., ... & XiaoMin, L. U. (2024). Analysis of Maize Phenylalanine Ammonia-Lyase (PAL) Family Genes and Functional Study of ZmPAL5. *Scientia Agricultura Sinica*, 57(12), 2265-2281.

- Luo, D., Shi, J., Li, M., Chen, J., Wang, T., Zhang, Q., & Wang, Y. (2024). Consortium of phosphorus-solubilizing bacteria promotes maize growth and changes the microbial community composition of rhizosphere soil. *Agronomy*, 14(7), 1535.
- Martínez-Díaz, F. S., García-Zavala, J. J., Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Lobato-Ortiz, R., & Gil, E. A. (2025). Aptitud combinatoria general y específica de maíz palomero para los Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(1), e3064-e3064.
- Moosavi, S. N. V., Saadatmand, S., Jamei, R., & Darvishzadeh, R. (2024). Chitosan nanoparticles (CSNPs) conferred salinity tolerance in maize by upregulating E3 ubiquitin-protein ligase, P5CS1, HKT1, NHX1, and PMP3 genes. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10.
- Omuto, C. T., Kome, G. K., Ramakhanna, S. J., Muzira, N. M., Ruley, J. A., Jayeoba, O. J., ... & Nyamai, M. (2024). Trend of soil salinization in Africa and implications for agro-chemical use in semi-arid croplands. *Science of The Total Environment*, 951, 175503.
- Panigrahi, S., & Rath, C. C. (2021). In vitro characterization of antimicrobial activity of an endophytic bacterium *Enterobacter cloacae* (MG001451) isolated from *Ocimum sanctum*. *South African Journal of Botany*, 143, 90-96.
- Pérez-López, L., Argente-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., Cervantes-Ortiz, F., Aguirre-Mancilla, C. L., & Aguilera, J. G. (2024). Morphology and yield components of single hybrids white and yellow maize in the Yaqui Valley. *Revista Brasileira De Ciências Agrárias*, 19(1), e3533.
- Peñuelas-Rubio, O., Argente-Martínez, L., Herrera-Sepúlveda, A., Maldonado-Mendoza, I. E., González-Aguilera, J., & Azizoglu, U. (2024). Rhizobacteria associated with *Parkinsonia aculeata* L. under semi desertic drought and saline conditions. *Biologia*, 79(8), 2591-2603.
- Saleem, M., Nawaz, F., Hussain, M. B., & Ikram, R. M. (2021). Comparative effects of individual and consortia plant growth promoting bacteria on physiological and enzymatic mechanisms to confer drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 3461-3476.
- SIAP (2022). Panorama Agroalimentario 2022. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 94 p.
- Silva, D. M. R., Barros, A. C., Silva, R. B., Galdino, W. D. O., Souza, J. W. G. D., Marques, I. C. D. S., ... & Rodrigues, J. D. (2024). Impact of Photosynthetic Efficiency on Watermelon Cultivation in the Face of Drought. *Agronomy*, 14(5), 950.
- Xu, L., Xin, C., Haider, F. U., Li, H., Li, S., Zhang, H., ... & Li, X. (2025). Rhizobacteria mitigate salinity stress in maize by modulating photosynthesis, antioxidant defense, and rhizosphere microbial diversity. *Plant Stress*, 15, 100781.
- Yang, H., Chai, Q., Yin, W., Hu, F., Qin, A., Fan, Z., & Fan, H. (2022). Yield photosynthesis and leaf anatomy of maize in inter-and mono-cropping systems at varying plant densities. *The Crop Journal*, 10(3), 893-903.

- Zhou, J., Liu, C., Shi, L., & Zamanian, K. (2024). Rhizosphere influence on microbial functions: consequence for temperature sensitivity of soil organic matter decomposition at early stage of plant growth. *Plant and Soil*, 494(1), 95-109.
- Žydelis, R., Weihermüller, L., & Herbst, M. (2021). Future climate change will accelerate maize phenological development and increase yield in the Nemoral climate. *Science of the Total Environment*, 784, 147175.

Caracterización fitoquímica preliminar y actividad antifúngica *in vitro* de *Parkinsonia aculeata* sobre *Fusarium* del maíz

Recibido em: 16/05/2025

Aprobado em: 17/05/2025

 10.46420/9786585756563cap2

Ofelda Peñuelas-Rubio 

Leandris Argente-Martínez* 

Joe Luis Arias Moscoso 

Pamela Romo-Rodríguez 

Francisco Cervantes-Ortíz 

Lorenzo Pérez-López 

Gustavo Adolfo Mares Domínguez 

INTRODUCCIÓN

Los problemas fitosanitarios constituyen uno de los aspectos más relevantes en el cultivo de maíz (*Zea mays*). Entre las enfermedades de mayor importancia de esta gramínea se encuentra la pudrición del tallo, raíz y mazorca causada por especies del género *Fusarium* (Peñuelas-Rubio et al. 2024). Desde el punto de vista económico, este género comprende algunos de los hongos más importantes en la agricultura desde el punto de vista económico (Sumerell et al. 2010). El control este hongo, se ha intentado por diferentes estrategias, principalmente el uso de productos químicos que generan una contaminación ambiental permanente y difícilmente logra controlar al hongo, debido a distintos factores, principalmente la característica endofítica de la infección (Bacon et al., 2001).

En la producción agrícola sustentable, la tendencia actual es la búsqueda de agentes bioprotectores, o de biocontrol, que a través de los extractos vegetales permitan el combate de enfermedades fúngicas. Por lo que las especies vegetales que habitan las zonas áridas, en condiciones extremas de salinidad, altas y bajas temperaturas, entre otros factores abióticos, pueden sobreexpresar compuestos químicos que en condiciones *in vitro* e *in vivo* inhiben el crecimiento de fitopatógenos generando efectos fungicidas y fungistáticos (Andrade-Bustamante et al., 2017). Los extractos vegetales de cada planta pueden tener hasta más de sesenta componentes y de ellos puede haber varios con propiedades antifúngicas. Generalmente están presentes como mezclas de compuestos y los patógenos pueden ser afectados diferencialmente por los compuestos individuales o por las mezclas en determinadas concentraciones y proporciones (Cenobio-Galindo et al., 2024; Villa-Martínez et al., 2015).

* Autor correspondiente: oleinismora@gmail.com

La especie *Parkinsonia aculeata* conocida como “Palo verde”, es una especie arbustiva nativa de regiones semiáridas de América tropical, caracterizada por ser un pequeño árbol caducifolio espinoso de la familia Fabaceae (Silva et al., 2019). En varias partes del mundo, es utilizada por sus propiedades medicinales y en menor proporción, como fuente de control de plagas y enfermedades agrícolas (Argente-Martínez et al., 2023). Dentro de los compuestos fitoquímicos que se han reportado destacan: polifenoles, flavonoides, taninos, alcaloides, entre otros (Argente-Martínez et al., 2023; Abdelaziz et al., 2020; Hassan et al. 2019; Silva et al., 2019).

Considerando que la literatura es escasa cuando se trata de información relacionada con el uso de extractos de *P. aculeata* en el biocontrol de enfermedades fitopatógenas, el objetivo del presente estudio fue determinar la caracterización fitoquímica preliminar de un extracto hidroalcohólico de *Parkinsonia aculeata* y su efecto sobre el crecimiento *in vitro* de dos cepas de *Fusarium* provenientes del cultivo de maíz para el establecimiento de las bases de formulación de un biofungicida.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material vegetal

Se realizó un muestreo de hojas y tallos jóvenes de *P. aculeata* en la localidad de Bahía de Lobos, Municipio San Ignacio Río Muerto, Sonora (Figura 1). Las condiciones ambientales y edáficas de este sitio experimental han sido publicadas previamente por Herrera-Sepúlveda et al. (2024).



Figura 1. *P. aculeata* presente en el sitio experimental.

Caracterización fitoquímica

Las muestras de *P. aculeata* se secaron al sol durante 10 días, posteriormente, se llevaron a peso constante disponiéndolas en un horno a 60° y se obtuvo un polvo en un molino eléctrico Grinder. 2 g de muestra seca se colocaron en 40 ml de metanol a agitación constante (1500 rpm por 5 min). La solución metanólica se sometió a pulsos ultrasónicos (procesador ultrasónico Sonics vibra-cell) durante 30 min a una amplitud de 40% (Higuera-Barraza et al., 2016). Los extractos se centrifugaron a 4000 rpm por 20 min y el sobrenadante se concentró de nuevo en las condiciones anteriores. Según la Tabla 1, los siguientes compuestos bioactivos fueron determinados de manera cualitativa por triplicado, siguiendo la metodología descrita por Ramírez y García-Vieyra (2017):

Cuadro 1. Condiciones para la determinación de compuestos fitoquímicos de extractos de *P. aculeata*. Fuente: los autores.

Fitoquímicos	µL de extracto	µL de reactivo	Indicativo de presencia
Flavonoides	600	300 NaOH 2N	Amarillo
Quinonas	300	300 H ₂ SO ₄	Rojos
Glucósidos	600	900 CHCl ₃ + gotas de NH ₄ Cl 10%	Rosado
Glucósidos cardíacos	150	600 CHCOOH + gotas de FeCl ₃ 5% + 180 H ₂ SO ₄	Anillo marrón
Fenoles	300	600 H ₂ O + gotas de FeCl ₃ 10%	Azul o verde
Taninos	300	600 FeCl ₃ 5%	Azul o verde oscuro

También se cuantificaron mediante colorimetría usando un lector de microplacas (Chromate) en longitudes de onda de 600 (flavonoides) y 520 nm (fenoles y taninos). Se realizó una curva de calibración con quercetina para la cuantificación de dichos compuestos.

Obtención del extracto vegetal

Se preparó un extracto hidroalcohólico de *P. aculeata* mediante la maceración de 500 g de material vegetal (hojas y tallos jóvenes) en una solución etanol: agua (7:3 v/v) por 10 días en condiciones de oscuridad. Una vez transcurrido el tiempo, se eliminó el solvente en un rotavapor a 65°C y 300 rpm. El extracto hidroalcohólico se recuperó en un frasco ámbar y se mantuvo a 4°C hasta su empleo en los ensayos *in vitro*.

Preparación del inóculo fúngico

Se emplearon las cepas del género *Fusarium* MC-03 y MC-10 reportadas por Peñuelas-Rubio et al. (2024), provenientes de raíces de los maíces nativos Gavilán y Halcón del estado de Guanajuato y Michoacán, México, respectivamente. Para la obtención del inóculo, los hongos fueron sembrados en placas de Petri con agar dextrosa y papa (ADP) adicionado con ácido tartárico al 10%. Se incubaron por 10 días a 28°C y se conservaron a 4°C hasta su uso en los ensayos *in vitro*.

Establecimiento de bioensayo in vitro de biocontrol

Se prepararon placas Petri (5 cm) con ADP previamente mezclado con el extracto correspondiente. Una vez gelificado, en el centro de la placa se depositó un plug de 8 mm del aislado fúngico. Las placas se mantuvieron en incubación a 28°C y se midió el crecimiento micelial en dos diámetros cruzados cada 24 horas por cinco días consecutivos. Se determinó el crecimiento radial de dos diámetros cruzados y el porcentaje de inhibición con la fórmula $%I = [(dc - dt) / dt] \times 100$ donde dc: diámetro promedio del crecimiento micelial del control y dt: diámetro del crecimiento micelial con los diferentes extractos (Arvízu et al., 2021).

Para cada hongo, el extracto se evaluó en las siguientes concentraciones (ppm): 0 (T1), 100 (T2), 300 (T3), 500 (T4), 700 (T5) y un control comercial (250 g 100 L⁻¹ H₂O de Captan Ultra 50W, Arysta; T6). El diseño experimental fue completamente aleatorizado con tres repeticiones de cada tratamiento. Se realizó un análisis de varianza basado en un modelo lineal de efectos fijos (Fisher, 1937) para niveles de significancia de 5%. Cuando se presentaron diferencias, se empleó una comparación de medias por la prueba DMS en el paquete STATISTICA para windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fitoquímica de extractos de P. aculeata

De acuerdo con los resultados de los análisis fitoquímicos (Tabla 2), el extracto hidroalcohólico de hojas y tallos jóvenes de *P. aculeata* presenta flavonoides, fenoles y taninos como metabolitos secundarios; quinonas, glucósidos y glucósidos C no se detectaron con las técnicas analíticas empleadas en este ensayo.

Diversos estudios han reportado el contenido de los compuestos fitoquímicos de *P. aculeata*, Abdelaziz et al. (2020) identificaron compuestos fenólicos y flavonoides en fracciones de extractos hidroalcohólicos de las partes aéreas de *P. aculeata* L. de la región Diriyah de Arabia Saudita. Dentro de los compuestos que detectaron, los flavonoides fueron los más abundantes. También, da Silva et al. (2023) determinaron la presencia colorimétrica de flavonoides y taninos en un extracto hidroalcohólico de partes aéreas de *P. aculeata* de una región de Brasil.

Tabla 2. Caracterización fitoquímica cualitativa y cuantitativa de extractos de *P. aculeata*. Fuente: los autores.

Fitoquímico	Presencia cualitativa	Cuantificación mg ml ⁻¹
Flavonoides	+	10.30
Quinonas	-	0.00
Glucósidos	-	0.00
Glucósidos C	-	0.00
Fenoles	++	0.54
Taninos	++	0.41

*Intensidad de color: -: no presentó cambio en color; +: coloración suave; ++: coloración intensa

Respecto al análisis con pruebas colorimétricas (presencia cualitativa), Valades (2005) reporta la presencia de flavonoides, fenoles y taninos en extractos metanólicos de *P. aculeata* proveniente del matorral de Tamaulipas, México y un contenido de estos últimos de 0.4 mg ml⁻¹, valor semejante al encontrado en el presente estudio (Tabla 2).

En trabajos anteriores, Argentel et al. (2023) reportan un contenido de flavonoides y polifenoles en muestras de hojas de *P. aculeata* del desierto de Sonora, México, de hasta 300 y 7 mg ml⁻¹ respectivamente. La diferencia respecto al valor que se muestra en la Tabla 2, podría deberse a la época de muestreo y la disminución de precipitaciones en el sitio experimental.

Bioensayo in vitro de biocontrol

Según la Figura 2, el crecimiento micelial de dos cepas de *Fusarium* (MC-03 y MC-10) se evaluó a las 24, 48, 72, 96 y 120 h, empleando cinco concentraciones (0, 100, 300, 500, 700 ppm) del extracto hidroalcohólico de *P. aculeata* y un control químico (Captan Ultra 50W). Hasta las 72 h de incubación de MC-03, el T5 (700 ppm) no presentó un crecimiento micelial, semejante a T6 (control químico). El extracto fue más efectivo en la disminución del crecimiento de la cepa MC-03, lo que permite establecer que las cepas presentan distintos grados de patogenicidad, característica típica de las especies de *Fusarium*, principalmente, de la especie *oxysporum* (Arvizu et al., 2021).

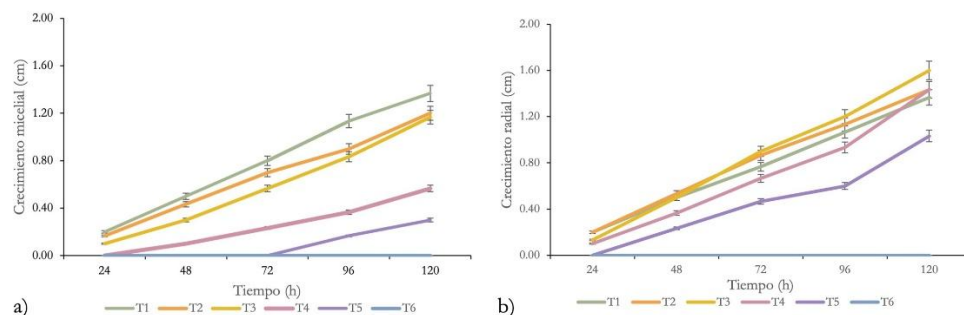


Figura 2. Crecimiento micelial de dos cepas de *Fusarium*: a) MC-03 y b) MC-10 según la aplicación de tratamientos: T1: 0 ppm, T2: 100 ppm, T3: 300 ppm, T4: 500 ppm, T5: 700 ppm, T6: control químico.

A las 120 h de incubación de las dos cepas, el análisis de varianza presentó diferencias altamente significativas ($p \geq 0.05$) entre los tratamientos evaluados (Tabla 3). De acuerdo con estos resultados, a partir de las 500 ppm (T4), el extracto de *P. aculeata* es igual de efectivo que el T6 en el biocontrol de la cepa MC-03.

Tabla 3. Crecimiento micelial de las cepas fúngicas por efecto de los tratamientos a las 120 h de incubación. Fuente: los autores.

Tratamiento	Concentración	Crecimiento micelial final*			
		MC-03		MC-11	
T1	0 ppm	1.37	c	1.37	d
T2	100 ppm	1.20	c	1.43	cd
T3	300 ppm	1.17	c	1.60	cd
T4	500 ppm	0.57	ab	1.43	cd
T5	700 ppm	0.30	ab	1.03	b
T6	250 g 100 L ⁻¹ H ₂ O**	0.00	a	0.00	a

* medido en centímetros; ** fungicida químico empleado: Captan Ultra 50W.

Los valores de crecimiento micelial se emplearon para calcular el % de inhibición al final del experimento (120 h) por efecto de los tratamientos y determinar que extracto ejerció un mayor efecto sobre las dos cepas de *Fusarium*. En MC-03, T4 y T5 presentaron una inhibición de 58.54% y 78.05% respectivamente, estadísticamente similar a T6, que inhibió el crecimiento micelial de esta cepa al 100% ($p > 0.05$). Para MC-10, con 700 ppm del extracto (T5) se alcanzó un % de inhibición de 24.39, lo que sugiere la exploración de dosis más altas que se acerquen al efecto inhibitor total del control químico (T6).

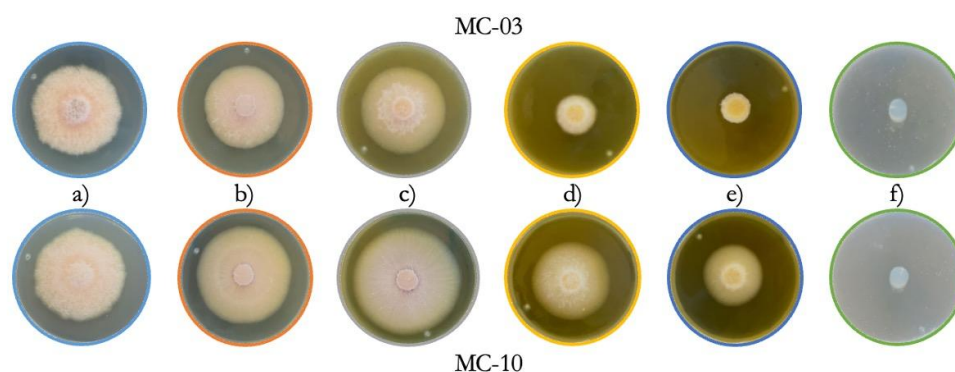


Figura 3. Biocontrol *in vitro* de las dos cepas fúngicas evaluadas por efecto de los tratamientos: a) 0 ppm, b) 100 ppm, c) 300 ppm, d) 500 ppm, e) 700 ppm, f) control químico.

En la Figura 3 se observan las variaciones del crecimiento micelial de las cepas fúngicas según cada tratamiento aplicado. En condiciones normales, ambas cepas desarrollan una pigmentación rosada

y abundante micelio algodonoso (3-a), que va reduciéndose a medida que aumenta la concentración del extracto (3-e).

Se han realizado algunas investigaciones sobre las partes aéreas de *P. aculeata* y la actividad antifúngica de su fracción hidroalcohólica. Maqbool et al. (2020) estudiaron la eficacia de los extractos de *P. aculeata* para reducir las enfermedades radiculares. En este estudio, las semillas tratadas con extracto 100% de hojas mostraron el mayor control de la colonización por hongos patógenos.

Por otro lado, Arvizu et al. (2021) en Sonora, México, probaron la eficacia de extractos hidroalcohólicos de hojas de *P. aculeata*; a las 300 ppm se logró la inhibición del crecimiento micelial *in vitro* de *Fusarium oxysporum*. Estos extractos se probaron en plantas de tomate y no mostraron fitotoxicidad significativa (Argentel-Martínez et al., 2023).

En relación con el contenido de compuestos fitoquímicos y la capacidad de biocontrol microbiana, algunos estudios desarrollados por Qasim et al. (2019) demostraron el efecto alelopático y fitotóxico del palo verde y otras plantas costeras, mostrando que es ligeramente alelopático debido a la concentración de polifenoles y flavonoides que posee. La presencia de estos compuestos en hojas y tallos jóvenes de *P. aculeata*, como se informa en esta investigación, confirman su relación con la capacidad antifúngica a bajas concentraciones.

Se demostró que el extracto hidroalcohólico de *P. aculeata* contiene compuestos fitoquímicos relacionados con efectos de biocontrol de hongos fitopatógenos como flavonoides, fenoles y taninos. El extracto, mostró efectividad en la inhibición del crecimiento de la cepa MC-03 a partir de las 500 ppm, similar al producto químico empleado de manera comercial para controlar a este hongo. Aun cuando el extracto no mostró un control similar para la cepa MC-10, los resultados del presente estudio se consideran prometedores, ya que las concentraciones evaluadas fueron bajas respecto a lo reportado en otras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelaziz S et al. (2020). Phytochemical profile, antioxidant and cytotoxic potential of *Parkinsonia aculeata* L. growing in Saudi Arabia. Saudi Pharmaceutical Journal, 28: 1129–1137. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2020.08.001>
- Andrade-Bustamante A et al. (2017). Estudio del potencial biocontrolador de las plantas autóctonas de la zona árida del noroeste de México: control de fitopatógenos. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo, 49(1): 127-142.
- Argentel-Martínez L et al. (2023). Phytotoxicity of hydroalcoholic extracts of *Parkinsonia aculeata* L. sp. Pl., in tomato plants. Polyphenol and flavonoid content. Argentel-Martínez et al. (org.). Advances in biology through agronomy, aquaculture, coastal and environmental Sciences. Nova Xavantina-MT: Pantanal. 6-16 p. <https://doi.org/10.46420/9786581460822>

- Arvizu E et al. (2021). Extractos hidroalcohólicos de *Parkinsonia aculeata* L., Sp. Pl. para el biocontrol de *Fusarium oxysporum* Schlecht. Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S) 3(2): 46-52.
- Bacon C. et al. (2001). Biological control of *Fusarium moniliforme* in maize. Environmental Health Perspectives, 109: 325-332.
- Cenobio-Galindo ADJ et al. (2024). Biofungicides based on plant extracts: on the road to organic farming. International Journal of Molecular Science 25: 6879. <https://doi.org/10.3390/ijms25136879>
- da Silva AC et al. (2023). Caracterização da droga vegetal e solução extrativa obtidos a partir de *Parkinsonia aculeata*. Brazilian Journal of Development, 9(1): 838-848.
- Hassan WH et al. (2019). Chemical composition and biological activities of the aqueous fraction of *Parkinsonia aculeata* L. growing in Saudi Arabia. Arabian Journal of Chemistry, 12(3): 377–387.
- Herrera-Sepúlveda A et al. (2024). El papel crucial del contenido de carbohidratos y proteínas en las raíces de *Parkinsonia aculeata* frente a salinidad y sequía en el semidesierto de Sonora, México. Trends in Agricultural and Environmental Sciences, (e240014). <https://doi.org/10.46420/TAES.e240014>
- Higuera-Barraza O et al. (2016). Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins. Ultrasonic Sonochemistry, 3:558-562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.02.007>
- Maqbool A et al. (2020). Efficacy of *Parkinsonia aculeata* and *Cassia fistula* with selected microbial antagonists for the improvement of growth and reduction in root diseases. International Journal of Biological Research, 8(1-2):35-42.
- Peñuelas-Rubio et al. (2024). Presencia de *Fusarium* sp. en maíces nativos cultivados bajo distintos regímenes de riego. Zuffo et al. (org.). Inovações em pesquisas agrárias e ambientais-Volume V. Nova Xavantina: Pantanal. 87-95 p. <https://doi.org/10.46420/9786585756433>
- Qasim M et al. (2019). Phytotoxic analysis of coastal medicinal plants and quantification of phenolic compounds using HPLC. Plant Biosystems- An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. 153(6): 767–774. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1549607>
- Ramírez DS; García-Vieyra MI (2017). Perfil fitoquímico de compuestos bioactivos y determinación de la capacidad antioxidante de plantas medicinales. Jóvenes en la ciencia, 3(2), 27-32.
- Sumerell B et al. (2010). Biogeography and phylogeography of *Fusarium*: a review. Fungal Diversity, 44:3-13.
- Valades CMC (2005). Evaluación de las propiedades físicas y químicas de once especies maderables del matorral tamaulipeco como indicadores de resistencia y uso potencial. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 97 p.
- Villa-Martínez A et al. (2015). Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. Acta Agronómica, 64(2): 194-205. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n2.43358>

Efectos de *Enterobacter cloacae* y *Priestia megaterium* en la absorción de agua y germinación de de frijol

Recibido em: 12/04/2025

Aprobado em: 15/05/2025

 10.46420/9786585756563cap3

Luis Enrique Estrella-Osuna 

Leandris Argentele-Martínez 

Ofelda Peñuelas-Rubio 

Lorenzo Pérez-López 

Maritza Arellano-Gil* 

Jaime Garatuza-Payán 

Andrés Francisco Chávez-Almanza 

INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una de las leguminosas más importantes a nivel mundial, ya que representa una fuente significativa de proteínas, vitaminas y minerales esenciales en la dieta humana (Maqueira-López et al., 2024).

El aumento de las temperaturas, combinado con la disminución de la disponibilidad de humedad, representa un riesgo significativo para la producción de frijol. El déficit hídrico disminuye su crecimiento y productividad, de manera proporcional a la severidad y a la magnitud de la condición de estrés (Morales-Guevara et al., 2024).

El estrés hídrico afecta negativamente la producción agrícola, ya que el desarrollo óptimo de las plantas depende de un suministro adecuado de agua a lo largo de las distintas etapas fenológicas, siendo especialmente crítico durante la germinación, que requiere de una cantidad de agua que active su metabolismo (Arruda et al., 2025).

La germinación es una etapa crítica en el ciclo de vida de las plantas, y su éxito depende en gran medida de la rapidez y uniformidad con que ocurre este proceso, y es determinante para el establecimiento eficiente de cultivos en sistemas de producción agrícola a escala comercial (Maestre et al., 2024). Es un proceso fisiológico mediante el cual, a partir del embrión, emergen y se desarrollan las estructuras esenciales para la formación de una planta, las cuales se desencadenan tras la absorción de agua por la semilla (Morales-Santos et al., 2017).

Se ha demostrado que ciertas bacterias pertenecientes al grupo de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal inducen un aumento en la velocidad y el porcentaje de germinación de las semillas. Este efecto se atribuye, en gran medida, a la producción de fitohormonas que estimulan procesos fisiológicos clave durante las etapas iniciales del desarrollo vegetal (Tanya-Morocho; Leiva-Mora, 2019).

* Autor correspondiente: marellano@itson.edu.mx

Los microorganismos que se establecen en las semillas durante el proceso de germinación pueden proliferar y colonizar completamente el sistema radicular. La colonización que tiene lugar durante la fase de impregnación o inmersión de las semillas ejerce una influencia significativa en el crecimiento y desarrollo de la planta (Moreno-Reséndez et al., 2018).

Especies como *Acetobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter* y *Frankia*, han demostrado su capacidad para asociarse con las plantas y contribuir significativamente a mejorar el crecimiento y la supervivencia de las plantas, favoreciendo su desarrollo y tolerancia a estrés (Bhadrecha et al., 2023).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de *Enterobacter cloacae* y *Priestia megaterium* en la absorción de agua y germinación de semillas de frijol pinto bajo diferentes condiciones de humedad.

MATERIAL Y MÉTODOS

Lugar del experimento

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Biotecnología del Tecnológico Nacional de México, campus Valle del Yaqui (ITVY), con el objetivo de evaluar el efecto de *Enterobacter cloacae* y *Priestia megaterium* sobre la absorción de agua y germinación de semillas del frijol pinto Bill Z.

Cultivo bacteriano

Las cepas de *Enterobacter cloacae* (Figura 1) y *Priestia megaterium* (Figura 2) se cultivaron en caldo Luria-Bertani (LB) + glucosa a 30°C por 24 y 48 horas, posteriormente se tomaron muestras de cada cultivo bacteriano y se ajustaron a una concentración de 10^7 UFC ml⁻¹.

Las bacterias fueron resuspendidas en una solución salina tamponada con fosfato (PBS) para su inoculación en las semillas de frijol. La resuspensión en PBS se realizó para proporcionar un medio isotónico que garantiza la estabilidad de las bacterias durante el proceso de inoculación, sin alterar su viabilidad.

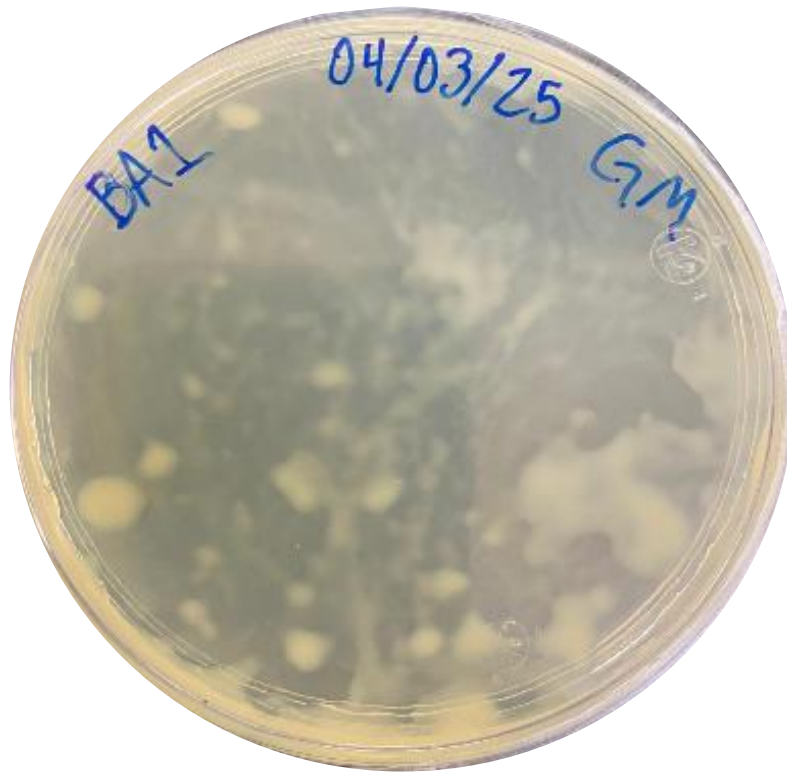


Figura 1. Cepa de *Enterobacter cloacae*.



Figura 2. Cepa de *Priestia megaterium*.

Desinfección de semillas

La desinfección de las semillas de frijol se realizó en tubos falcón de 50 ml, con un total de 20 semillas por tubo, a cada uno de ellos se le adicionó etanol (70%) por dos minutos (Figura 3), posteriormente se descartó el etanol y se procedió a lavar con hipoclorito de sodio (0.12%) durante 10 minutos con agitación suave. Finalmente, se lavaron cinco veces con agua destilada estéril. Después del último enjuague, las semillas se colocaron en condiciones estériles sobre papel absorbente estéril dentro de una cabina de flujo laminar y se dejaron secar al ambiente por aproximadamente 30 minutos, hasta eliminar el exceso de humedad superficial.



Figura 3. Desinfección de semillas de frijol con etanol.

Tratamientos y diseño experimental

El experimento se realizó en condiciones controladas de laboratorio utilizando un diseño completamente aleatorizado, con el objetivo de evaluar el efecto de cuatro tratamientos: T1 *Enterobacter cloacae*; T2 *Priestia megaterium*; T3 *Enterobacter cloacae* + *Priestia megaterium*; T4 Control, sobre la absorción de agua y la germinación de semillas de frijol, bajo tres diferentes condiciones de humedad (70%, 80% y 100%), con el fin de simular diferentes condiciones de humedad del suelo que podrían afectar la germinación de las semillas. Cada tratamiento se replicó en tres placas por tratamiento, y cada placa contenía cuatro semillas, sumando un total de 12 semillas por tratamiento.

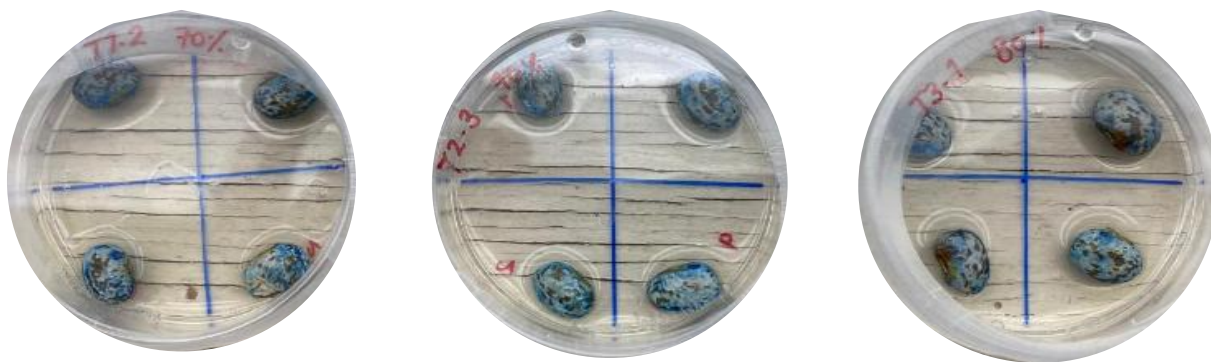


Figura 4. Semillas de frijol sembradas en cajas Petri con agar agar y suspensión bacteriana.

Las semillas fueron cultivadas en cajas Petri de 5 cm de diámetro, que contenían agar agar como medio de cultivo, que actuó como medio hidratante para las semillas durante el proceso de germinación (Figura 4). A cada caja Petri se le añadió un ml de la suspensión bacteriana correspondiente a cada tratamiento (control o bacterias).

Variables evaluadas

Las semillas fueron pesadas individualmente antes de iniciar el proceso de germinación, y posteriormente a las 24, 48 y 72 horas después de la siembra. Con base en estas mediciones, se determinó la cantidad de agua absorbida por la semilla y el porcentaje de germinación.

La cantidad de agua absorbida por cada semilla fue determinada mediante la diferencia entre el peso registrado en cada intervalo de tiempo (peso final) y el peso inicial, considerándose esta diferencia como el agua absorbida, expresada en gramos.

El porcentaje de germinación fue calculado con base en el número de semillas que presentaron signos visibles de germinación (emergencia de la radícula) (Figura 5) en cada intervalo de tiempo, respecto al total de semillas sembradas.

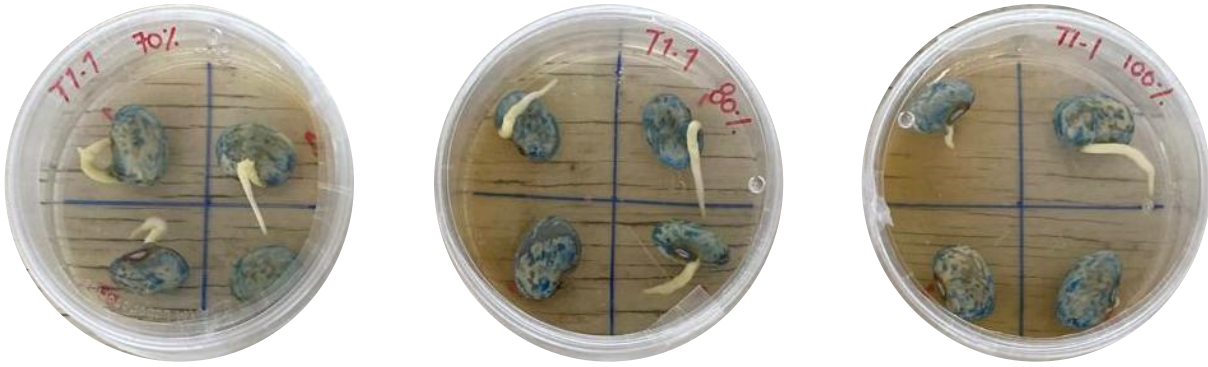


Figura 5. Semillas de frijol sembradas en cajas Petri con agar agar y suspensión bacteriana a las 72 horas.

Análisis estadísticos

Para evaluar la absorción de agua y germinación de la semilla se realizó un análisis de varianza de clasificación simple y se empleó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación múltiple de medias. Se utilizó el programa estadístico IBM SPSS Statistics 22.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 6 muestra la cantidad de agua absorbida (en gramos) por las semillas de frijol inoculadas con diferentes tratamientos a lo largo de 72 horas bajo condiciones de 70% de humedad. Aunque se observaron variaciones en los promedios entre tratamientos, estas no fueron estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Se observa que el tratamiento control (T4) fue superior a las 24, 48 y 72 horas. Después de las 24 horas, la absorción de agua continuó incrementándose, el tratamiento control (T4) se mantuvo como el tratamiento con mayor absorción a las 48 horas, seguido por T2. Por su parte, T1 y T3 mostraron valores más bajos.

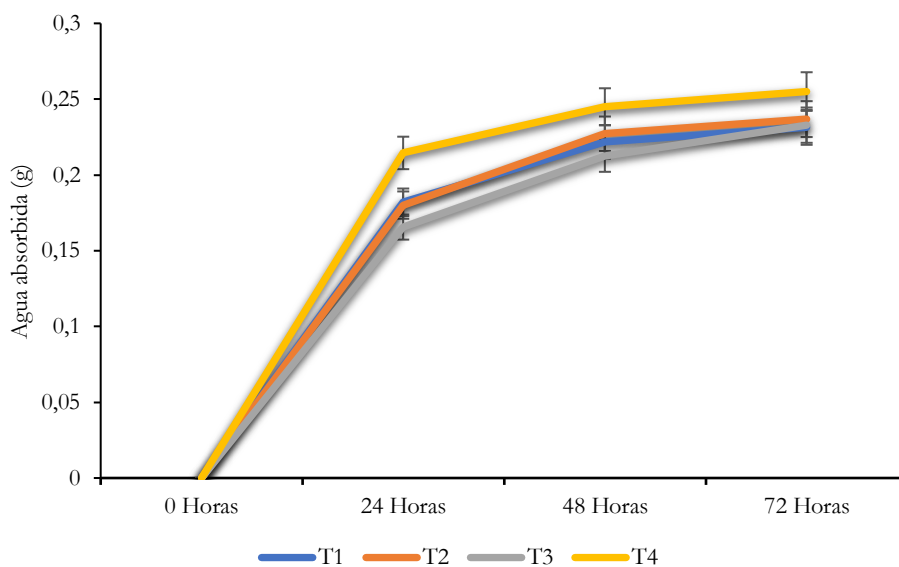


Figura 6. Absorción de agua por efecto de bacterias bajo condiciones de 70% de humedad.

Finalmente, a las 72 horas, las diferencias entre tratamientos tendieron a reducirse, alcanzándose valores de absorción muy similares, siendo el control (T4) el de mayor valor de absorción de agua.

Sin embargo, es importante considerar que las suspensiones bacterianas fueron preparadas en medio PBS, mientras que el control utilizó agua estéril, lo que podría haber influido en la velocidad inicial de imbibición debido a diferencias en la osmolaridad, ya que uno de los efectos más evidentes del estrés salino es la reducción en la capacidad de absorción de agua (Argente-Martínez et al., 2015).

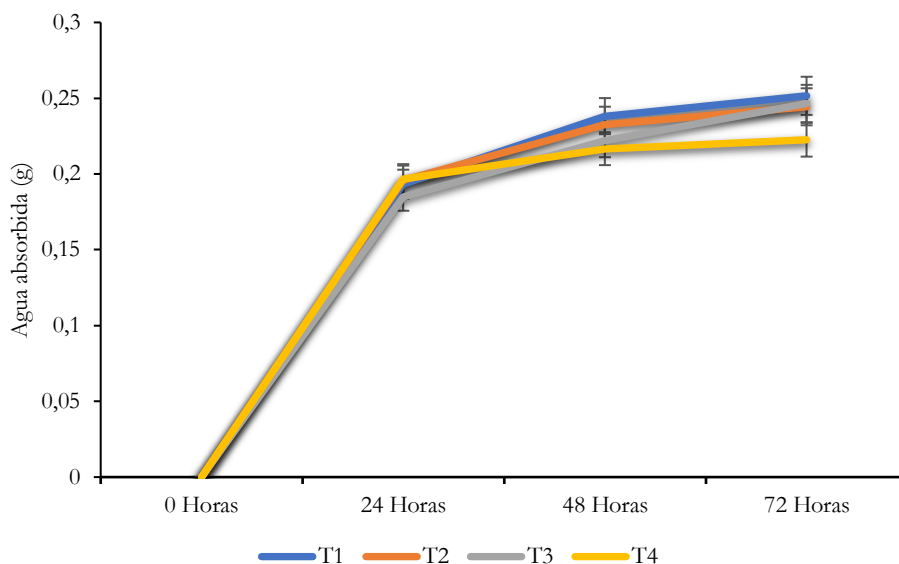


Figura 7. Absorción de agua por efecto de bacterias bajo condiciones de 80% de humedad.

Para la condición de 80% de humedad, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para la variable evaluada ($p > 0.05$), a las 24 horas se mostró un rápido incremento en la absorción de agua de manera similar para todos los tratamientos. Sin embargo, a partir de las 48 horas, el tratamiento de *Enterobacter cloacae* (T1) presentó una absorción de agua mayor en comparación con los demás tratamientos, seguido de T2 y T3, mientras que el control (T4) registró valores inferiores. Esta tendencia se mantuvo a las 72 horas, donde T1 conservó el mayor nivel de absorción (Figura 7).

La inoculación de *Enterobacter cloacae* en cultivos bajo estrés hídrico y salino incrementa las proteínas asociadas a la defensa, la fotosíntesis y el transporte de iones. También regula la expresión de proteínas que refuerzan la pared celular y mantienen la integridad de la membrana, previniendo daños celulares (Bécquer et al., 2022).

En un estudio realizado por Hussain et al. (2025), *E. cloacae* en consorcio con otras bacterias solubilizadoras de fosfato mostró un efecto positivo en la mitigación del estrés hídrico en cultivo de trigo,

esta co-inoculación promovió de forma significativa el desarrollo del sistema radicular y mejoró el índice de vigor en condiciones de déficit hídrico.

Así mismo, la inoculación de semillas con esta bacteria en cultivos de sorgo provocó un aumento significativo en el contenido de agua residual en las hojas, en comparación con las plantas estresadas no tratadas, por lo que *E. cloacae* tiene un efecto positivo en la respuesta fisiológica de las plantas bajo condiciones de estrés hídrico (Shinde, 2024).

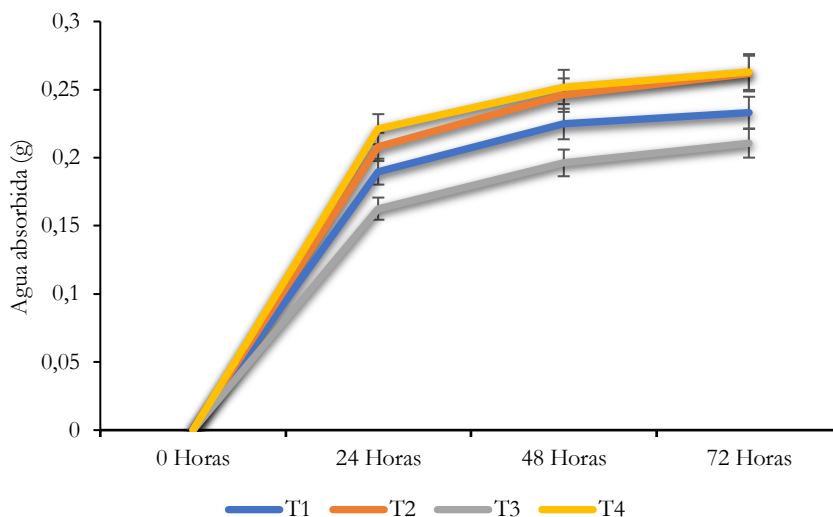


Figura 8. Absorción de agua por efecto de bacterias bajo condiciones de 100% de humedad.

Bajo condiciones de 100% de humedad se observa que T4 fue el tratamiento que mayor absorción de agua obtuvo a las 24, 48 y 72 horas, a pesar que el análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$) (Figura 8). El tratamiento control (T4) presentó la mayor absorción desde las primeras mediciones, seguido de T2 (*Priestia megaterium*), mientras que el consorcio (T3) mostró los valores más bajos. A las 48 horas, se mantuvo esta tendencia, con T4 y T2 superando en absorción de agua en comparación al resto de los tratamientos.

Priestia spp. contribuye significativamente a la adaptación de las plantas frente al estrés hídrico, a través de distintos mecanismos fisiológicos y bioquímicos, como la síntesis de osmolitos y compuestos antioxidantes, así como la generación de biopelículas en la zona de la rizosfera, lo que favorece una mejor absorción de agua y nutrientes (Baumer-Franceschini et al., 2024).

La bacteria *P. megaterium* ha demostrado que induce múltiples respuestas fisiológicas en las plantas, incluyendo la modulación en la expresión de genes relacionados con el estrés, la activación del sistema antioxidante y cambios en los niveles de fitohormonas, lo que contribuye a una mayor tolerancia al estrés abiótico (Shaffique et al., 2024).

De manera similar, la coinoculación de *P. megaterium* y *B. subtilis* ha mostrado efectos sinérgicos en el crecimiento y rendimiento de plantas leguminosas como la soya (Marchão et al., 2025).

Tabla 1. Porcentaje de germinación de semillas de frijol bajo diferentes condiciones de humedad (70%, 80% y 100%) a las 24, 48 y 72 horas.

Tratamientos	24 horas			48 horas			72 horas		
	70%	80%	100%	70%	80%	100%	70%	80%	100%
T1: <i>Enterobacter cloacae</i>	0 a	0 a	0 a	25 a	16.66 b	33.33 a	50 ab	66.66 a	58.33 a
T2 <i>Priestia megaterium</i>	0 a	0 a	0 a	0 a	33.33 ab	33.33 a	58.33 ab	75 a	58.33 a
T3 <i>Enterobacter cloacae</i> + <i>Priestia megaterium</i>	0 a	0 a	0 a	8.33 a	25 ab	41.66 a	25 b	66.66 a	66.66 a
T4: Control	0 a	0 a	0 a	41.66 a	75 a	58.33 a	83.33 a	83.33 a	91.66 a

*Medias con letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La Tabla 1 muestra el porcentaje de germinación de semillas de frijol a las 24, 48 y 72 horas después de la siembra bajo condiciones de humedad del sustrato del 70%, 80% y 100%. A las 24 horas no se observaron signos visibles de germinación en ninguno de los tratamientos en las diferentes condiciones de humedad evaluados, registrándose un 0% de germinación en todos los casos.

A las 48 horas se registraron los primeros signos de germinación. El tratamiento control (T4) mostró los mayores porcentajes de germinación en las condiciones de 80 y 100% de humedad, alcanzando un 75 y 58.33% de semillas germinadas respectivamente para esas condiciones, significativamente superiores al resto de los tratamientos. Por su parte, en la condición de 100% de humedad no hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos.

A las 72 horas, todos los tratamientos mostraron un incremento en porcentaje de semillas germinadas. El tratamiento T4 continuó con los valores más altos de germinación, alcanzando 83.33% en condiciones de 70% y 80% de humedad, y 91.66% bajo 100% de humedad del sustrato.

El tratamiento de la bacteria *Enterobacter cloacae* (T1) y el consorcio (T3) alcanzaron porcentajes de germinación de hasta 66%. Por su parte, *Priestia megaterium* (T2) mostró mejores resultados, alcanzando 75% de germinación al 80% de humedad, resultando estadísticamente igual al control (T4) para las condiciones de 80 y 100% de humedad.

Estos resultados coinciden con los reportados por Pliego-Marín *et al.* (2013) que obtuvieron una afectación en la germinación de frijol por efecto del estrés hídrico, lo que redujo tanto la precocidad como la velocidad del proceso.

Arslan y Bulut (2023) evaluaron rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la germinación y el desarrollo de plántulas de frijol, incluyendo cepas del género *Bacillus*, y reportaron porcentajes de germinación que variaron entre 67.5 % y 97.5 %, dependiendo de la cepa utilizada. Cabe destacar que, en su estudio, las semillas del tratamiento control comenzaron a germinar después del tercer día, lo que indica que la inoculación bacteriana favoreció una germinación más rápida y eficiente.

La germinación rápida y uniforme de las semillas, así como el crecimiento inicial de las plántulas, son factores clave para la producción agrícola, ya que resultan importantes para asegurar un buen establecimiento de las plántulas en el campo (Reed et al., 2022).

Es importante considerar que las suspensiones bacterianas fueron preparadas en medio PBS, mientras que el tratamiento control se realizó con agua estéril. Esta diferencia en el medio de aplicación podría haber influido en la velocidad inicial de imbibición, ya que la presencia de sales en el PBS puede generar un estrés osmótico, reduciendo el potencial hídrico y, en consecuencia, limitando la disponibilidad de agua para la absorción por parte de la semilla (Mazón-Suástegui et al., 2022). Este factor podría haber atenuado los efectos positivos esperados de las bacterias durante las etapas iniciales del proceso de absorción de agua.

CONCLUSIONES

La inoculación de semillas de frijol con *Enterobacter cloacae*, *Priestia megaterium* y su combinación mostró efectos en la absorción de agua y la germinación bajo diferentes niveles de humedad. En condiciones de 70 y 100% de humedad, el tratamiento control (T4) presentó la mayor absorción de agua. A 70% de humedad la inoculación con *Priestia megaterium* (T2) mostró una buena capacidad de absorción inicial, pero no superó al tratamiento control (T4). Por su parte, la inoculación con *Enterobacter cloacae* (T1) promovió una mayor absorción de agua en condiciones de 80% de humedad.

Para futuras investigaciones, se sugiere evaluar los tratamientos bacterianos utilizando agua estéril como medio de suspensión, con el fin de minimizar el impacto osmótico y diferenciar con mayor precisión el efecto fisiológico atribuido a los microorganismos sobre la germinación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argentel-Martínez, L., Garatuza-Payán, J., Gutiérrez-Coronado, M., Yépez-González, E., Villaseñor-López, O. y Travieso-Aguilar, M. (2015). Efectos de la salinidad en la absorción de agua por las semillas, germinación y el crecimiento en los primeros estadios del desarrollo del trigo (*Triticum aestivum* L. y *Triticum durum* L.) y su relación con la tolerancia varietal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 11(2), 56-67.
- Arruda, B., Bagagi, B. M., de Freitas Junior, N. B., Bejarano Herrera, W. F., Estrada-Bonilla, G. A., Leoti Zanetti, W. A., Silva Silvério, A. L., & Ferrari Putti, F. (2025). Biochemical and Plant Growth Response of the Common Bean to Bioinput Application Under a Drought Stress Period. *Stresses*, 5(1), 17. <https://doi.org/10.3390/stresses5010017>
- Arslan, M., & Bulut, S. (2023). The effects of bacillus ssp. on germination and seedling growth of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Current Trends in Natural Sciences*, 12(23), 160-166.
- Baumer-Franceschini, S., Padula-Paz, I. C. , & Martins-Guimarães, A. (2024). Eficácia agrônômica do produto estive (*Priestia arybathaii* + *Priestia megaterium*) sobre o crescimento de soja em

cinco condições edafoclimáticas diferentes. *Revista Inova Ciência & Tecnologia/Innovative Science & Technology Journal*.

- Bécquer, C. J. (2022). Rhizobacteria and their contribution to plant tolerance to drought and salinity. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 56(2).
- Bhadrecha, P., Singh, S. & Dwibedi, V. 'A plant's major strength in rhizosphere': the plant growth promoting rhizobacteria. *Arch Microbiol* 205, 165 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03502-2>
- Hussain, H. S., Tabbasum, S., Mahreen, N., Yahya, M., Ejaz, K., Aslam, Z., ... & Yasmin, S. (2025). Integrated Application of Drought-Tolerant Phosphate Solubilizing Bacteria and Native P Source Improves P Availability with Sustainable Wheat Production. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-24.
- Maestre, R. B., Acuña, R. S., & Marcano, G. R. (2024). Germinación de semillas de leguminosas inoculadas con diferentes dosis de bioinsumos. *Revista ESPAMCIENCIA*, 15(1), 53-62.
- Maqueira-López, L. A., Roján-Herrera, O., Izquierdo-Collazo, A. I., García-Roque, O., & Páez-López, A. (2024). Productividad de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Parte II. Variabilidad del rendimiento en función del crecimiento. *Cultivos Tropicales*, 45(1), 1-7.
- Marchão, R. L., Silva, G. C. d., Andrade, S. R. M. d., Junior, F. B. d. R., Júnior, M. P. d. B., Haphonso, R. H., & Carvalho, A. M. d. (2025). Improving Soybean Development and Grain Yield by Complementary Inoculation with Growth-Promoting Bacteria *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Priestia*, and *Bacillus*. *Plants*, 14(3), 402. <https://doi.org/10.3390/plants14030402>
- Mazón-Suástegui, J. M., García-Bernal, M., Ojeda-Silvera, C. M., Batista-Sánchez, D., & Ruiz-Espinoza, F. H. (2022). Índice de tolerancia al estrés salino y análisis de crecimiento de dos variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Vigna unguiculata* L., Walp.), cultivadas en un medio salino (NaCl) y tratadas con medicamentos homeopáticos. *Terra Latinoamericana*, 40.
- Morales-Guevara, D. M., Dell'Amico-Rodríguez, J. M., Guerrero-Domínguez, L., & Santa Cruz-Suárez, A. (2024). Response of Bean Crops to Controlled Deficit Irrigation Applied at Different Stages of their Biological Cycle. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 33(2).
- Morales-Santos, Martha E., Peña-Valdivia, Cecilia B., García-Esteva, Antonio, Aguilar-Benítez, Gisela, & Kohashi-Shibata, Josué. (2017). Características físicas y de germinación en semillas y plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre, domesticado y su progenie. *Agrociencia*, 51(1), 43-62.
- Moreno-Reséndez, A., García-Mendoza, V., Reyes-Carrillo, J. L., Vásquez-Arroyo, J., & Cano-Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XX(1), 68-83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>

- Pliego-Marín, L., López-Baltazar, J., & Aragón-Robles, E. (2013). Características físicas, nutricionales y capacidad germinativa de frijol criollo bajo estrés hídrico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(SPE6), 1197-1209.
- Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, 128(6), 450-459.
- Shaffique, S., Shah, A. A., Peter, O., Injamum-ul-hoque, M., Elansary, H. O., Kang, S. M., ... y Lee, I. J. (2024). La rizobacteria *Priestia megaterium* cepa SH-19 mitiga los efectos peligrosos del estrés térmico a través de una red endógena de elucidación de metabolitos secundarios y señalización de regulación molecular. *BMC Biología Vegetal*, 24(1), 827.
- Shinde, K. S. (2024). Enhancing Drought Tolerance in Sorghum Plants through Bacterial Inoculation: A Study on Water Retention and Stomatal Conductance. *Research Advances in Microbiology and Biotechnology Vol. 9*, 109–117. <https://doi.org/10.9734/bpi/ramb/v9/2371G>
- Tanya-Morocho, Mariuxi, & Leiva-Mora, Michel. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola*, 46(2), 93-103.

Caracterización Biofísica de autohidrolizados de calamar gigante (*Dosidicus gigas*) mediante dispersión de rayos X de ángulo pequeño

Recibido en: 14/04/2025

Aprobado en: 20/04/2025

 10.46420/9786585756563cap4

Francisco Cadena Cadena 

Joe Luís Arias Moscoso* 

Ofelda Peñuelas-Rubio 

Leandris ArgenteL-Martínez 

Dulce Alondra Cuevas Acuña 

José Reyes González-Galaviz 

Aldo Fraijo-Valenzuela 

INTRODUCCIÓN

En todo el mundo se producen anualmente grandes cantidades de residuos procedentes de la transformación del calamar. Visceras, cabezas, aletas y piel representan más del 40% del peso total de este producto pesquero (Lee; Lian, 2010). El principal componente de los subproductos del calamar son las proteínas, que representan entre el 72 y el 77% de la masa sólida total (Lian et al., 2005).

Los hidrolizados de proteínas son derivados de proteínas que se descomponen en péptidos de distintos tamaños, que contienen aminoácidos esenciales útiles para fines industriales como la acuicultura o la alimentación animal (Lee; Lian, 2010; Lin; Ba-fang, 2006). El peso molecular de los hidrolizados de proteínas está relacionado con sus características fisicoquímicas, como la solubilidad, la viscosidad, el sabor y la capacidad de formar espumas y emulsiones (Caessens et al., 1999; Zhongrui et al., 2013).

El parámetro empleado habitualmente para controlar la hidrólisis de una proteína es el grado de hidrólisis (GH), definido como el porcentaje de enlaces peptídicos escindidos, que depende de la composición en aminoácidos de la materia prima (Nielsen et al., 2001). Un grado de hidrólisis (GH) entre el 1% y el 10% mejora las propiedades funcionales de los hidrolizados. Un GH de hasta el 10% se utiliza para alimentos especiales, y un GH del 40% puede utilizarse para producir hidrolizados útiles como productos esenciales (Vioque et al., 2001).

El alto contenido proteínico de los subproductos del procesado del calamar los hace adecuados para la hidrólisis proteolítica, generando péptidos y aminoácidos libres (Lian et al., 2005). La caracterización de la estructura del hidrolizado es necesaria para comprender los cambios conformacionales que sufren las proteínas en diferentes condiciones de hidrólisis. La estructura de algunas proteínas se ha investigado mediante dispersión de rayos X de ángulo pequeño (SAXS) en una

* Autor correspondiente: jarias.moscoso@itvy.edu.mx

técnica bien establecida que ha sido útil en el estudio de las propiedades estructurales de las proteínas (Park et al., 2009; Putnam et al., 2007). La dispersión de rayos X de soluciones de proteínas tiene un alto potencial en el estudio de cambios conformacionales biológicamente importantes en moléculas de proteínas y sus fluctuaciones estructurales en condiciones fisiológicas (Park et al., 2009). Un patrón de dispersión en solución representa un promedio de un conjunto de estructuras proteicas que son libres de fluctuar y, por lo tanto, no contiene información suficiente para reconstruir una estructura tridimensional completa (Putnam et al., 2007).

Sin embargo, los datos de dispersión en solución contienen una cantidad significativa de información, útil para diversos estudios de conformaciones de proteínas (Putnam et al., 2007). La dispersión de rayos X de proteínas se ha utilizado para la determinación de interacciones entre actina y péptidos de unión a actina intrínsecamente desordenados (Didry et al., 2012), así como para la evaluación de promedios ensamblados y rotacionales de mioglobina y lisozima (Park et al., 2009). En el presente trabajo se presenta un estudio sobre la influencia del pH en el peso molecular de los autohidrolizados y se analizan sus formas principales mediante SAXS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras

Los subproductos frescos del procesamiento de calamar (*Dosidicus gigas*), consistentes en cabezas y aletas, se obtuvieron de muestras de calamar gigante capturadas a mano con potera y compradas a pescadores locales (Bahía de Kino, Sonora, México) en mayo de 2017. Los subproductos fueron transportados en hielo al laboratorio dentro de las 24 h siguientes a su captura. Las cabezas y aletas se retiraron manualmente, se cortaron en trozos pequeños, se empacaron en bolsas de polietileno y se almacenaron a una temperatura de congelación (-25°C) para su posterior procesamiento.

Preparación de hidrolizados de proteínas

Los hidrolizados de proteínas se prepararon según lo descrito por Lian et al. (2005). Se utilizó la actividad de la proteasa endógena para la autólisis. Las muestras se homogeneizaron en una proporción 1:1 con agua y se dividieron en dos grupos. Cada mezcla se ajustó a pH 5,0 o pH 7,0. Ambos grupos se trocearon, se colocaron en vasos de precipitados de acero inoxidable y se incubaron a 55°C durante 2 h. Se tomaron alícuotas de 200 µL cada 30 minutos y se inactivó la actividad proteolítica endógena calentando a 100°C durante 5 minutos. El sobrenadante que contenía los hidrolizados se separó por centrifugación a 6000 × g durante 1 hora, se liofilizó (LABONCO Freeze Dry/Shell Freeze System, Freezone 12, EE.UU., n° de catálogo 77535-10) y se almacenó en bolsas selladas de polietileno a 24 ± 1°C.

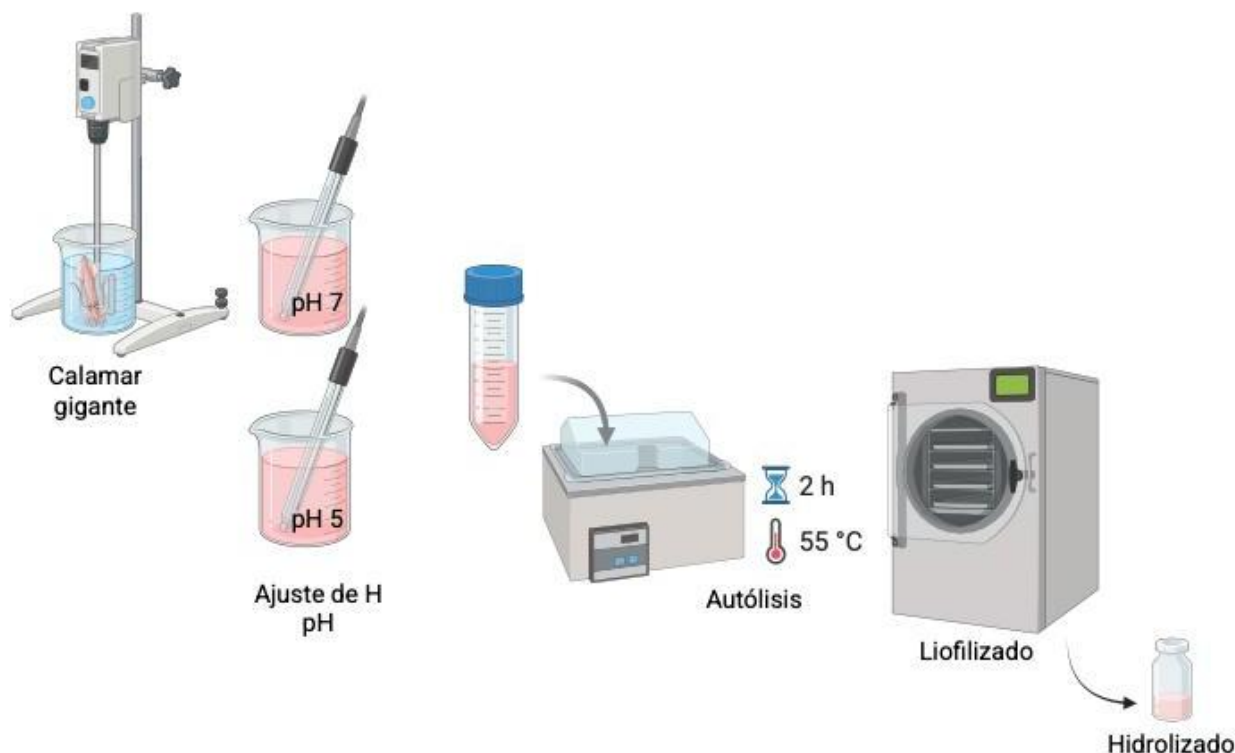


Figura 1. Proceso de producción del hidrolizado.

Grado de hidrólisis

El grado de hidrólisis (GH) se investigó según el método modificado descrito por Noman et al. (2018), con ligeras modificaciones. El volumen de NaOH se utilizó para calcular la cantidad de grupos amino libres. El contenido de nitrógeno total se analizó según el método Kjeldahl estándar (AOAC, 1995). El porcentaje de grupos amino libres y el GH se calcularon de la siguiente manera:

$$\text{Grupos aminos libres (\%)} = \frac{V \times C \times 0.014007}{W} \times 100$$

donde V (ml) es el volumen de NaOH (0,1 N) añadido, C es la concentración de la solución utilizada para la valoración (0,1 M NaOH) y W (g) es el peso de la muestra.

Modelización con SAXS

Las mediciones se realizaron mediante un Rigaku MicroMax +002 integrado para un generador de rayos X, 3 agujeros de alfiler, 2 cámaras a 1,50 m para SAXS y 0,5 m para WAXS, un sensor para la recogida de rayos difractados con una interfaz informática. Las muestras (5% p/v) se prepararon a partir de hidrolizados liofilizados con agua tridestilada, se homogeneizaron y se colocaron en cápsulas capton.

Se montaron alícuotas de 700 μ l de cada hidrolizado en el soporte interior de la cámara para SAXS. Se realizaron mediciones a los 3600, 7200 y 10800 segundos.

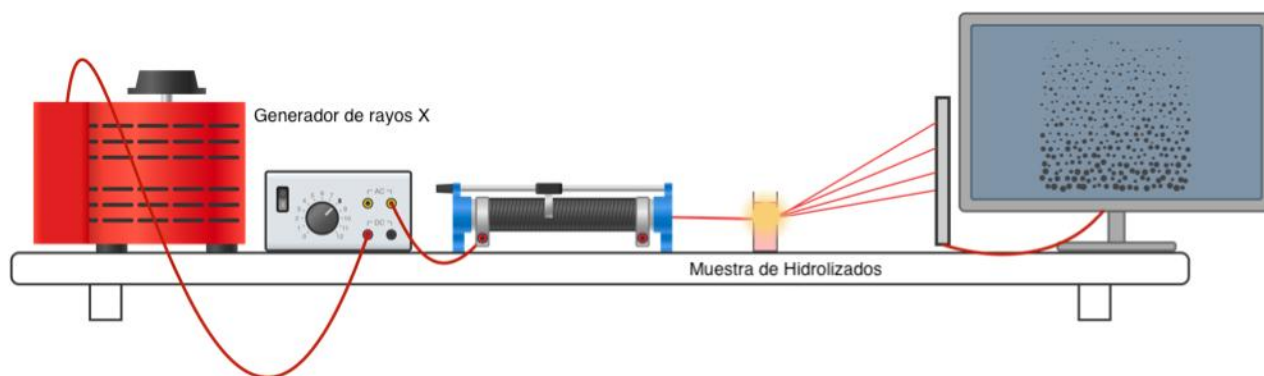


Figura 2. Evaluación de los hidrolizados mediante la técnica de rayos X.

Análisis de datos

El diseño estadístico utilizado para caracterizar los hidrolizados de subproductos de calamar jumbo se empleó para minimizar la variación en las repeticiones. Los datos comunicados son la media de al menos tres determinaciones. Las mediciones variaron en un 5% (Mitchell y Glover 2008). Las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestras se evaluaron mediante la prueba t de Student.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Grado de hidrólisis

Se prepararon hidrolizados de subproductos de calamar jumbo (cabezas, tentáculos y aletas) sometiendo la proteína a un proceso de autohidrólisis a pH 7 y 5. Se detectó la liberación gradual de péptidos en ambos sistemas (Figura 3). En ambos sistemas se detectó una liberación gradual de péptidos (Figura 3). Se observó un mayor aumento de la hidrólisis en 120 min, correspondiente a una DH del 13% a pH 7.0 y del 10.5% a pH 5.0. Se detectaron valores diferentes durante la hidrólisis de fuentes marinas similares (Lian et al., 2005), que son inferiores a los comunicados para los hidrolizados de calamar gigante. La hidrólisis de las vísceras, la piel, las aletas y las cabezas fue de aproximadamente un 20% de DH, como se informó en (Lian et al., 2005). En el presente estudio, el grado de hidrólisis puede haber aumentado debido al uso de las vísceras, ya que éstas tienen un alto contenido de enzimas proteolíticas (Guadix et al., 2000); esta enzima proteolítica adicional ayuda a conseguir una mejor hidrólisis de las proteínas. Altos valores de DH (30% a 50%) fueron reportados por Gimenez 2009 para hidrolizados de calamar gigante, y estos hidrolizados fueron producidos a partir de vísceras gelatinosas, donde los procesos para la obtención de gelatina consisten en separar únicamente la proteína que tiene la capacidad de formar gelatina; de esta manera se logran hidrolizados con un alto grado de hidrólisis más fácil (Gimenez et al., 2009a; Gimenez et al., 2009b).

La Figura 3 muestra los valores del grado de hidrólisis para ambos tratamientos. El grado de hidrólisis para el tratamiento a pH 7 fue mayor que para el tratamiento a pH 5. Este valor fue del 13% GH, y para el tratamiento a pH 5, fue del 10.5%. La razón de este comportamiento es que la actividad proteolítica en el músculo del calamar gigante (cabezas, tentáculos y aletas) fue a pH 6 y pH 10, lo que sugiere que las proteasas ácidas y alcalinas siempre están presentes en las partes del calamar; sin embargo, en diferentes proporciones (Ezquerria et al., 2002), esto está relacionado con el pH postmortem del calamar, que tiene un pH inicial de 6,7 para el músculo del manto de *Dosidicus gigas* y de 6,0 para *Gonatopsis borealis* (Ohashi et al., 1991; Yamanaka et al., 1995). Cada especie de calamar tiene un sistema enzimático único, y muchos autores indican que el contenido de enzimas es ácido y alcalino (Lian et al., 2005). Sin embargo, el sistema enzimático proteolítico de *Dosidicus gigas* es mayoritariamente alcalino (Ezquerria et al., 2002; Gimenez et al., 2009a; Ohashi et al., 1991), lo que podría explicar la diferencia entre los tratamientos.

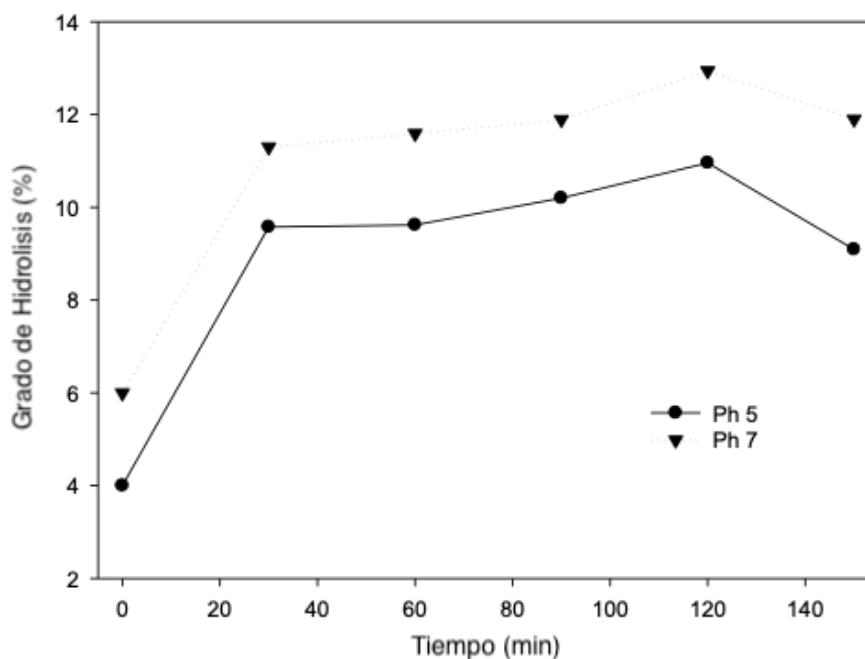


Figura 3. Efecto del tiempo y el pH en el grado de hidrólisis (GH) de los hidrolizados de proteína de calamar. Las muestras en círculo están a pH 5 y las muestras en triángulo están a pH 7.

Modelado SAXS

El perfil SAXS experimental de una macromolécula en solución es la diferencia entre la dispersión de la solución con y sin la proteína. Así pues, el perfil es aproximadamente igual a la diferencia entre las intensidades de dispersión de la macromolécula y el disolvente en el mismo volumen (Figura 4) (Förster et al., 2008).

El perfil de dispersión registrado proporciona información sobre la estructura global y la conformación de las moléculas estudiadas (Lipfert y Doniach, 2007). Para la reconstrucción, los

parámetros más frecuentemente extraídos de un perfil SAXS para una biomolécula en solución (que está suficientemente diluida para evitar los efectos de la interferencia entre partículas) son el R_g y la intensidad de dispersión frontal $I(0)$. Se obtienen a partir de la fórmula de Guinier para una pequeña transferencia de momento q ($q = 4\pi \sin(\theta)/\lambda$), donde 2θ es el ángulo de dispersión total y donde λ es la longitud de onda de los rayos X), trazando $\ln(I(q))$ frente a q^2 y ajustando la pendiente y el intercepto (Glatter y Kratky, 1982; Guinier, 1939). R_g es una caracterización sin modelo del tamaño molecular, e $I(0)$ puede relacionarse con el peso molecular de la siguiente manera:

$$I(0) = \kappa c (\Delta\rho)^2 (MW)^2 \quad (4)$$

donde κ es una constante de proporcionalidad que puede determinarse a partir de la medición de un patrón de peso molecular (por ejemplo, una proteína de peso molecular y concentración conocidos), c es la concentración de la macromolécula, $\Delta\rho$ es el contraste de densidad electrónica media de la molécula y MW es el peso molecular.

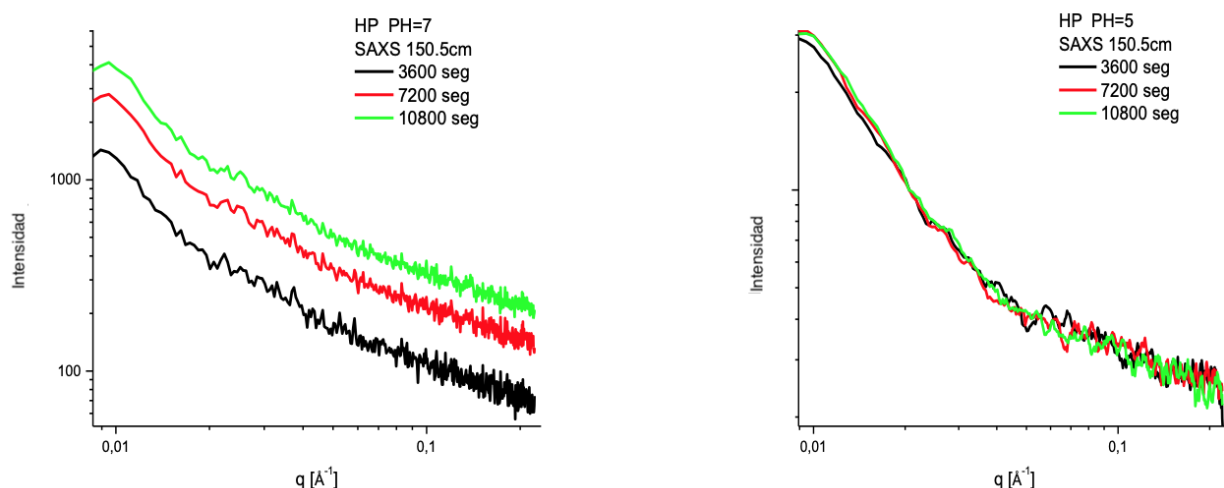


Figura 4. Colección de rayos X difractados para ambos tratamientos de hidrolizados de proteína de calamar.

Tabla 1. Relación de pendiente y modelo de caracterización del tamaño de las partículas en función del tiempo de exposición para cada tratamiento.

Tratamientos	Tiempo (s)	Pendiente (m)	(Rg)[Å]
pH5	3600	23.229	8.3478
	7200	22.572	8.2289
	10800	24.46	8.5662
pH7	3600	28.378	9.2268
	7200	28.806	9.2961
	10800	30.198	9.5180

(Rg)[Å]: Modelo de granulométrica.

De entrada, a partir de la Figura 2, que muestra las gráficas de I vs. Q, se observa un comportamiento cualitativo diferente en los sistemas con pH 5 y pH 7, es decir, en el sistema con pH 5, se observa que las curvas de I para los diferentes tiempos (3600, 7200 y 10800) de exposición se cruzan de forma irregular durante todo el tiempo de exposición, abarcando el intervalo de Guinnier, lo que se refleja en las pendientes obtenidas para el tiempo respectivo (Tabla 1), discrepando ligeramente con la relación de proporcionalidad directa entre la pendiente y el tiempo; Tal comportamiento no ocurre cuando el sistema contiene un pH de 7, como se muestra en la Figura 2, lo que también se refleja en la verificación de una proporcionalidad directa entre la pendiente y el tiempo (Tabla 1).

CONCLUSIONES

Este estudio demostró que el pH influye significativamente en la eficacia de la hidrólisis y en las propiedades estructurales de los hidrolizados de subproductos del calamar gigante. La mayor GH a pH 7 confirma el predominio de proteasas alcalinas en *Dosidicus gigas*, mientras que la menor GH a pH 5 sugiere una menor actividad enzimática en condiciones ácidas. El análisis SAXS corroboró aún más estos hallazgos, revelando comportamientos estructurales distintos entre las dos condiciones de pH.

Estos resultados tienen importantes implicaciones para la producción industrial de hidrolizados de proteína de calamar, ya que sugieren que la optimización del pH puede mejorar el rendimiento de la hidrólisis y las características de los péptidos. Futuros estudios podrían explorar el uso de enzimas exógenas o tratamientos combinados de pH para mejorar aún más la eficiencia de la hidrólisis y adaptar la funcionalidad del hidrolizado para aplicaciones específicas (por ejemplo, péptidos bioactivos y aditivos alimentarios).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adler-Nissen, J. (1979). Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid. *Agricultural and Food Chemistry*, 27: 1256 - 1262.
- Caessens, P.W., Daamen, W.F., Gruppen, H., Visser, S., Voragen, A.G. (1999). Hidrólisis de beta-lactoglobulina. 2. Peptide identification, SH/SS exchange, and functional properties of hydrolysate fractions formed by the action of plasmin. *Journal Agriculture and Food Chemistry*, 47: 2980 - 2990.
- Didry, D., Cantrelle, F.X., Husson, C., Roblin, P., Moorthy, A.M., Perez, J., Le Clainche, C., Hertzog, M., Guittet, E., Carlier, M.F., van Heijenoort, C., Renault, L. (2012). How a single residue in individual β -thymosin/WH2 domains controls their functions in actin assembly. *EMBO Journal*, 31: 1000 - 1013.
- Ezquerria, J.M., Haard, N., Ramírez-Olivas, R., Olivas-Burrola, M., Velazquez-Sánchez, C. (2002). Influence of harvest season on the proteolytic activity of hepatopancreas and mantle tissues from jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *J Food Biochem*, 26: 459 - 475.
- Förster, F., Webb, B., Krukenberg, K.A., Tsuruta, H., Agard, D., Sali, A. (2008). Integration of Small-Angle X-ray Scattering Data into Structural Modeling of Proteins and Their Assemblies. *J Mol Biol*, 382: 1089 - 1106.
- Giménez, B., Alemán, A., Montero, P., Gómez-Guillén, M.C. (2009a). Propiedades antioxidantes y funcionales de hidrolizados de gelatina obtenidos a partir de piel de lenguado y calamar. *Food Chem*, 114: 976-983.
- Giménez, B., Gómez-Estaca, J., Alemán, A., Gómez-Guillén, M.C., Montero, M.P. (2009b). Mejora de las propiedades antioxidantes de películas de gelatina de piel de calamar mediante la adición de hidrolizados de gelatina de calamar. *Food Hydrocolloid*, 23: 2022-2022.
- Glatter, O., Kratky, O. (1982). *Small angle X-ray scattering* Academic Press.
- Guadix, A., Guadix, E.M., Páez-Dueñas, M.P., González-Tello, P., Camacho, F. (2000). Procesos tecnológicos y métodos de control en la hidrólisis de proteínas. *Pharmaceutica*, 41: 79-89.
- Guinier, A. (1939). La diffraction des rayons X aux très petits angles: application à l'étude de phénomènes ultramicroscopiques. *Annales de physique*, 12: 161-237.
- Lee, C.M., Lian, P.Z. (2010). Bioproduction of Hydrolysate from Squid Processing Byproducts for Aquaculture Feed Ingredient and Organic Fertilizer, págs. 9 y 10. The Board of Governors for Higher Education, Estados Unidos.
- Lian, P.Z., Lee, C.M., Park, E. (2005). Characterization of squid-processing byproduct hydrolysate and its potential as aquaculture feed ingredient. *J Agr Food Chem*, 53: 5587-5592.
- Lin, L., Ba-fang, L. (2006). Radical Scavenging Properties of Protein Hydrolysates from Jumbo Flying Squid (*Dosidicus eschrichtii* Steenstrup) Skin Gelatin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(14): 2290-2295

- Lipfert, J., Doniach, S. (2007). Small-Angle X-ray Scattering from RNA, Proteins, and Protein Complexes. *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure*, 36: 307-327.
- Nielsen, P.M., Petersen, D., Dambmann, C. (2001). Improved method for determining food protein degree of hydrolysis. *Journal of Food Science*, 66: 642-646.
- Ohashi, E., Okamoto, M., Ozawa, A., Fijuta, T. (1991). Characterization of common squid using several freshness indicators. *Journal of Food Science*, 56: 161-174.
- Park, S., Bardhan, J.P., Roux, B., Makowski, L. (2009). Simulated X-ray scattering of protein solutions using explicit-solvent models. *Journal of Chemical Physics*, 130: 1-8.
- Putnam, C.D., Hammel, M., Hura, G.L., Tainer, J.A. (2007). X-ray solution scattering (SAXS) combined with crystallography and computation: defining accurate macromolecular structures, conformations and assemblies in solution. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 40: 191 -285.
- Vioque, J., Pedroche, J., del Mar Yust, M., Millán, F., Clemente, A. (2001). Obtención y aplicación de hidrolizados protéicos. *Revista Internacional de Grasas y Aceites*, 52: 132-136.
- Yamanaka, H., Matsumoto, M., Hatae, K., Nayaka, H. (1995). Studies on components off flavor in the muscle of american jumbo squid (*Dosidicus gigas*).

Evaluación de la calidad de yogurt con pitaya (*Stenocereus thurberi*) elaborado con una combinación de lactobacilos

Recibido em: 20/04/2025

Aprobado em: 01/05/2025

 10.46420/9786585756563cap5

Joe Luís Arias Moscoso 

Francisco Cadena Cadena* 

Ofelda Peñuelas-Rubio 

Leandris Argente-Martínez 

José Aurelio Leyva-Ponce 

María Luisa López Roa 

Issiel Ortega Alvarez 

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de alimentos saludables, nutritivos y bajos en calorías, pero sin sacrificar el sabor, el yogurt se destaca como una opción ideal. El yogurt es un producto lácteo fermentado ampliamente consumido en todo el mundo debido a su agradable sabor, valor nutricional y propiedades funcionales (Savaiano; Hutkins, 2021). Su producción involucra la fermentación de la leche mediante bacterias ácido-lácticas, principalmente *Lactobacillus* spp. y *Streptococcus thermophilus*, que transforman la lactosa en ácido láctico, lo que contribuye a su textura, acidez y estabilidad microbiológica. Además, el yogurt es reconocido por sus beneficios para la salud, incluyendo la mejora del microbiota intestinal y el refuerzo del sistema inmunológico, lo que ha impulsado su demanda y la investigación sobre su enriquecimiento con ingredientes funcionales (Marco et al., 2021).

En los últimos años, ha crecido el interés por la incorporación de frutas en productos lácteos como el yogurt, con el fin de mejorar su perfil sensorial y funcional (Fernández; Marette, 2017). La adición de frutas no solo proporciona azúcares naturales que pueden mejorar el sabor, sino también compuestos bioactivos como antioxidantes, vitaminas y fibra dietética, que contribuyen a la salud digestiva y reducen el riesgo de enfermedades crónicas (Granato et al., 2020). Entre las frutas de interés para la innovación en productos lácteos se encuentra la pitaya (*Stenocereus thurberi*), un fruto exótico originario de regiones áridas de América, apreciado por su alto contenido de antioxidantes, principalmente betalainas, así como su riqueza en fibra y compuestos fenólicos (Le Bellec et al., 2006; Ariffin, et al., 2009).

La incorporación de pitaya en el yogurt podría modificar sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales, debido a la interacción de los compuestos de la fruta con la matriz láctea y los microorganismos involucrados en la fermentación (López-Martínez et al., 2009, Ariffin et al., 2009).

* Autor correspondiente: fcadena.cadena@itvy.edu.mx

Aspectos como el pH, la acidez titulable, la viscosidad y la sinéresis pueden verse alterados dependiendo de la concentración de pitaya utilizada. Adicionalmente, la presencia de pigmentos naturales en la fruta podría modificar la percepción del color y la apariencia del producto final, lo que podría influir en la aceptabilidad del consumidor (Spence, 2020).

Dado que la aceptabilidad de un alimento fermentado está estrechamente ligada a sus características sensoriales, es fundamental evaluar parámetros como sabor, olor, apariencia, textura y aceptabilidad global en los yogures enriquecidos con diferentes concentraciones de pitaya (Cais-Sokolinska; Pikul, 2022). Estudios previos han demostrado que la incorporación de frutas en el yogurt puede mejorar su aceptabilidad sensorial y su valor nutricional, pero también pueden surgir desafíos en cuanto a estabilidad y sinéresis (Ares; Jaeger, 2023; Cais-Sokolińska; Pikul, 2022; Athayde-Souza et al., 2022; Stone et al., 2020).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es evaluar la calidad del yogurt elaborado con distintas concentraciones de pitaya (5%, 10% y 15%) y una combinación de cepas de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus*, analizando su impacto en la calidad, las propiedades fisicoquímicas y sensoriales. Se busca determinar la formulación óptima que combine los beneficios nutricionales y funcionales de la pitaya con una adecuada calidad estructural y estabilidad del producto final. Con esta investigación, se pretende aportar información relevante para el desarrollo de nuevos productos lácteos fermentados con valor agregado, que respondan a la creciente demanda de alimentos saludables y funcionales en el mercado actual.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se utilizó leche cruda proveniente de los establos del poblado “Vicam”, Guaymas, Sonora. El cultivo se elabora a partir de fermentos lácticos de cepas de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus*. Se evaluaron tres formulaciones con distintos porcentajes de pitaya (5,10 y 15%) con la siguiente codificación (yogurt con 5%=Y-C5, yogurt con 10% = Y-C10 y yogurt con 15% = Y-C15) y un control (yogurt sin fruta Y-S), por triplicado; las determinaciones fisicoquímicas (color, textura, pH y acidez titulable) así como las evaluaciones sensoriales se determinaron en el Laboratorio de pulsos ultrasónicos del Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui.

Proceso de elaboración de yogurt

El proceso de la elaboración del yogurt tomó como referencia a Venica et al. (2016). La temperatura de la leche fresca se elevó hasta $85.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ durante 5 min, fue enfriado a $43.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y de inmediato fue inoculado con cultivo láctico liofilizado *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus*. El proceso de incubación se efectuó a una temperatura de $43.0 \pm 0.10^{\circ}\text{C}$ hasta que el yogurt alcanzó un pH de 4.50 ± 0.02 . Los yogurts se enfriaron hasta 4.0°C en un baño de agua con hielo, aplicando agitación

manual intermitente, se les agrego la fruta colocándolos en envases de 1 L con tapa. Los yogurts fueron almacenados a una temperatura de $4.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ durante 12 h para su posterior evaluación experimental.

Análisis de calidad del yogurt

La composición de los distintos yogures se determinó mediante el uso de un analizador de leche ultrasónico (Lactoscan SL60, MILKOTRONIC LTD, Nova Zagora, Bulgaria). Para el análisis, 15 ml de muestra se colocaron en el vial; hecho esto se situó en el tubo capilar del equipo que arrojó la lectura, procediendo a registrar los datos de porcentaje de proteína, lactosa, grasa, sólidos no grasos y densidad.

El pH y Acidez titulable (AT) fueron medidos cada 60 min (1 h) hasta alcanzar un pH final de 4.50 ± 0.02 . El pH fue medido con un potenciómetro (HANNA modelo HI 2211, Woonsocket RI, USA), mientras que la Acidez titulable (AT) (g ácido láctico por 100 g de producto) se midió con el método establecido de Huang et al. (2022) con la siguiente fórmula:

$$AT = \frac{V \times 0.9}{m}$$

Donde V es el volumen gastado (ml) de hidróxido de sodio 0.1 M, m es la masa (g) de la muestra en gramos y 0.9 es el factor de conversión del ácido láctico.

Fisicoquímica del yogurt (pH, acidez, colorimetría y sinéresis)

El pH y AT final del yogurt se midieron al final de la fermentación y después de 12 h de refrigeración utilizando la metodología descrita anteriormente. El color se valoró con un colorímetro FRU (Modelo WR 10 QC, Inc., Tokio, Japón) registrando los parámetros L^* (luminosidad), a^* (tendencia al rojo), b^* (tendencia al amarillo), C (Chroma) y Hue (tonalidad). Un volumen de 30 ml de yogurt a 12 h de su elaboración y refrigerado (4°C) fue colocado en cajas de Petri para su medir las variables. La sinéresis se determinó por centrifugación (Thermo Scientific, CL30, CHATEAU-GONTIER, Francia) siguiendo el método de Robitaille et al. (2009). Una cantidad de 25.0 g de muestra se colocaron en tubos Falcón de 50 ml por duplicado de cada sub replica de los tratamientos y se centrifugaron a $600 \times g$ por 10.0 min a una temperatura de 4.0°C . La sinéresis (%) se calculó mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ de Sinéresis} = \frac{\text{Peso del sobrenadante (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100$$

Análisis proximales al yogurt

La composición proximal del yogurt se determinó de acuerdo a los métodos de la AOAC (2016). De cada tratamiento, la materia seca se determinó por el método de secado (930.15) en una estufa de aire a 100°C . El contenido de proteína se realizó mediante el método Kjeldahl (2.062); mientras que el porcentaje de cenizas se cuantificó mediante el método incineración (942.05) con una mufla (Lindberg,

Thermo Scientific, Waltham, MA) a 550°C por 4 h. El contenido de grasa se midió efectuando el método Gerber (33.3.27) utilizando ácido sulfúrico y alcohol amílico.

Evaluación sensorial

Un total de 36 panelistas semi-entrenados participaron en la prueba sensorial de consumidor y evaluaron los atributos sensoriales del yogurt (color blanco, apariencia, olor, sabor, viscosidad y aceptación global). Cada panelista recibió tres recipientes de plástico codificados con tres dígitos seleccionados al azar que contenían 15.0 g de muestra por cada tratamiento. Una escala hedónica de 7 puntos (1= me disgusta mucho y 7= me gusta mucho) se utilizó en la evaluación sensorial. Adicionalmente, una prueba sensorial triangular se realizó basada en la propuesta de Sánchez-Macías (2012) y el análisis de datos planteado por Meilgaard et al. (2007).

Durante la prueba se diseñaron tres combinaciones con los tratamientos (Y-S, Y-C5, Y-C10 y Y-C15) que fueron asignados de forma aleatoria a cada panelista semi-entrenado aplicando el mecanismo de elección forzada. Es preciso indicar que las pruebas sensoriales se realizaron después de almacenar los tratamientos de yogurt 12.0 h a 4.0°C después de su elaboración.

Análisis estadístico

Se implementó un diseño experimental completamente aleatorizado, seguido de un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la existencia de diferencias significativas entre las variables químicas analizadas en la leche cruda empleados en la producción de yogurt. Adicionalmente, se aplicó una prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$) para identificar las diferencias específicas entre los tratamientos.

Para el análisis de las variables fisicoquímicas del yogurt, se empleó igualmente un diseño completamente aleatorizado con un arreglo factorial (3×4), considerando tres formulaciones distintas, cada una con tres repeticiones. Este diseño permitió evaluar tanto el efecto individual como la interacción de la fruta en las concentraciones empleadas sobre las características del producto final.

Se realizó un análisis descriptivo de las variables fisicoquímicas, y un análisis de varianza, seguido de una prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$) (Steel et al., 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de calidad del yogurt elaborado con diferentes concentraciones de pitaya (*Stenocereus thurberi*) reveló variaciones significativas en algunos de sus componentes, lo que indica que la adición de esta fruta influye en la composición fisicoquímica del producto final se puede observar en la Tabla 1.

El contenido de agua se mantuvo relativamente constante entre los tratamientos, sin diferencias significativas ($p>0.05$), con valores entre 91.28% y 91.41%. Esto sugiere que la incorporación de pitaya en concentraciones de hasta el 15% no afectó sustancialmente la retención de agua en el yogurt.

En cuanto a los sólidos totales (ST), se observó un ligero aumento conforme se incrementó la concentración de pitaya, siendo el yogurt Y-C15 el que presentó el mayor valor (11.72%), aunque sin diferencias estadísticamente significativas respecto a los demás tratamientos. Esto puede deberse a la contribución de los componentes sólidos de la pitaya (Rahulan et al., 2022).

Tablas 1. Análisis de calidad del yogurt.

Componente	Tratamientos			
	Y-S	Y-C5	Y-C10	Y-C15
Agua (%)	91.41 ^a ± 0.27	91.28 ^a ± 0.43	91.30 ^a ± 0.02	91.30 ^a ± 0.92
ST (%)	11.59 ^a ± 0.05	11.60 ^a ± 0.07	11.70 ^a ± 0.53	11.72 ^a ± 0.02
SNG (%)	8.51 ^c ± 0.12	8.68 ^a ± 0.05	8.98 ^b ± 0.67	8.90 ^b ± 0.15
Grasa (%)	3.08 ^a ± 0.02	2.79 ^b ± 0.02	3.02 ^a ± 0.75	3.02 ^a ± 0.07
Proteína (%)	3.11 ^c ± 0.02	3.18 ^a ± 0.31	3.27 ^b ± 0.17	3.30 ^b ± 0.85
Lactosa (%)	4.68 ^a ± 0.32	4.70 ^a ± 0.07	4.89 ^b ± 0.05	4.87 ^b ± 0.02
Densidad (kg/m ³)	29.59 ^c ± 0.27	31.28 ^a ± 0.25	30.38 ^b ± 0.03	30.40 ^b ± 0.22

ST: sólidos totales; SNG: sólidos no grasos; Y-S: Yogurt elaborado con leche sin fruta; Y-C5: Yogurt elaborado con leche con 5% de pitaya; Y-C10: Yogurt elaborado con leche con 10% de pitaya; Y-C15: Yogurt elaborado con leche con 15% de pitaya. Letras diferentes entre filas indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Los sólidos no grasos (SNG) mostraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p<0.05$). El yogurt sin fruta (Y-S) presentó el menor valor (8.51%), mientras que el Y-C5 tuvo el valor más alto (8.68%), seguido de Y-C10 (8.98%) y Y-C15 (8.90%). La tendencia indica que la incorporación de pitaya mejora la concentración de SNG, lo que podría tener implicaciones en la textura y estabilidad del producto (Cornejo-Ramírez et al., 2021).

En cuanto al contenido de grasa, el yogurt Y-C5 mostró el valor más bajo (2.79%), con diferencias significativas respecto a los demás tratamientos, que presentaron valores alrededor del 3.02%. La variabilidad en el contenido de grasa podría atribuirse a una posible interacción entre la fruta y los componentes lácteos, lo que afecta la emulsificación y distribución de la grasa (Hernández-Briones et al., 2021).

El contenido de proteína aumentó significativamente con la adición de pitaya. El yogurt sin fruta presentó el menor valor (3.11%), mientras que el Y-C15 tuvo el mayor (3.30%). Este aumento puede

deberse a la contribución proteica de la pitaya o a una mejor retención de proteínas durante la fermentación (Hernández-Briones et al., 2021).

La lactosa también mostró una tendencia creciente con la adición de pitaya. El yogurt Y-S presentó un valor de 4.68%, mientras que los tratamientos con fruta tuvieron valores significativamente mayores, alcanzando hasta 4.89% en Y-C10. Este aumento podría estar relacionado con una mayor disponibilidad de azúcares fermentables en la mezcla (Rahulan et al., 2022).

Por último, la densidad del yogurt se vio influenciada por la presencia de pitaya, con el valor más bajo en el tratamiento sin fruta (29.59 kg/m³) y el más alto en Y-C5 (31.28 kg/m³), seguido de los tratamientos con 10% y 15% de pitaya, que presentaron valores similares (30.38 y 30.40 kg/m³). La mayor densidad en los tratamientos con pitaya podría deberse a la presencia de fibra y otros componentes estructurales de la fruta.

En general, los resultados sugieren que la adición de pitaya en concentraciones de hasta el 15% puede mejorar algunos aspectos de la calidad del yogurt, como el contenido de sólidos no grasos, proteínas y lactosa, sin afectar significativamente el contenido de agua (Silva et al., 2023).

Características fisicoquímicas

Los resultados obtenidos en la Tabla 2. muestran la influencia de la adición de pitaya en diferentes proporciones sobre las características fisicoquímicas del yogurt. Se evaluaron los parámetros de pH, acidez titulable y sinéresis, encontrando diferencias significativas entre los tratamientos.

En cuanto al pH, la leche de partida presentó un valor de 6.56, mientras que el yogurt sin fruta (Y-S) tuvo un pH de 6.64. Este ligero aumento podría atribuirse a los procesos de fermentación y a la interacción con los compuestos de la leche. Al incorporar la pitaya, se observaron fluctuaciones en el pH, con valores de 6.57, 6.60 y 6.60 para Y-C5, Y-C10 y Y-C15, respectivamente. Estos valores sugieren que la adición de pitaya en un 10-15% no altera significativamente la acidez inicial del yogurt, manteniéndolo dentro de un rango adecuado para su estabilidad (Cruz et al., 2013).

La acidez titulable (AT), expresada en g/100 g de ácido láctico, mostró una ligera disminución con la adición de pitaya. Mientras que el yogurt sin fruta presentó un valor de 0.170, los tratamientos con 5, 10 y 15% de pitaya mostraron valores de 0.169, 0.166 y 0.167, respectivamente. Aunque estas diferencias son pequeñas, podrían deberse a la composición de la fruta y su interacción con los ácidos orgánicos generados durante la fermentación (Penna et al., 2021).

La sinéresis, indicador clave de la estabilidad del yogurt, presentó un incremento con el aumento del porcentaje de pitaya. Mientras que Y-S mostró un 40.63% de sinéresis, los tratamientos con 10% y 15% de pitaya presentaron valores significativamente mayores (46.16% y 46.18%, respectivamente). Este aumento sugiere que la adición de pitaya afecta la capacidad de retención de agua en la matriz del yogurt, lo que podría deberse a cambios en la estructura proteica o en la interacción con los polifenoles y otros compuestos de la fruta (Lucey, 2022).

En síntesis, la incorporación de pitaya en el yogurt modifica sus características fisicoquímicas de manera dependiente de la concentración. Mientras que el pH y la acidez titulable presentan cambios leves, la sinéresis aumenta significativamente con mayores porcentajes de pitaya, lo que podría influir en la estabilidad y aceptabilidad del producto final. Futuras investigaciones podrían centrarse en estrategias para reducir la sinéresis y mejorar la textura del yogurt con pitaya, optimizando su formulación para mejorar su calidad y estabilidad.

Tabla 2. Características fisicoquímicas del yogurt.

Componente	Tratamientos			
	Y-S	Y-C5	Y-C10	Y-C15
pH	6.56 ^a ± 0.07	6.64 ^b ± 0.03	6.57 ^a ± 0.02	6.60 ^b ± 0.02
AT	0.170 ^a ± 0.05	0.169 ^a ± 0.07	0.166 ^b ± 0.03	0.167 ^b ± 0.02
Sinéresis (%)	40.11 ^a ± 1.08	40.63 ^b ± 1.05	46.16 ^c ± 1.05	46.18 ^c ± 1.09

AT: Acidez Titulable (g/100 g de ácido láctico); pH: Potencial hidrogeno; Y-S: Yogurt elaborado con leche sin fruta; Y-C5: Yogurt elaborado con leche con 5% de pitaya; Y-C10: Yogurt elaborado con leche con 10% de pitaya; Y-C15: Yogurt elaborado con leche con 15% de pitaya. Letras diferentes entre filas indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Análisis colorimétrico

El análisis colorimétrico del yogurt se puede observar en la Tabla 3, donde se observa que la adición de pitaya (*Stenocereus thurberi*) influyó en las características de color del producto, con variaciones significativas en los parámetros L*, a*, b*, Chroma y Hue, lo que sugiere que la fruta afecta la percepción visual del yogurt.

La luminosidad (L)* fue alta en todos los tratamientos, indicando un color claro característico del yogurt. Sin embargo, se observó un ligero aumento con la adición de pitaya. El tratamiento Y-S (sin fruta) presentó la menor luminosidad (98.72), mientras que los yogures con pitaya alcanzaron valores superiores (99.54-99.66). Esto podría atribuirse a la presencia de sólidos solubles y compuestos de la pitaya que modifican la reflectancia del producto (Pathare et al., 2023).

El parámetro a*, que indica la tendencia hacia el rojo o el verde, mostró valores negativos en todos los tratamientos, indicando una tendencia al color verdoso. El yogurt sin fruta (Y-S) presentó el valor más bajo (-1.03), mientras que los yogures con pitaya mostraron valores más altos (-0.93 a -0.97), con diferencias significativas entre tratamientos. Esto sugiere que la pitaya modifica sutilmente la tonalidad del yogurt, reduciendo la tendencia verdosa (Obón et al, 2022; Pathare et al., 2023).

El parámetro b*, que representa la tendencia al amarillo, mostró un aumento progresivo con la adición de pitaya. El yogurt sin fruta presentó el valor más bajo (6.44), mientras que los tratamientos con pitaya presentaron valores significativamente mayores (6.53 a 6.75). Este incremento puede estar

relacionado con la presencia de pigmentos naturales en la pitaya que intensifican los tonos cálidos del yogurt (Obón et al, 2022; Pathare et al., 2023).

El Chroma, que mide la saturación del color, también aumentó con la incorporación de pitaya, pasando de 7.11 en Y-S a 7.46 en Y-C10 y Y-C15. Esto indica que los yogures con pitaya presentaron un color más intenso y definido en comparación con el yogurt sin fruta.

El Hue, que representa la tonalidad del color, presentó diferencias significativas entre los tratamientos. El yogurt sin fruta y Y-C5 mostraron valores más altos (115.18-115.30), mientras que los tratamientos con 10% y 15% de pitaya presentaron valores ligeramente menores (115.09). Aunque la diferencia es mínima, sugiere un leve ajuste en la percepción del color con el aumento de la concentración de fruta.

En general, los resultados muestran que la adición de pitaya modifica el color del yogurt, aumentando su claridad y saturación, con un leve cambio en la tonalidad hacia colores más cálidos. Estos cambios pueden influir en la aceptabilidad sensorial del producto, ya que el color es un factor determinante en la percepción de calidad y preferencia del consumidor (Spence, 2020).

Tabla 3. Análisis colorimétrico del yogurt.

Variable	Tratamientos			
	Y-S	Y-C5	Y-C10	Y-C15
L*	98.72 ^a ± 0.17	99.66 ^{ab} ± 0.16	99.56 ^c ± 0.15	99.54 ^c ± 0.12
a*	-1.03 ^a ± 0.07	-0.93 ^b ± 0.13	-0.96 ^c ± 0.10	-0.97 ^c ± 0.32
b*	6.44 ^a ± 0.19	6.53 ^b ± 0.15	6.74 ^c ± 0.33	6.75 ^c ± 0.22
Chroma	7.11 ^a ± 0.27	7.15 ^b ± 0.18	7.46 ^c ± 0.12	7.46 ^c ± 0.12
Hue	115.18 ^a ± 0.35	115.30 ^a ± 0.27	115.09 ^b ± 0.32	115.09 ^b ± 0.02

L*: Luminosidad; a*: Tendencia al rojo; b*: Tendencia al amarillo; Chroma: Saturación de color; Hue: Tonalidad; Y-S: Yogurt elaborado con leche sin fruta; Y-C5: Yogurt elaborado con leche con 5% de pitaya; Y-C10: Yogurt elaborado con leche con 10% de pitaya; Y-C15: Yogurt elaborado con leche con 15% de pitaya. Letras diferentes entre filas indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Evaluación sensorial

El análisis sensorial del yogurt revela el impacto de la adición de pitaya en la percepción del producto por parte de los consumidores. Se evaluaron distintos atributos como color, apariencia, olor, sabor, viscosidad y aceptabilidad global (Tabla 4.).

En cuanto al color blanco, el yogurt sin fruta (Y-S) obtuvo una puntuación de 7.00, mientras que los tratamientos con 5%, 10% y 15% de pitaya mostraron valores menores (6.00 en todos los casos), aunque sin diferencias significativas entre ellos. Esto sugiere que la incorporación de la fruta afecta ligeramente la percepción del color blanco en el yogurt, lo que podría estar relacionado con los pigmentos naturales de la pitaya (Castro-Ureña, 2016).

La apariencia (brillo) y el olor mostraron valores constantes de 6.00 en todos los tratamientos, sin diferencias significativas. Esto indica que la adición de pitaya no afecta perceptiblemente estos atributos, lo que es favorable para mantener la estabilidad organoléptica del yogurt.

El sabor del yogurt sí presentó diferencias significativas entre los tratamientos. Mientras que el yogurt sin fruta obtuvo una puntuación de 5.00, los tratamientos con pitaya mostraron valores crecientes con la concentración de fruta, alcanzando 6.30, 6.67 y 6.90 para Y-C5, Y-C10 y Y-C15, respectivamente. Esto indica que la adición de pitaya mejora la aceptación del sabor, lo que podría atribuirse a su dulzura natural y su perfil aromático (Quiroz-González et al., 2018).

La viscosidad no mostró variaciones entre los tratamientos, manteniéndose en 5.00 en todos los casos. Esto sugiere que la adición de pitaya no afecta de manera significativa la percepción de viscosidad del yogurt.

Tablas 4. Análisis Sensorial del yogurt.

Componente	Tratamientos			
	Y-S	Y-C5	Y-C10	Y-C15
Color blanco	7.00 ^a ± 0.23	6.00 ^a ± 0.38	6.00 ^a ± 0.82	6.00 ^a ± 0.92
Apariencia (Brillo)	6.00 ^a ± 0.65	6.00 ^a ± 0.37	6.00 ^a ± 0.23	6.00 ^a ± 0.87
Olor	6.00 ^a ± 0.44	6.00 ^a ± 0.47	6.00 ^a ± 0.35	6.00 ^a ± 0.56
Sabor	5.00 ^a ± 0.71	6.30 ^b ± 0.68	6.67 ^c ± 0.73	6.90 ^a ± 0.12
Viscosidad	5.00 ^a ± 0.75	5.00 ^a ± 0.68	5.00 ^a ± 0.73	5.00 ^a ± 0.12
Aceptabilidad global	5.68 ^a ± 0.32	6.70 ^b ± 0.07	6.89 ^c ± 0.05	6.87 ^c ± 0.02

Y-S: Yogurt elaborado con leche sin fruta; Y-C5: Yogurt elaborado con leche con 5% de pitaya; Y-C10: Yogurt elaborado con leche con 10% de pitaya; Y-C15: Yogurt elaborado con leche con 15% de pitaya; Letras diferentes entre filas indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Finalmente, la aceptabilidad global mostró un incremento significativo con la adición de pitaya. El yogurt sin fruta obtuvo un puntaje de 5.68, mientras que Y-C5, Y-C10 y Y-C15 lograron valores de 6.70, 6.89 y 6.87, respectivamente. Esto sugiere que la incorporación de pitaya en un 10-15% mejora la aceptabilidad del producto, posiblemente debido a su impacto positivo en el sabor y la percepción sensorial general (Quiroz-González, et al., 2018).

La adición de pitaya al yogurt mejora significativamente su aceptabilidad, principalmente por su efecto positivo en el sabor. Sin embargo, no afecta de manera considerable otros atributos como olor, apariencia o viscosidad. Esto sugiere que la pitaya podría ser una adición valiosa para mejorar la aceptación del yogurt sin alterar negativamente su textura o apariencia.

CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el efecto de la adición de diferentes concentraciones de pitaya (*Stenocereus thurberi*) en las características fisicoquímicas, colorimétricas y sensoriales del yogurt. En cuanto a la composición fisicoquímica, se observó que la adición de pitaya no alteró significativamente el contenido de agua, pero incrementó los sólidos totales, sólidos no grasos (SNG), proteínas y lactosa, lo que sugiere un enriquecimiento nutricional del yogurt. Sin embargo, se registró un aumento en la sinéresis, especialmente en concentraciones del 10% y 15%, lo que podría afectar la estabilidad del producto. El pH y la acidez titulable mostraron variaciones mínimas, manteniéndose dentro de rangos adecuados para la calidad del yogurt. El análisis colorimétrico reveló que la pitaya modificó las propiedades ópticas del yogurt, aumentando su luminosidad (L^*), saturación (Chroma) y tendencia al amarillo (b^*), lo que podría mejorar su atractivo visual. Estas alteraciones fueron más evidentes en los tratamientos con mayor concentración de fruta. La evaluación sensorial confirmó que la adición de pitaya mejoró significativamente la aceptabilidad global del yogurt, principalmente debido a un mayor agrado por el sabor. Aunque el color blanco disminuyó ligeramente, otros atributos como olor, apariencia y viscosidad no se vieron afectados, lo que respalda la viabilidad de su incorporación. La pitaya en concentraciones de hasta el 15% puede ser un ingrediente funcional y atractivo para la elaboración de yogurt, mejorando su perfil nutricional y sensorial. Este trabajo contribuye al desarrollo de productos lácteos innovadores, aprovechando las propiedades de frutas nativas como la pitaya.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al **Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui (ITVY)** por brindar las herramientas y el apoyo necesarios para la realización de esta investigación, en especial al laboratorio de Pulsos ultrasónicos, por los equipos y técnicas; y de manera especial, expresamos un sincero agradecimiento al **Nelson Antonio González Amarillas** por su asesoría y valiosas contribuciones durante el desarrollo de este proyecto. Su propuesta fue fundamental para alcanzar los objetivos planteados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ariffin, A. A., Bakar, J., Tan, C. P., Rahman, R. A., Karim, R., Loi, C. C. (2009). Essential fatty acids of pitaya (dragon fruit) seed oil. *Food Chemistry*, 114(2), 561-564.
- AOAC - Association of Official Analytical Chemists (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 20th ed. Rockville: AOAC International.
- Ares, G., Jaeger, S. R. (2023). Check-all-that-apply (CATA) questions with consumers in practice: Experimental considerations and impact on outcome. *Food Quality and Preference*, 104, 104755.

- Athayde-Souza, P. B., Santos, M., Souza-Carneiro, J., Rodrigues-Arruda-Pinto, V.; Nunes-Carvalho, E. (2022). The effect of different sugar substitute sweeteners on sensory aspects of sweet fruit preserves: A systematic review. *Journal of Food Processing and Preservation*. 46(3), 16291.
- Cais-Sokolińska, D., Pikul, J. (2022). Sensory profile and consumer acceptability of functional yogurts enriched with plant ingredients. *Journal of Dairy Science*, 105(5), 3940-3953.
- Castro Ureña, K. (2016). Proyecto impulsa la pitahaya como colorante natural. *Semanario Universidad*. Recuperado de <https://semanariouniversidad.com/universitarias/proyecto-impulsa-la-pitahaya-colorante-natural/>.
- Cornejo-Ramírez, Y. I., Martínez-Camacho, A. R., Aguilar-Palazuelos, E., Calderón-Castro, A. (2021). Physicochemical and microstructural properties of yogurt enriched with cactus pear (*Stenocereus spp.*) fruit. *Food Bioscience*, 41, 101012.
- Cruz, A. G., Faria, J. A. F., Saad, S. M. I., Bolini, H. M. A., Sant'Ana, A. S., Cristianini, M. (2013). High pressure processing and pulsed electric fields: Potential use in probiotic dairy foods processing. *Trends in Food Science; Technology*, 33(2), 67-82.
- Fernández, M. A., Marette, A. (2017). Potential health benefits of combining yogurt and fruits based on their probiotic and prebiotic properties. *Advances in Nutrition*, 8(1), 155S-164S.
- Granato, D., Barba, F. J., Bursac Kovačević, D., Lorenzo, J. M., Cruz, A. G., Putnik, P. (2020). Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 11, 93-118.
- Hernández-Briones, A., Velázquez-Martínez, J. R., Hernández-Sánchez, H., Hernández-López, D. (2021). Effect of pitaya (*Stenocereus thurberi*) on the nutritional and functional properties of yogurt. *Journal of Food Science and Technology*, 58(8), 3025-3035.
- Huang, W., Fan, D., Li, W., Meng, Y., Cheng-yi T. (2022). Rapid evaluation of milk acidity and identification of milk adulteration by Raman spectroscopy combined with chemometrics analysis. *Vibrational Spectroscopy*. 123: 103-440.
- Le Bellec, F., Vaillant, F., Imbert, E. (2006). Pitahaya (*Hylocereus spp.*): A new fruit crop, a market with a future. *Fruits*, 61(4), 237-250.
- López-Martínez, L. X., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Lee, C.-H., Parkin, K. L., García, H. S. (2009). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican pitaya (*Stenocereus spp.*). *Food Chemistry*, 116(4), 915-921.
- Lucey, J. A. (2022). Cultured dairy products: Scientific and technological considerations. In *Advanced Dairy Chemistry* (pp. 345-384). Springer.
- Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., ...; Smid, E. J. (2021). Health benefits of fermented foods: Microbiota and beyond. *Current Opinion in Biotechnology*, 44, 94-102.
- Meilgaard, M., Civille, G.V., Carr, B. T. (2007). The spectrum descriptive analysis method. *Sensory Evaluation Techniques*. 49(24), 2376–2377.

- Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M., Fernández-López, J. A. (2022). Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits in yogurt. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(12), 3789-3799.
- Pathare, P. B., Opara, U. L., Al-Said, F. A.-J. (2023). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 16(1), 1-28.
- Penna, A. L. B., Gurram, S., Barbosa-Cánovas, G. V. (2021). Physicochemical and rheological characterization of pitaya-enriched yogurt. *LWT-Food Science and Technology*, 147, 111642.
- Quiroz-González, B., García-Mateos, R., Corrales-García, J.; Colinas-León, M. T. (2018). Pitaya (*Stenocereus* spp.): an under-utilized fruit. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 20: 82-100.
- Rahulan, R., Panda, S. K., Bindu, J. (2022). Influence of fruit purees on density and rheological properties of stirred yogurt. *International Journal of Dairy Technology*, 75(3), 567-577.
- Robitaille, G.; Tremelay, A.; Petitclerc, D.; Britten, M. (2009). Effect of centrifugation conditions on whey separation in yogurt. *Journal of Dairy Science*. 92(8): 3456-3463.
- Sánchez-Macías, D., Moreno-Indias, I., Álvarez, S., Clevelan, M., Castro, N., Argüello, A., del Rosario Fresno, M. (2012). Sensory analysis of full-, reduced- and low-fat cheese elaborated with raw goat milk. *Journal of Applied Animal Research*, 40(2), 124–132.
- Savaiano, D. A., Hutkins, R. W. (2021). Yogurt, cultured fermented milk, and health: A systematic review. *Nutrition Reviews*, 79(5), 599-614.
- Silva, H. L. A., Balthazar, C. F., Esmerino, E. A., Vieira, A. H., Cappato, L. P., Neto, R. P. C., Cruz, A. G. (2023). Physicochemical and sensory properties of yogurt added with tropical fruit powders. *LWT-Food Science and Technology*, 173, 114368.
- Spence, C. (2020). On the relationship(s) between color and taste/flavor. *Experimental Psychology*, 67(2), 99-111.
- Steel, R. G. D., Torrie, J. H., Dickey, D. A. (1997). Principles and procedures of statistics: A biometrical approach (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Stone, H., Bleibaum, R. N., Thomas, H. A. (2020). Sensory evaluation practices (5th ed.). Academic Press.
- Venica, C. I.; Perotti, M. C.; Wolf, I. V.; Bergamini, C. V. (2016). Optimization of yogurt fermentation process: effects of temperature and starter culture concentration. *Journal of Dairy Research*. 83(2): 210-218.

Extracto del wereke (*Ibervillea sonora*) como antagonista de *Fusarium* spp.

Recibido en: 29/04/2025

Aprobado en: 14/05/2025

 10.46420/9786585756563cap6

Rodolfo Montes-Rentería 

Alba Rocio Ochoa-Meza* 

Francisco Guadalupe Bojórquez-Corral 

Julio César García Urías 

INTRODUCCIÓN

El género de hongos *Fusarium* es responsable de múltiples enfermedades en la agricultura, provocando pérdidas económicas y disminuyendo la producción, tanto en campo abierto como en ambientes controlados, siendo el monocultivo y la intensidad en el sistema de producción los factores que magnifican el impacto de la enfermedad (Payán et al., 2024). Los síntomas observados en la planta van desde la marchitez en la parte aérea hasta la pudrición de raíces (Beltrán et al., 2023).

La literatura no refiere condiciones ambientales que limiten el desarrollo de este género de patógenos en las zonas agrícolas, por lo que se considera como alto riesgo (Ortega, 2024). Especies como *F. oxysporum* y *F. solani* se han reportado como los principales agentes causales de enfermedades en las plantas, junto a géneros como *Phytophthora*, *Rhizoctonia* y *Phytium*, señalados como complejo fitopatogénico, que en condiciones favorables causan enfermedades y provocan pérdidas económicas, afectando desde un 60% hasta un 100% de la producción agrícola cuando hay presencia de estos hongos en el sustrato.

En México, el hongo *Fusarium* reduce la productividad agrícola y tiene un efecto significativo en la seguridad alimentaria, ya que algunas especies de este, por ejemplo, *Fusarium oxysporum* es responsable de pérdidas en cultivos de tomate, trigo, maíz, frijol, fresa, chícharos, pepino, papaya, papa y plantas ornamentales (Ríos-Hernández et al., 2021).

La amplia variedad de cultivos en que el hongo *Fusarium* se desarrolla supone un reto transcendental cuando se intenta el control o la erradicación del patógeno por los agricultores, puesto que las estructuras de reproducción (y de sobrevivencia) se adaptan a las condiciones encontradas en el suelo, en las raíces y en la parte vegetativa (Izquierdo-García et al., 2024). El complejo de hongos del género *Fusarium* ocasiona enfermedades caracterizadas por marchitez, tizones, pudriciones en cultivos ornamentales y forestales en ecosistemas agrícolas y naturales. El hongo puede sobrevivir en el suelo como micelio o como esporas en ausencia de sus anfitriones, y si se encuentra cerca una planta hospedera.

* Autor correspondiente: aochoa.meza@itvy.edu.mx

La infección puede iniciar en las raíces, o bien, en partes de la planta por encima del suelo (Soto et al., 2020).

El control químico del hongo *Fusarium* hasta principios del Siglo XXI, era el método preferido por los productores para mitigar los efectos de la presencia del hongo; sin embargo, las consecuencias ambientales y en la salud de las personas, provocados por los agroquímicos, han promovido el análisis de nuevas estrategias para el manejo de este patógeno (Civieta-Bermejo et al., 2021).

Los extractos vegetales constituyen esa alternativa puesta a prueba para contrarrestar el efecto de agentes causales de enfermedades de interés agrícola. Se han elegido los extractos vegetales por su origen natural, por ser de costo accesible, por su facilidad para obtenerlo y por su limitada posibilidad para contaminar el ambiente y afectar la salud de las personas (Quintero-Rodríguez et al., 2024).

Además, a pesar de que el uso de compuestos naturales presenta un espectro de toxicidad más estrecho y tienen un impacto ambiental menor, estos compuestos, son fácilmente degradados por vías enzimáticas, reduciendo el impacto ambiental a largo plazo (Cazco, 2023). Esto se ha pensado que funcione puesto que en la agricultura los primeros agentes para el control de plagas y enfermedades fueron polvos o extractos de plantas utilizados antes del surgimiento de los compuestos orgánicos e inorgánicos sintéticos en la primera mitad del siglo XX (Zelaya-Molina et al., 2022).

Una planta que ha sido estudiada en el desierto sonorense como agente para el control de algunas enfermedades bacterianas, principalmente, es el wereke (*Ibervillea sonora*). En el campo se observa que la planta no es atacada por insectos o por patógenos, por lo que se asume que los metabolitos secundarios producidos por la especie ayudan a mantenerla sana, esto a pesar de no contar con ningún manejo por el ser humano. De acuerdo con Sinagawa-García et al. (2015), el análisis fitoquímico de la raíz ha dado como resultado, de manera cualitativa, la presencia de flavonoides, alcaloides, terpenos, coumarinas, quinonas, fenoles, esteroides, terpenos, saponinas, taninos, glicósidos cianogénicos, sesquiterpenlactonas y azúcares reductores.

A partir del descubrimiento de estos metabolitos se ha demostrado que existe actividad antioxidante y antimicrobiana de la raíz del wereke, presentado actividad inhibitoria en microorganismos Gram (+) como: *Staphylococcus aureus* y *Clostridium perfringens*; sin embargo, en bacterias Gram (–) como *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae* no se observó un efecto inhibitorio (Romero, 2024). Respecto a la actividad antifúngica, el wereke se ha probado, a través de extractos metanólicos, contra *Fusarium verticillioides* y *Aspergillus niger*, mostrando actividad antifúngica (Ruiz-Bustos et al., 2009), siendo las cucurbitacinas el compuesto al que se le atribuye su actividad antifúngica (Torres et al., 2020).

El wereke, o guareque, es una planta dioica perenne que pertenece a la familia Cucurbitácea, la distribución ecológica es identificada en zonas semiáridas de los estados de Sinaloa, Sonora y Baja California. La planta es rastrera o trepadora, puede ser anual o perenne y presentan flores unisexuales (Morales y Siles, 2013). A nivel mundial, la familia botánica mencionada es importante debido a su uso con fines alimenticios.

La raíz del wereke, parte de la planta utilizada para la obtención de extractos, sobresale por encima del suelo, su forma general es redonda, como una calabaza, con un cuello que conduce a los brotes y varias raíces gruesas se extienden hacia abajo y puede llegar a ser muy grande y presenta un olor característico parecido al de una papa en la tierra; las flores masculinas son racimosas con pétalos pubescentes, el fruto es ovalado de color verde y en su madurez cambia su color a naranja; las semillas se encuentran cubiertas con una pasta de color rojo; después de trabajar con material fresco de wereke la nariz y la garganta se sienten secos, irritados y amargo, sensación que queda en los dedos, incluso después de varias lavadas (Avendaño, 2008).

Esta investigación pretende encontrar una forma para combatir el hongo *Fusarium* spp. a partir del extracto vegetal de wereke, que realice funciones antifúngicas, identificar la dosis adecuada y que pueda ser aceptable para el control del hongo, lo cual añade la ventaja de cuidar el ambiente mediante el uso de un producto que protege al suelo y a los microorganismos benéficos. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue la evaluación de las propiedades antifúngicas del wereke como agente de control de *Fusarium* spp. mediante evaluación *in vitro* para la identificación de la dosis letal mínima y dosis mínima inhibitoria.

MATERIAL Y MÉTODOS

El material vegetal fue extraído de plantas de wereke recolectado entre las Cuatrocientas y La Huichaca, paraje cercano al poblado de Pótam, Guaymas, Sonora, con las coordenadas 27°33'22.5" N y 110°25'42.6" W. El ensayo *in vitro* fue llevado a cabo en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Yaqui en el laboratorio de Biotecnología.

Obtención del extracto de wereke

Se procesó la raíz fresca del wereke, es decir, a un día de la cosecha, con un rallador y se maceraron 500 g en 5 L de etanol-agua (70:30 v/v) (Vargas-Arispuro et al., 2005) conservándolo durante ocho días a 25°C, en condiciones de oscuridad (Reyes, 1995). Transcurrido el tiempo de maceración, el extracto se filtró sobre gasas para eliminar el material vegetal de mayor tamaño utilizando una bomba de vacío EV-40L, un matraz kitazato, embudo de porcelana y papel Whatman #5. Posteriormente, la mezcla se llevó al rotavapor a una temperatura de 75°C durante 30 minutos para disminuir el solvente. Al concluir el procedimiento, el extracto se vació en placas de Petri para secarlo en un deshidratador Hamilton Beach a 40°C durante 22 horas, obteniendo una concentración del extracto, de 20000 ppm.

Diseño experimental

El diseño experimental fue un diseño factorial y no completamente aleatorizado y se realizó con 5 tratamientos por triplicado con cada cepa: el tratamiento 1 (T1), 500 ppm del extracto wereke; tratamiento 2 (T2), 800 ppm del extracto; tratamiento 3 (T3), 1000 ppm del extracto, tratamiento 4 (T4), testigo, sin aplicación del extracto y tratamiento 5 (T5), fungicida comercial 1000 ppm de Clorotanilil®.

El análisis estadístico fue realizado en el paquete estadístico SPSS mediante comparaciones múltiples de medias con la prueba de Tukey.

Inóculo de *Fusarium*

Para la reproducción de las cepas del hongo se utilizó agar papa dextrosa (PDA) esterilizado en autoclave durante 15 minutos a 120°C a 20psi. El medio se acidificó con ácido tartárico al 10% y fue vaciado en placa de petri de 5 cm. Se inocularon 10 µL de *Fusarium* en placas de agar PDA por 7 a 10 días de 25 °C - 28 °C para su esporulación. Las cepas evaluadas fueron F02, F05 y F13, que pertenecen a la colección microbiana del Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui.

Preparación de los bioensayos in vitro

Una vez que las cepas alcanzaron la etapa de esporulación, se procedió a la siembra utilizando la técnica de placa envenenada (Ramírez-Méndez et al., 2024). Se adicionó el extracto al medio de cultivo. Previamente, el extracto se disolvió en una solución alcohol-agua (1:1). La mezcla se homogenizó en tubos de ensayo falcón y se vertió en placas de Petri (5 cm). Una vez que el medio polimerizó a temperatura ambiente, por picadura central (Valverde-Rodríguez et al., 2024) se inoculó el hongo. La medición del crecimiento radial se realizó con un vernier a los 5, 7 y 9 días post inoculación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos del experimento indican que el crecimiento del hongo fue aumentando conforme el paso del tiempo. Los resultados muestran un patrón claro en el crecimiento del hongo con algunos tratamientos, destacándose por su capacidad para inhibir el crecimiento del patógeno en las primeras etapas del experimento. El análisis proporciona información valiosa sobre la efectividad de diferentes tratamientos en la inhibición del crecimiento fúngico y puede ser útil para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en fitopatología y control biológico.

Tabla 1. Comparaciones múltiples con la prueba de Tukey con $\alpha=0.05$ por tratamiento, cepa y tiempo.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Medida cuadrática	F	Significancia
Modelo corregido	23.63 ^a	28			
Intersección	103.874	1	0.827		
Tratamiento	15.676	4	103.874	106.015	0.000
CEPA	0.295	2	3.919	13311.463	0.000
Tiempo	2.080	2	0.147	502.210	0.000
Tratamiento*Cepa	0.796	8	1.040	18.874	0.000
Tratamiento*Tiempo	4.295	8	0.100	133.301	0.000
Cepa*Tiempo	0.022	4	0.537	12.751	0.000
Tratamiento*Cepa*	0.125	16	0.005	68.806	0.000
Tiempo	0.125	16	0.08	0.689	0.610
Error	127.162	45	0.008	0.1084	0.000
Total	23.288	44			
Total corregido					

a: $R^2 = 0.995$ (R al cuadrado ajustada = 0.985). Fuente: elaboración propia.

El ajuste en el modelo ($r^2=0.995$) indica diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos; esto indica que las diferentes concentraciones aplicadas tienen diferencias significativas en el crecimiento del hongo. Por su parte, el análisis de los resultados por cepa indica que estas muestran diferencia significativa en el crecimiento cuando se les aplica el tratamiento del wereke. Respecto al tiempo, el análisis sugiere que el crecimiento de las cepas del hongo será afectado por el tiempo sembrado en el medio de cultivo establecido.

Respecto a las interacciones del tratamiento y cepa del hongo existe diferencia significativa respecto al crecimiento del hongo, significando que el crecimiento del hongo si estará afectado por la dosis del wereke aplicado. La interacción dada entre tratamiento y tiempo, se muestra estadísticamente una diferencia, sugiriendo que el crecimiento del hongo estará afectado por la cantidad de wereke aplicados en el medio de cultivo y los días que transcurran. Por otro lado, la interacción entre la cepa y el tiempo no muestra diferencia significativa, indicando que el tiempo de exposición del hongo a las dosis del wereke no tiene un efecto en el crecimiento.

Al comparar el crecimiento radial (cm) del hongo en el medio enriquecido se observa que la cepa F02 y F05 son estadísticamente diferentes; es decir, la respuesta a la dosis del wereke está en función de la cepa analizada. Respecto a la cepa F13, comparada con la cepa F02 y F05, es estadísticamente diferente. Entonces, la cepa se afecta en forma significativa por el tratamiento de wereke.

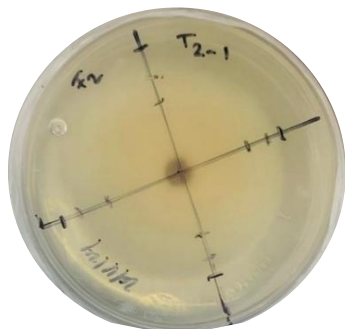
En contraparte, el análisis estadístico entre tratamientos indica que, independientemente de las dosis del extracto aplicado en el medio de cultivo donde la cepa se desarrolla, el crecimiento radial del hongo se sostiene. Existe diferencia significativa entre los tratamientos T1, T2 y T3 respecto al tratamiento control y el tratamiento testigo. Estos resultados sugieren que las dosis utilizadas para este experimento no representan una solución para inhibir el crecimiento de *Fusarium* en las cepas evaluadas.

La comparación de medias, entre el factor días de medición del crecimiento radial indica diferencias estadísticamente significativas. El tiempo influye sobre el crecimiento y existe una relación directa: conforme pasa el tiempo, el crecimiento de las cepas aumenta.



Figura 2. Crecimiento a través del tiempo de la cepa F02 de *Fusarium spp.* Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 2 se muestra el desempeño de la cepa F02, donde se observa que no hubo diferencias entre el crecimiento presentado a la concentración de 500 y 1000 ppm, mientras que el tratamiento 800 ppm presentó una ligera inhibición del crecimiento para los tres tiempos de muestreo, así mismo, tanto el control como el fungicida comercial presentaron la misma tendencia de crecimiento para los tiempos de muestreo evaluados.



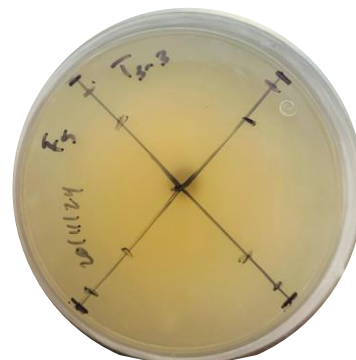
a. Cepa F02 con 800 ppm de extracto



b. Cepa F02 con 800 ppm de extracto



c. Cepa F05 con 800 ppm de extracto



d. Cepa F05 con 1000 ppm de extracto



e. Cepa F13 con 800 ppm de extracto



f. Cepa F13 con 1000 ppm de extracto

Figura 3. Crecimiento micelial observado a los 9 días del bioensayo de biocontrol de extracto de wereke contra especies de *Fusarium*. Nota: cada línea negra representa los días a los que se realizó la medición del crecimiento. Fuente: elaboración propia.

En la cepa F05 (Figura 4) se observa que la sensibilidad de esta cepa es mayor durante los primeros cinco días post inoculación, la concentración de 1000 ppm equivalente en porcentaje de inhibición al

control sin extracto, el más eficiente. Esta cepa también mostro una mayor sensibilidad al fungicida comercial.

Para la cepa F13 se observa que las concentraciones 800 y 1000 ppm fueron más eficientes para inhibir el crecimiento del hongo, sin embargo, estadísticamente no existen diferencias significativas entre ellos; la cepa F13 mostró mayor sensibilidad al fungicida comercial a los cinco días y manteniendo un crecimiento sostenido durante los días siete y nueve post inoculación.



Figura 4. Crecimiento de la cepa F05 de *Fusarium spp.* Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que el tiempo es un factor determinante para la inhibición del crecimiento de las cepas estudiadas, es decir, la efectividad del extracto está limitada por la duración de la exposición al patógeno. Incluso, para el producto de origen químico, el crecimiento es sostenido desde el día 5 hasta el día 9.



Figura 5. Desempeño de La cepa F13 en el medio adicionado con wereke. Fuente: elaboración propia.

El análisis de los subconjuntos homogéneos, respecto al factor Tratamiento, los resultados indican que el T4 pertenece a un subconjunto, el T2 se ubica dentro de otro subconjunto y, finalmente, los T2, T3 y T1 están en otro subconjunto. Por ende, el análisis indica que no existe diferencia entre los

tratamientos del wereke. Respecto a la interacción de cepa, el análisis de subconjuntos indica que no existe diferencia en el crecimiento de las cepas, ya que la varianza se ubica en un mismo subconjunto. Mientras, el análisis de los subconjuntos de la variable Tiempo (días), los resultados indican que existe diferencia entre los días 5 y 9.

La concentración del extracto es una de las variables que pueden analizarse en posteriores investigaciones con el wereke para promover el efecto inhibitorio del *Fusarium spp*; por ejemplo, la concentración del 20% de los extractos de salvia (*Salvia officinalis*) y tanaceto (*Tanacetum vulgare*) demostraron un fuerte efecto inhibitorio del hongo, demostrando que los polifenoles y los flavonoides les confieren la actividad antifúngica (Kursa et al., 2022). Por su parte, Seepe et al. (2021) demostraron que una concentración por debajo de 1.0 mg ml⁻¹ de hojas de *Combretumery throphyllumy* de *Withania somnifera* también tienen un efecto inhibitorio.

Tabla 2. Comparación del crecimiento (%) entre cepas por tratamiento a través del tiempo.

Periodo de medición (días)	Tratamiento	Incremento en el crecimiento radial (%)		
		Cepa F02	Cepa F05	Cepa F13
5 al 7	T1	41,4	34,92	47,39
	T2	35,86	48,75	49,74
	T3	41,25	39,75	44,71
	T4	0*	34,43*	0*
	T5	41	53,97	63,64
7 al 9	T1	19,45	16,59	4,64
	T2	17,17	17,26	15,74
	T3	20,23	23,21	16,33
	T4	0*	49,18*	0*
	T5	23,1	28,73	31,38
5 al 9	T1	68,67	57,67	54,79
	T2	59,09	74,86	73,28
	T3	70,05	71,49	68,19
	T4	0*	49,18	0*
	T5	73,87	98,42	99,99

* Placas de Petri contaminadas. Fuente: elaboración propia.

Otros extractos que se han probado para el control del hongo estudiado en este experimento, y que han demostrado su efectividad, son elaborados a partir de la cúrcuma y del tomate. Mientras que el

extracto de cúrcuma destruye las paredes celulares del hongo (Cheng et al., 2018), el extracto del tomate inhibe el crecimiento micelar de algunas especies de hongos del género *Fusarium* (Satish et al., 2007).

La revisión de los resultados sugiere que la eficacia de los extractos vegetales del wereke dependen de la concentración utilizada; en este experimento y para las cepas estudiadas, los resultados no reflejan una inhibición adecuada *in vitro*, pudiendo buscar otras alternativas, por ejemplo, aplicaciones foliares o como tratamiento en el suelo.

Es bien sabido que los extractos de plantas pueden no ser tan efectivos cuando se compara con un producto de síntesis química, sin embargo, su uso puede ser más seguro para el medio ambiente y menos perjudicial para la salud humana y animal, por lo que se recomienda realizar pruebas de sensibilidad del hongo y ajustar las dosis en experimentos posteriores. El uso del extracto del wereke es una opción para continuar explorando en la producción agrícola y es útil como elemento para el cuidado del ambiente y cuando se combina con otras prácticas agrícolas sostenibles.

CONCLUSIONES

El extracto del wereke no tiene efecto significativo en el control del fitopatógeno *Fusarium spp.* pero no se descarta que en otras dosis o con otro solvente pueda tener mayor efecto. Los resultados de este trabajo sugieren que el extracto del wereke no constituye elemento inhibitorio del crecimiento del hongo *Fusarium*, con las cepas estudiadas. La concentración del extracto utilizado en el medio de cultivo no sugiere efectividad del wereke como agente antifúngico.

El tiempo es un factor importante en el crecimiento del hongo, encontrando una relación directa entre el tiempo y el crecimiento radial.

Se recomienda probar diferentes dosis de wereke e intentar probar diferentes soluciones en la preparación de los extractos hidroalcohólicos ya que generalmente se utilizó una solución de 7:3 v/v.

AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Aurelio Leyva Ponce, al Dr. Leandris Argente Martínez, a las personas de la comunidad originaria de Pótam, al personal del laboratorio de Biotecnología del Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Yaqui y a todos aquellos que, de forma directa o indirecta, participaron en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avendaño, A. (2008). La diabetes mellitus su identificación, tratamiento y control a través de la medicina tradicional en algunas comunidades del estado de Hidalgo. Universidad Intercultural del Estado de México. San Felipe del Progreso: Estado de México.

- Beltrán, M., Delgado, J., Valdivia, A., Hernández, A., & García, A. (2023). First report of *Fusarium equisetica* using root and crown rot in tomato in Mexico. Plant Disease, 10.1094/PDIS-10-22-2494-PDN. Advance online publication. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-22-2494-PDN>.
- Cazco, P. (2023). Síntesis verde de nanopartículas de hierro a partir de *Piper aduncum* (matico) para evaluar su actividad bactericida en muestras del Río Chibunga. [Tesis de pregrado inédita]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba: Ecuador.
- Cheng, C., Long, L., Zhang, F., Chen, Q., Chen, C., Yu, X., Liu, Q., Bao, J., & Long, Z. (2018). Antifungal activity, main active components and mechanism of *Curcuma longa* extract against *Fusarium graminearum*. PLoS ONE, 13(3): e0194284. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194284>.
- Civieta-Bermejo, B., Cabrera-de la Fuente, M., González-Morales, S., Benavides, A., y Sandoval-Rangel, A. (2021). Residuos de repollo para biocontrol de *Fusarium* spp. en el cultivo de tomate. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, (26). 95-104. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2940>.
- Izquierdo-García, L., Carmona-Gutiérrez, S., Moreno-Velandia, C., Villarreal-Navarrete, A., Burbano-David, D., Quiroga-Mateus, R., Gómez-Marroquín, M., Rodríguez-Yzquierdo, G., & Betancourt-Vásquez, M. (2024). Microbial based biofungicides mitigate the damage caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* Race 1 and improve the physiological performance in banana. Journal of Fungi, 10, 419. <https://doi.org/10.3390/jof10060419>.
- Kursa, W., Jamiolkowska, A., Wyrostek, J., Kowalski, R. (2022). Antifungal effect of plant extracts on the growth of the cereal pathogen *Fusarium* spp. An *in vitro* study. Agronomy, 12, 3204. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123204>.
- Morales, D., y Siles, S. (2013). Identificación de los principales componentes de la raíz de wereque, extraíbles en medio acuoso, por GC-MS. Avances en Ciencias e Ingeniería, 4(2): 15-21.
- Ortega, M. (2024). Evaluación in vitro de cepas de *Bacillus* spp., en el control de *Fusarium oxysporum*. [Tesis de pregrado inédita]. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador.
- Payán, M., López, C., Molina-Cárdenas, L., Vega, T., López, P., Valenzuela-Tirado, A., & Tirado, M. (2024). First report of *Fusarium falciforme* causing root rot and wilt on strawberry in Sinaloa, Mexico. Plant Disease, Epub ahead of print. PMID: 38616397. <https://doi.org/10.1094/pdis-02-24-0343-pdn>.
- Quintero-Rodríguez, E., Montoya-Vargas, M., López-Luján, L., Guzmán-Cabrera, S., Aristizábal-Sepúlveda, O., y Bedoya-Pérez, J. (2024). Evaluación del efecto de extractos vegetales para el control de enfermedades poscosecha del aguacate Hass. Revista Politécnica, 20(40): 173-185. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n40a11>.
- Ramírez-Méndez J., Hernández-Castillo F., Gallegos-Morales G., Jasso-Cantú, D., Arredondo Valdés, R. y Tucuch-Pérez M. (2024). Efectividad biológica de extractos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens* sobre *Pythium aphanidermatum* y *Rhizoctonia solani* in vitro. Revista Mexicana de Fitopatología 42(4): 40. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-23>

- Reyes, B. (1995). Comparación de los extractos alcohólico y acuoso de *Anthemis nobilis* y caracterización de un nuevo glicósido deterénico de *Stevia subpebescens* LAG. [Tesis de licenciatura]. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Rios-Hernández, T., Uc-Varguez, A., & Evangelista-Martínez, Z. (2021). Control biológico de *Fusarium oxysporum*, agente causal de la pudrición del cormo en gladiolo, mediante estreptomicetos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(3), 391-413. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2105-3>.
- Romero, R. (2024). Evaluación de la actividad de extractos y particiones bioactivas de cultivos de *Bacillus sp* endófitos aislados de *Ibervillea sonora* (S. Watson) Greene contra el linfoma murino L5178Y-R. [Tesis de doctorado inédita]. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León.
- Ruiz-Bustos, E., Velázquez, C., Garibay-Escobar, A., García, Z., Plascencia-Jatomea, M., Cortez-Rocha, M., Hernández-Martínez, J., Robles-Zepeda, R. (2009). Antibacterial and antifungal activities of some Mexican medicinal plants. *Journal of Medicinal Food*, 12(6): 1398-402. doi: 10.1089/jmf.2008.0205.
- Satish, S., Raghavendra, M., & Raveesha, K. (2007). Antifungal potentiality of some plant extracts against *Fusarium sp*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 42: 618-625.
- Seepe, H., Ramakadi, T., Lebepe, C., Amoo, S., & Nxumalo, W. (2021). Antifungal activity of isolated compounds from the leaves of *Combretum erythrophyllum* (Burch.) Sond. and *Withania somnifera* (L.) Dunal against *Fusarium* pathogens. *Molecules*, 26(16): 4732; <https://doi.org/10.3390/molecules26164732>.
- Sinagawa-García, S., Gutiérrez-Díez, A., Mora-Olivo, A., Juárez-Aragón, M., Torres-Castillo, J. (2015). Características descriptivas de la raíz de wereke (*Ibervillea sonora* Greene) y generalidades bioquímicas de su extracto acuoso. *Phyton (Buenos Aires)*, 84(2): 358-367.
- Soto, B., Campos, R., y López, P. (2020). Gestión de prevención del hongo *Fusarium* raza en la producción bananera de Ecuador. *REPIQUE*, 2: 69-86. <https://doi.org/10.31876/repique.v2i2.180>.
- Torres, H., Ianni, F., Robles, R., López-Romero, J., Vidal-Gutiérrez, M., Jacobi, M., Galarini, R., Camaioni, E., Sardella, R., & Marcotullio, M. (2020). Quantitative analysis of cucurbitane-typetriterpenes in *Ibervillea sonora* eextracts: Relationship study with their antiproliferative activity. *Steroids*, 161: 108676. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2020.108676>.
- Valverde-Rodríguez, A., Cornejo, A., Villanueva, N., y Campos, M. (2024). Bacterias y hongos entomopatógenos en el manejo de *Brevicoryne brassicae* (Homoptera: Aphididae) en los cultivos de la col. *Siembra*, 11(1): e4994.
- Vargas-Arispuro, I.C.; R. Reyes-Báez, G. Rivera-Castañeda, M. Martínez-Téllez, I. (2005). Antifungal lignans from the creosote bush. *Industrial Crops and Products*, 22(2): 101107.

Zelaya-Molina, L., Chávez-Díaz, I., Cruz-Cárdenas, C., Ruíz-Ramírez, S., y Rojas-Anaya, E. (2022). Control biológico de plagas en la agricultura mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(especial 27): 69-79.<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i27.3251>.

Ciencias agrícolas



Optimización del cultivo de trigo cristalino mediante el uso de enmiendas (yeso agrícola) para mejorar la calidad del grano

Recibido em: 10/04/2025

Aprobado em: 19/04/2025

 10.46420/9786585756563cap7

Jose L. Felix Fuentes 

Marco A. Gutierrez Coronado* 

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum spp.*) es uno de los cereales más importantes a nivel mundial, siendo un componente esencial en la dieta humana y una materia prima fundamental para la industria alimentaria. El trigo duro se cultiva a nivel mundial en 13,5 millones de hectáreas en 2020/2021, lo que equivale al 6,2% de la superficie de trigo siendo un pilar de la seguridad alimentaria global (Martínez-Moreno et al., 2022). Sin embargo, la producción de trigo enfrenta desafíos significativos, como la degradación de los suelos, el agotamiento de nutrientes y las condiciones climáticas adversas, lo que ha llevado a la búsqueda de estrategias sostenibles para mejorar tanto el rendimiento como la calidad del grano (López-Bellido et al., 2012).

En este contexto, el uso de enmiendas agrícolas se ha posicionado como una alternativa viable para optimizar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo así el desarrollo del cultivo y la calidad final del grano (Diacono; Montemurro, 2011). Las enmiendas, que pueden ser orgánicas (como compost, estiércol o biochar) o inorgánicas (como yeso agrícola o cal), contribuyen a corregir problemas de acidez, mejorar la estructura del suelo, incrementar la disponibilidad de nutrientes y promover la actividad microbiana beneficiosa (Moises et al., 2022). Estos factores son determinantes en la síntesis de proteínas, el contenido de gluten y otros parámetros cualitativos del trigo, que son esenciales para su uso en panificación y otros procesos industriales (Peña, 2007).

La calidad del grano de trigo está influenciada por múltiples factores, entre los que destacan las prácticas agronómicas, las condiciones ambientales y las características genéticas del cultivo (Gooding, 2017). Estudios recientes han demostrado que la aplicación de enmiendas orgánicas, como el compost de estiércol, puede incrementar el contenido de proteína en el grano, mientras que enmiendas minerales, como el yeso, mejoran la absorción de azufre, un nutriente clave para la formación de gluten (Corrales-Maldonado et al., 2014). Asimismo, el uso de estas enmiendas ha mostrado efectos positivos en la

* Autor correspondiente: mgutierrez@itson.edu.mx

retención de humedad y la reducción de estrés hídrico, lo que se traduce en una mejor calidad industrial del trigo (Agegnehu et al., 2016).

A pesar de estos avances, aún existen vacíos de conocimiento en cuanto a la dosificación óptima de enmiendas y su impacto a largo plazo en la sostenibilidad de los agroecosistemas trigueros. Por ello, se busca analizar el cultivo de trigo y su relación con la calidad del grano mediante el uso de yeso agrícola.

Recientemente, la atención en la calidad de los alimentos sobre la cantidad ha cambiado los objetivos de la investigación para aumentar el valor nutricional del trigo estimado a través de diferentes parámetros, como el contenido de proteína, la absorción de agua y el color de la harina (Colasuonno et al., 2019)

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de yeso agrícola con micronutrientes, ácidos húmicos y fúlvicos, mediante mediciones relacionadas a la calidad del grano de trigo.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo agrícola 2023-2024, dentro de las instalaciones del Campo Experimental Norman E. Borlaug (CENEB), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

La siembra se realizó el 6 de diciembre de 2023, con la variedad Cirno C2008 (Figura 1), con una densidad de 90 kg ha⁻¹. Se sembró en seco, a tres centímetros de profundidad, en doble hilera en surcos de 85 cm de separación. Se fertilizó con 180 kg de nitrógeno, utilizando como fuente la urea fraccionada la mitad y aplicado en banda en los dos primeros riegos de auxilio. Se realizó un análisis de suelo y se encontró una conductividad eléctrica de 2.6 dS m⁻¹, pH de 7.72, con materia orgánica de 0.8 %, 50% de carbonato de calcio, 50 kg ha⁻¹ de Nitrógeno (N - NO₃) y 84.99 kg ha⁻¹ de Fosforo (P - PO₄).



Figura 1. Variedad Cirno C2008 establecida en el valle del yaqui durante el ciclo agrícola 2023-2024.

Se utilizó un diseño experimental en bloques al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. El tamaño de cada unidad experimental fue de cuatro surcos de 10 m de largo, empleando 10 plantas marcadas en la parte central de la parcela. Se realizó un análisis de varianza, con el objetivo de evaluar el efecto de los tratamientos. El análisis se llevó a cabo utilizando el software RStudio (Team, 2023). Los tratamientos (Tabla 1) se aplicaron por única ocasión al momento de la siembra.

Tabla 1. Tratamientos aplicados a la variedad de trigo Cirno C2008 en el Campo Experimental Norman E. Borlaug, ubicado en el valle del Yaqui, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2023-2024.

Tratamientos	Descripción
1	50 kg ha ⁻¹ de yeso agrícola con micronutrientes
2	25 kg ha ⁻¹ de yeso agrícola con micronutrientes
3	50 kg ha ⁻¹ de yeso agrícola con micronutrientes + ácidos húmicos y fúlvicos
4	25 kg ha ⁻¹ de yeso agrícola con micronutrientes) + ácidos húmicos y fúlvicos
5	Testigo sin aplicación

Las variables evaluadas fueron: Proteína con el analizador Perten Instruments, DA 7250 NIR, pigmento se determinó con el medidor de colorimetría CR-400, índice de sedimentación (con la técnica descrita por Peña et al., 1990) y panza blanca se realizó mediante análisis visual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la variable proteína se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.001$) entre tratamientos. El valor más alto (11.8%) se registró con la dosis de 50 kg de yeso agrícola con micronutrientes, seguido del tratamiento con la misma dosis de yeso agrícola, pero con ácidos húmicos y fúlvicos. Chávez-Villalba et al. (2015) reportaron valores de 13.1% para la variedad Cirno C2008 al utilizarse como testigo para la liberación de otro material. Las proteínas se encuentran en ciertos genotipos, por lo que pueden expresarse en determinadas condiciones ambientales (Metwali et al., 2011).

La calidad y el valor comercial del trigo duro dependen fundamentalmente de su nivel de proteína. Para la producción de pastas y fideos, la industria exige que el grano tenga un mínimo de 13% de este parámetro, garantizando así que la sémola y el producto final mantengan al menos un 12% de este componente esencial (Clarke, 2000).

Fernández-García et al. (2024) mencionan que la fertilización fraccionada, en comparación con la aplicación en un solo momento, resulta en una mayor recuperación de nitrógeno (N) y repercute en el contenido de proteína. Por otra parte, Loza (2022) afirma que el contenido de proteína interactúa con el sitio y el manejo del cultivo, ambos relacionados con la fertilización nitrogenada. La aplicación de N es crucial; sin embargo, autores como Wilson et al. (2020) encontraron que el azufre (S) tiende a aumentar

la concentración de proteína, por lo que debe prestarse atención a la interacción N/S, ya que la deficiencia de S limita la síntesis de proteínas y, por lo tanto, la calidad industrial.

En el testigo se observó el porcentaje más bajo de nitrógeno (N) (1.89%), equivalente al 14% respecto a la dosis alta de yeso. Por otro lado, el potasio (K) mostró un incremento del 36% respecto al tratamiento sin aplicación, lo que mejora la eficiencia en el uso de N y favorece el transporte de aminoácidos. Cuando existe deficiencia de potasio, los procesos dependientes de la producción de ATP se ralentizan, incluyendo la acumulación y translocación de carbohidratos recién sintetizados. En consecuencia, el transporte de azúcares y almidón es menos eficiente, lo que provoca su acumulación en hojas y tallos, reduciendo su disponibilidad en raíces, frutos y semillas, donde normalmente se almacenan.

En la variable panza blanca, no se obtuvieron diferencias significativas, con valores que oscilaron entre 0.52% y 0.94%, siendo el testigo el que presentó el valor más alto. Moya y de León (2001) mencionan que el rendimiento produce un efecto de dilución del N en el grano, generando una mayor presencia de panza blanca (Figura 2). Sharma et al. (1983) establecen que, en condiciones de alto rendimiento y baja disponibilidad de N, se producen granos con espacios ocupados por almidón en lugar de proteína, fenómeno conocido como panza blanca



Figura 2. Grano de trigo variedad Cirno C2008 con y sin panza blanca

En el color de la harina integral de la variedad Cirno C2008, en ninguno de los tratamientos evaluados se obtuvieron diferencias significativas; todos los valores estuvieron en un rango de 14.2 a 14.6 en color b (Minolta). Esta variable cuantifica la intensidad del pigmento y se determinó en harina integral. Este valor está directamente relacionado con los contenidos de luteína y caroteno, los cuales determinan la variación en la intensidad del amarillo (Rodríguez-Amaya; Kimura, 2004). Chávez-Villalba et al. (2018) reportaron 19 unidades de color en sémola para la misma variedad (Cirno C2008), promediando resultados con 2 y 4 riegos.

La harina integral incluye salvado (fibra) y germen (grasas, minerales), lo que diluye el porcentaje de proteína y color por ello los valores que se reportan en este trabajo son bajos. Si la sémola tiene 13% proteína, la harina integral del mismo grano tendría aprox. 11.5–12.5% proteína.

En el índice de sedimentación no hubo diferencia significativa con valores de 10.9 a 11.4 ml y con estos resultados por la intensidad del tipo de gluten en harina integral se clasifica como medianamente fuerte. Valores altos es un indicativo de gluten fuerte y estable por lo tanto una mayor resistencia a la sequía o calor durante el desarrollo del cultivo y esto concuerda con Kibkalo (2022) quien menciona que las condiciones de crecimiento generalmente influyeron en la formación del complejo proteico del endospermo en el grano.

CONCLUSIÓN

Los resultados demuestran que el contenido de proteína en trigo duro se ve significativamente influenciado por el tipo de fertilización, destacando el yeso agrícola con micronutrientes como el tratamiento más efectivo. Lo que significa un incremento del 4%, sin embargo, los valores aún no alcanzan el mínimo requerido por la industria (13% con sémola) a diferencia de la panza blanca donde los niveles son extremadamente bajos, lo que sugiere que factores genéticos (variedad Cirno C2008) podrían predominar sobre los agronómicos en esta característica. Estos hallazgos resaltan la necesidad de ajustar estrategias de fertilización para mejorar la calidad comercial del trigo, especialmente en proteína.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agegehu G. et al. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the total environment*, 543, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>
- Chávez-Villalba G. et al. (2015). Baroyeca Oro C2013: nueva variedad de trigo duro para su cultivo en el noroeste de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(2), 421-425.
- Chávez-Villalba G. et al. (2018). CENEB Oro C2017: nueva variedad de trigo duro para el noroeste de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(7), 1560-1563. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1679>
- Clarke JM (2000). Improvement of durum wheat grain quality: Breeding. De “durum wheat, semolina and pasta quality”. Ed. Abecassis, J., Autran, J. C. and Feillet, P. INRA editions. Montpellier. France. 99 p.
- Colasuonno P. et al. (2019). Carotenoid pigment content in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var *durum*): An overview of quantitative trait loci and candidate genes. *Frontiers in plant science*, 10, 1347. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01347>
- Corrales-Maldonado CG. et al. (2014). Deficiencia de Azufre en suelos cultivables y su efecto en la productividad. *Biotechnia*, 16(1), 38–44. <https://doi.org/10.18633/bt.v16i1.32>
- Diacono M; Montemurro F (2011). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Sustainable agriculture volume 2*, 761-786.

- Fernandez-Garcia P. et al. (2024). A single nitrogen application maintains wheat yield and quality in dryland Mediterranean Vertisol. *Soil Use and Management*, 40(1), e12975. <https://doi.org/10.1111/sum.12975>
- Gooding M (2017). The effects of growth environment and agronomy on grain quality. In *Cereal Grains* (pp. 493-512). Woodhead Publishing.
- Kibkalo I (2022). Efectividad y perspectivas del método de análisis de sedimentación en la evaluación de la calidad del grano en varios cultivos de cereales con fines de mejoramiento. *Plantas*, 11(13), 1640. <https://doi.org/10.3390/plants11131640>
- López-Bellido L et al. 2012. Wheat response to nitrogen splitting applied to a Vertisols in different tillage systems and cropping rotations under typical Mediterranean climatic conditions. *European Journal of Agronomy* 43:24-32.
- Loza AD (2022). Efecto de la fertilización nitrogenada y del ambiente sobre el rendimiento y la calidad panadera de dos variedades de trigo en la región semiárida pampeana:(Maestría en Producción Agropecuaria en Regiones Semiáridas). *Semiárida*, 32(1), 68-68.
- Martínez-Moreno F et al. (2022). Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date: a historical review. *Agronomy*, 12(5), 1135.
- Metwali EM et al. (2011). Agronomical traits and biochemical genetic markers associated with salt tolerance in wheat cultivars (*Triticum aestivum* L). *Australian J. Basic and Applied Sciences*, 5: 174-183
- Moisés J et al. (2022). Utilización de cascaras de girasol con diferentes transformaciones como potenciales enmiendas orgánicas en trigo pan. *Ciencia del suelo*, 40(2), 257-267.
- Moya ES; de León TJ (2001). Efecto de los factores controlables de la producción sobre el rendimiento y la panza blanca del grano en trigo duro. *Terra latinoamericana*, 19(4), 375-383.
- Peña RJ (2007). Current and future trends of wheat quality needs. In *Wheat Production in Stressed Environments: Proceedings of the 7th International Wheat Conference, 27 November–2 December 2005, Mar del Plata, Argentina* (pp. 411-424). Springer Netherlands.
- Peña RJ et al. (1990). Variation in quality characteristics associated with some spring 1B/1R translocation wheats. *J. Cereal Sci.*, 12: 105-112.
- Rodríguez-Amaya D; Kimura M (2004). "Manual de HarvestPlus para el análisis de carotenoides", en *Serie de monografías técnicas de HarvestPlus, vol. 2.* (Washington D.C., EE.UU. y Cali, Colombia). IFPRI CIAT
- Sharma GC et al. 1983. Nitrogen fertilization effects and anatomical, protein and amino acid characteristics of yellow berry in triticale. *Crop Sci.* 23: 699-703
- Team R (2023). RStudio: integrated development environment for R. Boston, MA: RStudio, PBC; 2020

Wilson T L et al. (2020). Nitrogen and sulfur effects on hard winter wheat quality and asparagine concentration. *Journal of Cereal Science*, 93, 102969. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102969>

Índices de vegetación derivados de imágenes digitales para el análisis de la fenología y el desarrollo del cultivo de trigo

Recibido em: 31/03/2025

Aprobado em: 14/04/2025

 10.46420/9786585756563cap8

R. Suzuki Pinto 

Enrico A. Yépez* 

Jaime Garatuza-Payán 

INTRODUCCIÓN

A través de la fotosíntesis, la respiración y la transpiración los cultivos que sustentan la alimentación mundial impactan la dinámica de gases en la atmósfera (IPCC, 2021). Se proyecta un aumento de la temperatura a nivel global en los próximos años, lo que podría alterar las tasas de emisión y captura de gases de efecto invernadero (GEI) en la interacción planta-atmósfera, debido a su estrecha relación con el metabolismo de los cultivos y las prácticas agrícolas. Estos cambios ambientales representan una amenaza para la capacidad de producción de alimentos.

La utilización de imágenes digitales en la estimación de índices de vegetación asociados con el desarrollo de las plantas y ecosistemas se ha implementado ampliamente en las geociencias y ecología, pero su uso dentro de la fisiología agrícola es limitado (Cueva et al., 2021). Condiciones ambientales cada vez más variables debido a los efectos del cambio climático, demandan análisis continuos de las dinámicas de desarrollo de los cultivos agrícolas que permitan detectar de manera rápida y efectiva información detallada sobre los estados fenológicos clave, así como las etapas de mayor actividad fotosintética.

Cambios morfológicos, fisiológicos e incluso aquellos relacionados con procesos químicos podrían ser correlacionados con una serie de índices vegetativos, incluidos los derivados del análisis de bandas rojas, verdes y azules (RGB). Estudios previos en cultivos agrícolas han demostrado que el análisis de imágenes digitales puede detectar diferencias en la sensibilidad de las plantas al estrés hídrico y por altas temperaturas con base en el estudio de parámetros de crecimiento (Abdelhakim et al., 2021), así como cambios en el verdor de la biomasa asociados con senescencia temprana (Humplík et al., 2015) y desde luego, cambios en la fenología de la planta.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la dinámica de desarrollo del cultivo de trigo mediante el análisis de imágenes digitales capturadas de manera repetidas durante un ciclo agrícola otoño-invierno.

* Autor correspondiente: yepezglz@gmail.com

MATERIAL Y MÉTODOS

El área experimental del presente estudio se localiza en el Valle del Yaqui, Sonora, dentro de los terrenos pertenecientes al Centro Internacional de Maíz y Trigo (CIMMYT). Se estableció un ensayo con 12 genotipos de trigo, de los cuales se seleccionó uno como variedad modelo para la ejecución de la metodología aquí descrita. CIRNO C2008 es la variedad de trigo con mayor superficie de siembra en el Valle del Yaqui y se caracteriza por ser un trigo duro (*Triticum durum* L.) de hábito primaveral (Figueroa-López et al., 2010). El experimento se llevó a cabo durante el ciclo agrícola 2020-2021 siguiendo las recomendaciones en fechas de siembra y manejo agrícola correspondiente a la región Noroeste de México proporcionadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (INIFAP). La fecha de germinación fue registrada el 25 de diciembre de 2020. Se realizó control de plagas y maleza cuando fue necesario.

Tabla 1. Índices vegetativos calculados con las coordenadas cromáticas RGB obtenidas a partir de imágenes digitales capturadas en el cultivo de trigo CIRNO C2008 durante el ciclo 2020-2021.

Índice vegetativo	Cálculo	Asociado con	Referencia
gcc = Ig	$\frac{G}{(R + G + B)}$	Verdor de biomasa, Productividad primaria bruta (PPB)	Cueva et al. (2021)
g/r	$\frac{G}{R}$	NDVI, contenido de clorofila, biomasa aérea	Adamsen et al. (1999)
VIgreen	$\frac{G - R}{G + R}$	NDVI	St. Peter et al. (2018)
ExG	$2G - (R + B)$	Verdor de biomasa	St. Peter et al. (2018)

Para la captura de imágenes se colocó una cámara automática (Moultrie M-50) apuntando hacia el dosel del cultivo programada en el modo time-lapse para tomar fotografías diariamente cada 3 horas entre las 6:00 y 18:00 h. Las imágenes digitales fueron colectadas durante todo el ciclo agrícola, iniciando en la emergencia el día 25 de diciembre de 2020 y culminando el día 22 de abril, una vez que el cultivo alcanzó la madurez fisiológica. Las imágenes digitales fueron procesadas en Rstudio, mediante el paquete *Phenopix* (Filippa et al., 2016) el cual permite extraer los números digitales de cada imagen utilizando para ello un área de referencia establecida. Con base en los números digitales RGB fue posible calcular los índices vegetativos gcc (Green Chromatic Coordinate), VIgreen (Visible Atmospherically Resistant Indices Green), g/r (Green-Red Vegetation Index) y ExG (Excess Green). Con el objetivo de evitar incluir imágenes capturadas en días nublados, con falta de luz, sombras o imágenes con presencia de cualquier otro artefacto que pudiera interferir en el análisis se realizó un filtro inicial limitando las imágenes a utilizar a solamente aquellas cuyo horario de captura fuera entre las 12:00 y 15:00 h. En la

siguiente etapa se aplicaron dos filtros adicionales que permitieron eliminar interferencias. Enseguida se seleccionó un área de interés (ROI) dentro del experimento misma que ubicó al genotipo modelo CIRNO C2008, dentro del área de estudio.

Mediante este análisis fue posible extraer información fenológica del cultivo de trigo para el periodo especificado en el presente estudio calculando los índices vegetativos en base a las coordenadas cromáticas proporcionadas por los números digitales RGB de cada imagen (Tabla 1).

Con base en la información extraída se realizó una línea del tiempo en la que fue posible observar el avance del cultivo a través de cada una de las etapas fenológicas mismas que fueron confirmadas con observaciones directas en campo (Figura 1).

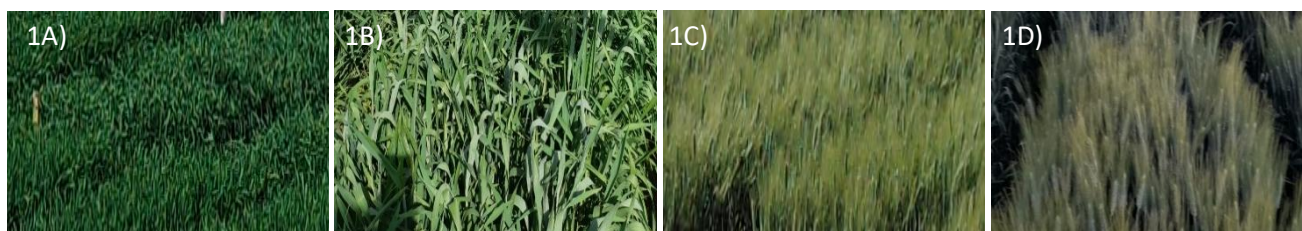


Figura 1. Imágenes digitales capturadas durante el desarrollo del experimento. 1A) etapa vegetativa, 1B) embuche, 1C) espigamiento, y 1D) Madurez.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos de las imágenes digitales pueden contener demasiado ruido generando confusión en su interpretación. Con base en la consistencia de los datos a través del tiempo es posible aplicar cuatro tipos de filtros que ayuden a reducir: a) condiciones ambientales poco favorables para la captura de imágenes, b) poca iluminación, c) lentes sucios, d) valores extremos. Es importante mencionar, que estos filtros se fueron aplicando en el orden que se enlistan en la Figura 2, y que son acumulativos, es decir, los datos más refinados se observan en color azul. Se identificó que la etapa con mayor tasa de crecimiento se localizó a fines del mes de enero y la de menor tasa de crecimiento en abril (Figura 3.) Lo anterior coincide con las observaciones detectadas en campo ya que durante los últimos días de enero el cultivo se encontró en etapa vegetativa la cual se caracteriza por el desarrollo acelerado de la planta que se encuentra generando la biomasa que pasará a formar parte de las nuevas hojas y tallos (Pinto et al., 2016). A partir de ese pico máximo, se observó un decaimiento en gcc hasta alcanzar la madurez fisiológica donde la planta pierde totalmente su coloración verde. Se sabe que hasta 50% del CO₂ fijado mediante el proceso fotosintético, se libera por respiración (Amthor 2025) y que esta proporción puede aumentar cuando la temperatura ambiental se incrementa. Lo anterior podría impactar fuertemente el balance de carbono.

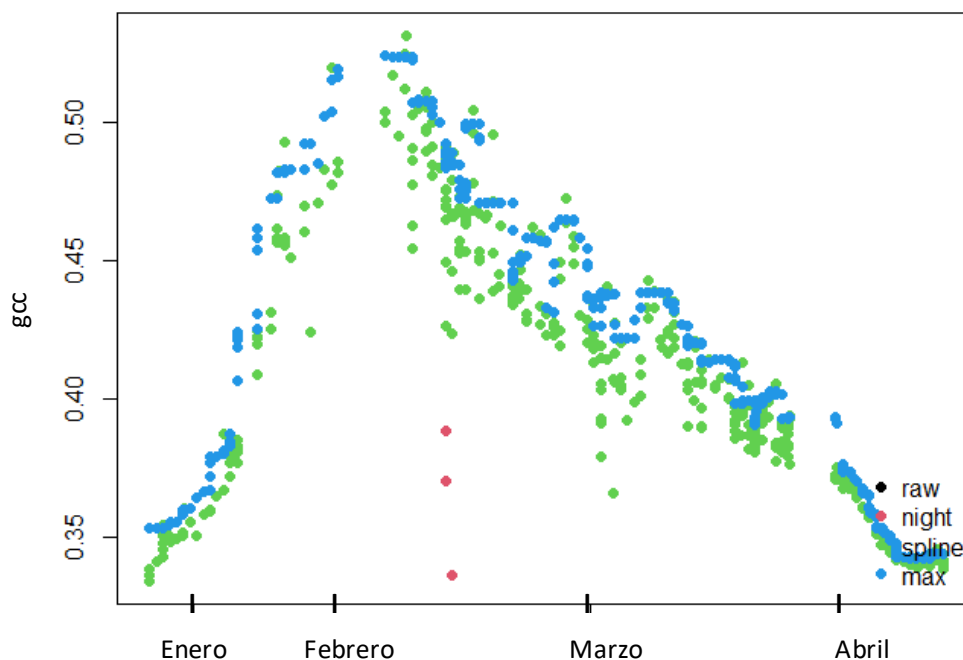


Figura 2. Diagnóstico de los filtros aplicados sobre el índice de verdor (gcc) proporcionado por el paquete Phenopix. Los valores estimados para gcc crudos son indicados en color negro (quedando ocultos), mientras los valores para el diagnóstico aparecen en rojo, verde y azul. En rojo el filtro “night” que descarta valores muy pequeños; en verde el filtro “spline” que elimina outliers según Migliavacca et al. (2011); en azul el filtro “max” que se basa en la iluminación según Sonnentag et al. (2012).

En nuestro caso durante el mes de febrero, el sistema agrícola del trigo estaría acumulando las mayores cantidades de carbono, pero que éstas podrían estarse compensando con la alta respiración necesaria para sostener el acelerado ritmo de crecimiento de la planta durante esta etapa fenológica. Aunado a ello, observaciones previas del efecto de la edad de la hoja sobre la tasa de respiración en trigo, indican que hojas más jóvenes reportan tasas de respiración más altas que las hojas viejas (Pinto et al., 2017). En términos ecológicos, se ha resaltado el impacto positivo que tienen las zonas de cultivo como sumideros de carbono, ya que según Gilmanov et al. (2010) las tierras de cultivo captan alrededor de $933 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ aunque ello dependerá del tipo de cultivo y las condiciones de siembra. El índice de verdor (gcc) mostro un rango amplio desde el inicio al fin del ciclo agrícola, con valores desde 0.335 hasta un máximo de 0.521 ambos detectados en la etapa vegetativa de la planta. El índice ExG que al igual que gcc estima el verdor del follaje, mostró nuevamente mayores valores en la etapa vegetativa. Los índices Vlgreen y g/r, que simulan el índice normalizado vegetativo (NDVI) utilizando las bandas del espectro visible, mostraron igualmente su valor máximo durante la etapa vegetativa con algunas variaciones durante la etapa reproductiva y el llenado de grano donde su valor máximo fue apenas 0.163 y 1.389 lo que representa una disminución de entre el 40-60% del pico máximo. Lo anterior coincide con las dinámicas de desarrollo del cultivo registradas mediante observaciones directas en campo para este experimento. Dado que todos los índices resultan de distintas combinaciones de los números digitales

(rojo, verde y azul) es esperada la alta correspondencia entre los patrones detectados para cada uno de ellos.

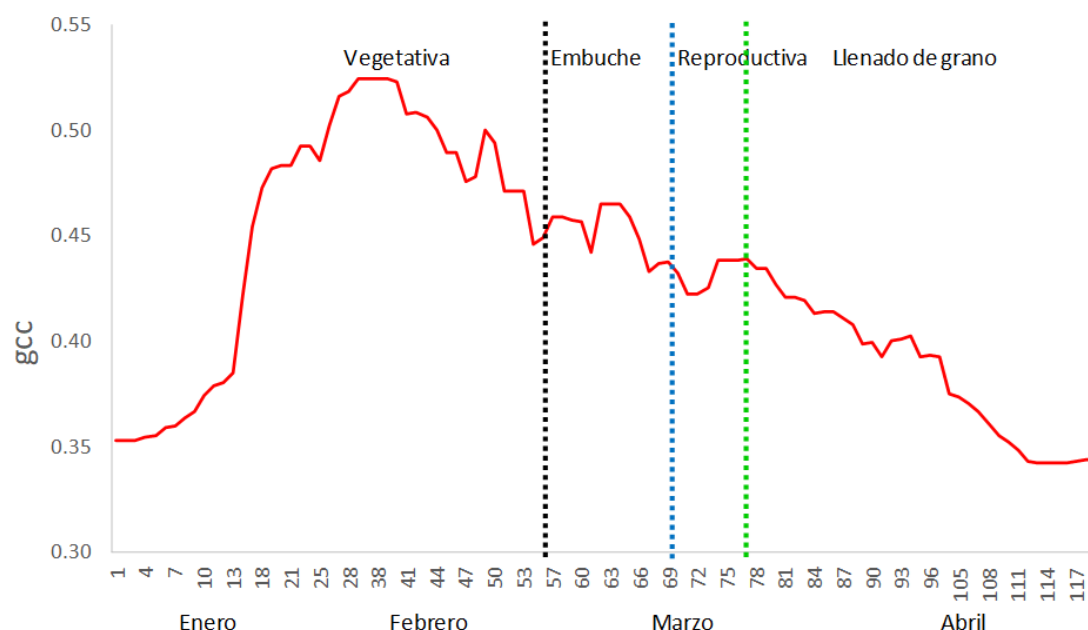


Figura 3. Índice de verdor (gcc) calculado durante el ciclo de cultivo de trigo en 2020-2021 en días después de emergencia (1-117). Con líneas punteadas se indica el inicio de las etapas fenológicas del cultivo diferenciando con, a) negro: inicio de embuche, b) azul: inicio de la etapa reproductiva, y c) verde: inicio del llenado de grano.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demostraron que los índices derivados de los datos extraídos de fotografías digitales constituyen una herramienta rápida y eficaz para detectar variaciones relacionadas con la cantidad y el verdor de la biomasa producida y, por ende, con la actividad fotosintética del cultivo. Asimismo, se logró identificar la curva de desarrollo del cultivo de trigo lo que se espera contribuya a optimizar el monitoreo del crecimiento del cultivo mediante herramientas accesibles, mejorar las estrategias de manejo agronómico y facilitar la toma de decisiones para incrementar la productividad y sostenibilidad agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelhakim LOA et al. (2021). Investigating Combined Drought-and Heat Stress Effects in Wheat under Controlled Conditions by Dynamic Image-Based Phenotyping. *Agronomy*, 11(2): 364.
- Adamsen FJ et al. (1999). Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop science*, 39(3): 719-724.

- Amthor JS (2025). After photosynthesis, what then: Importance of respiration to crop growth and yield. *Field Crops Research*, 321: 109638.
- Cueva, A. et al. (2021). Foliage senescence as a key parameter for modeling gross primary productivity in a Mediterranean shrubland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(1): e2020JG005839.
- Figueroa-López P. et al. (2010). CIRNO C2008, nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de Sonora. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(5): 739-744.
- Filippa G. et al. (2016). Phenopix: AR package for image-based vegetation phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220: 141-150.
- Humplík JF et al. (2015). Automated phenotyping of plant shoots using imaging methods for analysis of plant stress responses—a review. *Plant methods*, 11(1): 1-10.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
- Migliavacca M. et al. (2011). Using digital repeat photography and eddy covariance data to model grassland phenology and photosynthetic CO₂ uptake. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10): 1325-1337.
- Pinto R.S. et al. (2017). Identification of heat tolerant wheat lines showing genetic variation in leaf respiration and other physiological traits. *Euphytica*, 213(3), 76.
- Pinto RS. Et al. (2016). Modelling and genetic dissection of staygreen under heat stress. *Theoretical and Applied Genetics*, 129: 2055-2074.
- Sonnentag O. et al. (2012). Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152: 159-177.
- St. Peter, J. et al. (2018). Linking phenological indices from digital cameras in Idaho and Montana to MODIS NDVI. *Remote Sensing*, 10(10): 1612.

Efecto de diferentes estrategias de fertilización orgánica en el crecimiento de plántulas de Chile Piquín (*Capsicum annuum* var. *aviculare*) bajo condiciones protegidas

Recibido em: 20/04/2025

Aprobado em: 01/05/2025

 10.46420/9786585756563cap9

Francisco Cadena Cadena 

Joe Luís Arias Moscoso* 

Ofelda Peñuelas-Rubio 

Leandris Argente-Martínez 

Gabriela Chávez Villalva 

Dulce Alondra Cuevas Acuña 

INTRODUCCIÓN

El chile piquín (*Capsicum annuum* L., var. *aviculare*) es una especie de gran importancia en México debido a su valor culinario, medicinal y económico (Rueda-Puente et al., 2010). En el noreste del país, se aprovecha con fines medicinales y como fuente de ingresos para la población local. Su característico sabor picante y su alto contenido de compuestos bioactivos lo convierten en un producto altamente apreciado en la gastronomía y en la industria agroalimentaria. Sin embargo, la producción de chile piquín se ha basado históricamente en la recolección de poblaciones silvestres, lo que ha llevado a una disminución de su disponibilidad debido a la presión antropogénica y a la degradación de los ecosistemas naturales donde crece (Estrada-Castillón et al., 2022). Ante este escenario, el cultivo del chile piquín en condiciones protegidas surge como una estrategia viable para garantizar su producción y conservación, ofreciendo ventajas como el control de factores ambientales, la reducción de plagas y enfermedades, y la optimización del uso de insumos agrícolas (Rodríguez-Dimas et al., 2007). No obstante, su presencia en el entorno natural se ha visto afectada drásticamente en los últimos años debido a la intervención humana y el manejo ineficiente de los recursos naturales (El-Mogy et al., 2020).

Uno de los principales desafíos en la producción de chile piquín bajo condiciones protegidas es el manejo adecuado de la fertilización, dado que la nutrición vegetal influye directamente en el rendimiento y calidad del cultivo (Sillo et al., 2023). Tradicionalmente, los sistemas agrícolas han dependido del uso de fertilizantes sintéticos para suplir los requerimientos nutricionales de las plantas (Mares-Quinones et al., 2019). Sin embargo, el uso indiscriminado de estos productos ha generado problemas ambientales como la degradación del suelo, la contaminación de cuerpos de agua y la pérdida de biodiversidad microbiana (Martínez-Dalmau et al., 2021). Además, el alto costo de los fertilizantes

* Autor correspondiente: jarias.moscoso@itvy.edu.mx

químicos representa una limitante para pequeños productores que buscan alternativas más sostenibles y accesibles (Aguilar Carpio et al., 2022).

El uso de fertilización orgánica en el cultivo de chile piquín bajo condiciones protegidas no solo representa una alternativa viable desde el punto de vista agronómico, sino que también responde a una creciente demanda del mercado por productos más saludables y libres de residuos químicos. La incorporación de composta (CO) o gallinaza (estiercol de gallina) (GA) en suelos ha demostrado mejorar el desarrollo y rendimiento de diversas hortalizas, como el tomate (Gutiérrez-Miceli et al., 2007), la lechuga (Steffen et al., 2010) el pimiento (Arancon et al., 2004) y tubérculos como la papa (Gelaye, 2023). Tanto el CO como el GA liberan gradualmente minerales esenciales, facilitando su absorción por las plantas conforme lo requieren (Hidalgo et al., 2022). Su combinación con materiales inertes, como la arena, mejora las propiedades físicas y químicas del sustrato, reduciendo el riesgo de hipoxia. Además, estos abonos pueden proporcionar los nutrientes esenciales a cultivos hortícolas en invernadero durante las primeras semanas posteriores al trasplante (Márquez-Hernández et al., 2006). Sin embargo, después de ese periodo, es común observar deficiencias de nitrógeno (N), debido a su lenta mineralización en estos materiales (Castellanos et al., 2009; Rodríguez-Dimas et al., 2007). El uso de fertilización orgánica en el cultivo de chile piquín bajo condiciones protegidas no solo representa una alternativa viable desde el punto de vista agronómico, sino que también responde a una creciente demanda del mercado por productos más saludables y libres de residuos químicos (Márquez-Quiroz et al., 2013). El presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de distintos tipos de fertilización orgánica en el crecimiento y germinación de chile piquín bajo condiciones protegidas. Los resultados de esta investigación contribuirán al desarrollo de estrategias de manejo sustentable para este cultivo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación y condiciones del invernadero

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2021-2022 en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Valle de Yaqui en el estado Sonora, México (latitud 27° 24' 50.24" N, longitud 110° 7' 56.388"). Durante el experimento, la temperatura interna varió entre 17.4 y 36.9 °C, mientras que la humedad relativa fluctuó entre 20 % y 79 %.

Diseño experimental

El estudio se llevó a cabo bajo un esquema de diseño completamente aleatorio. Se utilizó un ecotipo de chile piquín del Noroeste de México, que mostró características destacadas en términos de germinación y producción. Cada unidad experimental consistió en una maceta con una sola planta, realizándose ocho repeticiones por tratamiento.

Tratamientos de fertilización

Se evaluaron cuatro estrategias de fertilización:

- **F1:** Arena combinada con gallinaza en proporción 1:1 (v:v)
- **F2 (Testigo):** Arena con solución nutritiva inorgánica
- **F3:** Arena, compost y gallinaza en proporción 2:1:1 (v:v)
- **F4:** Mezcla de arena y composta en proporción 1:1 (v:v)

Siembra y trasplante

La siembra se realizó el 10 de septiembre de 2022 en charolas germinadoras de 200 cavidades, utilizando musgo (Premier®) como sustrato. El trasplante tuvo lugar el 19 de noviembre de 2022 en bolsas de 208 litros, cada una rellena con 30 kg del sustrato correspondiente al tratamiento asignado. Se estableció una densidad de población de cuatro macetas por metro cuadrado.

Preparación de sustratos

La arena utilizada en las mezclas fue desinfectada previamente con una solución de agua y cloro al 5 %. El compost y la gallinaza empleados fueron de origen comercial, mientras que la solución nutritiva se preparó en el laboratorio de suelos del Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui.

Composición química de los tratamientos

Las propiedades químicas y la composición nutrimental de cada tratamiento a lo largo del ciclo de producción se presentan en la Tabla 1. En el caso del tratamiento F1, la solución nutritiva aplicada siguió la recomendación establecida por Castellanos y Ojodeagua (2009).

Tabla 1. Características químicas de los fertilizantes utilizados la fertilización de Chile piquín.

	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	pH	CE
Muestra	(g kg ⁻¹)			(mg kg ⁻¹)			(dS m ⁻¹)				
F1	22.7	10.3	35.7	88.6	0.75	5.6	5331	216	197	8	6.7
F2	34	30.2	20.3	61.8	8.3	5.3	0.3	365	412	6.5	2.9
F3	20.5	7.6	79.8	8.2	7.3	-	0.54	320	-	6.9	-
F4	150	31	210	90	0.25	5.1	-	0.13	24	-	-

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El crecimiento y rendimiento del chile piquín (*Capsicum annuum* var. *aviculare*) están fuertemente influenciados por la disponibilidad de nutrientes esenciales y las condiciones del medio. En el presente

estudio, se evaluó la respuesta del cultivo ante cuatro tipos de tratamientos de fertilización, observándose notables diferencias en el desarrollo de las plantas a lo largo de diez semanas, las cuales pueden explicarse a partir del análisis nutrimental de cada tratamiento. La Figura 1 muestra de manera clara el incremento progresivo en la altura de las plantas desde la semana 1 hasta la semana 9. Los tratamientos F1 y F3 fueron los que promovieron el mayor crecimiento, con valores cercanos o superiores a los 30 cm, mientras que F2 alcanzó un crecimiento intermedio y F4 mostró un desarrollo más limitado.

En el caso de F1, se observa una composición química que favorece el desarrollo vegetal: 22.7 g·kg⁻¹ de nitrógeno, 35.7 g·kg⁻¹ de potasio, 88.6 g·kg⁻¹ de calcio y 0.75 g·kg⁻¹ de magnesio, además de niveles adecuados de micronutrientes como hierro (5331 mg·kg⁻¹), zinc (216 mg·kg⁻¹) y manganeso (197 mg·kg⁻¹). Estos elementos desempeñan funciones clave en procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la síntesis de clorofila, la elongación celular y el metabolismo enzimático (Arancon et al., 2010; Edwards et al., 2010).

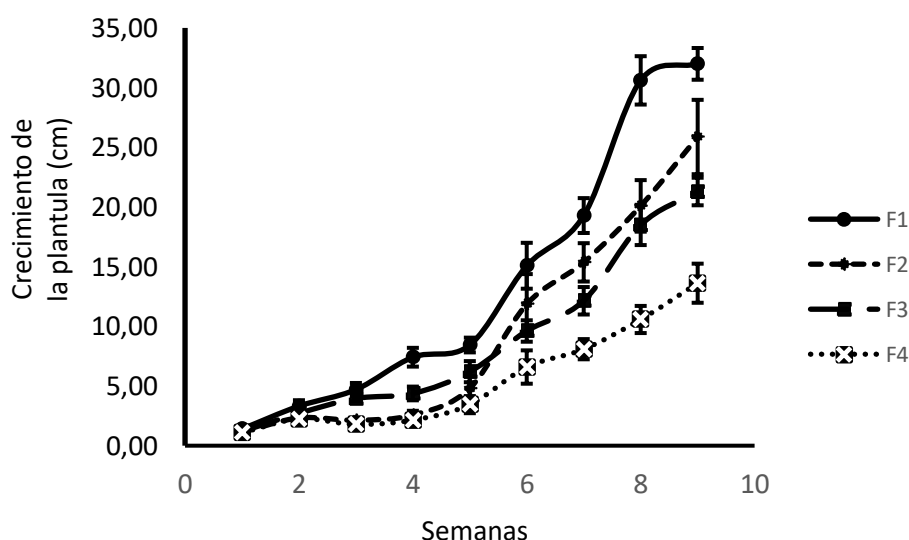


Figura 1. Efecto de diferentes tratamientos de fertilización en el crecimiento en altura de plántulas de chile piquín a lo largo de nueve semanas.

Por otro lado, F3 presentó concentraciones elevadas de potasio (79.8 g·kg⁻¹) y magnesio (7.3 g·kg⁻¹), así como un contenido aceptable de hierro (540 mg·kg⁻¹) y zinc (302 mg·kg⁻¹). Estos valores también explican el buen comportamiento observado en esta alternativa de fertilización, ya que tanto el potasio como el magnesio son fundamentales para la regulación osmótica y el transporte de fotosintatos, así como para la activación de enzimas esenciales en el metabolismo vegetal (Atiyeh et al., 2000).

El tratamiento F2, si bien registró una elevada concentración de nitrógeno (34.0 g·kg⁻¹), presentó un contenido relativamente bajo de calcio (61.8 g·kg⁻¹) y magnesio (8.3 g·kg⁻¹), además de una conductividad eléctrica (CE) de apenas 2.9 dS·m⁻¹. Estos factores podrían haber limitado la

disponibilidad real de nutrientes, a pesar de su presencia cuantitativa, lo que podría explicar el menor crecimiento de las plantas en comparación con F1 y F3. Por su parte, F4 mostró valores extremos en algunos nutrientes, como $150.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de nitrógeno y $210.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de potasio, así como un contenido elevado de calcio ($90.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). No obstante, su rendimiento en crecimiento fue el más bajo. Este fenómeno podría estar relacionado con la toxicidad por exceso de sales o nutrientes, especialmente si la conductividad eléctrica fue elevada, lo cual puede generar estrés osmótico en las raíces y afectar la absorción de agua y minerales. Asimismo, el bajo contenido de micronutrientes como hierro ($0.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y manganeso ($24.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en F4 puede haber limitado procesos metabólicos fundamentales como la respiración celular y la síntesis de proteínas (García Martínez et al., 2002).

En cuanto al rendimiento del cultivo, los resultados muestran que no hubo diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) entre tratamientos en términos de longitud, número de frutos, peso promedio y rendimiento total. Sin embargo, se logró mantener una producción aceptable incluso con fertilizantes orgánicos, lo cual es importante desde el punto de vista de la sustentabilidad agrícola. En promedio, las plantas produjeron 405.67 frutos, con un peso individual de 0.59 g y un rendimiento de 4.20 t ha^{-1} (Figura 3). Este valor supera el rendimiento reportado en campo abierto (Márquez-Quiroz et al., 2013; Rodríguez et al., 2004), quienes obtuvieron 0.98 t ha^{-1} , lo que representa un incremento del 298.98 %.

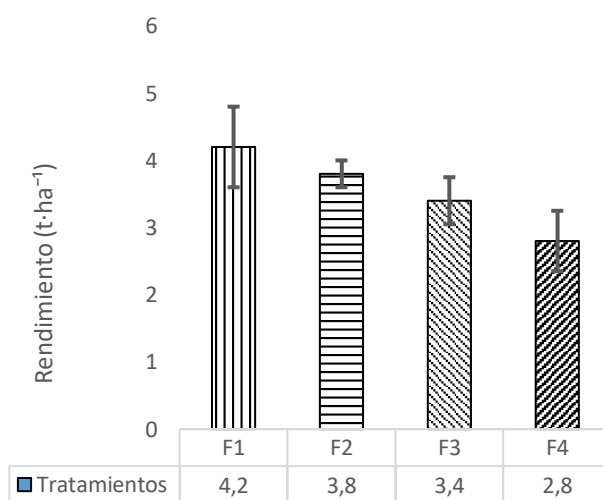


Figura 2. Rendimiento de plántulas de chile piquín bajo diferentes mezclas de sustratos

Si bien el tratamiento F2 (fertilización convencional) fue uno de los más productivos, es importante destacar que su uso no está permitido bajo las normas de agricultura orgánica. Este hecho plantea un reto para la producción sustentable, ya que los tratamientos orgánicos deben optimizarse para alcanzar rendimientos comparables a los de la agricultura convencional. Se ha mencionado que los sistemas orgánicos pueden presentar una reducción del 10 al 30 % en comparación con los convencionales (Seufert et al., 2012), aunque este descenso puede compensarse con el mayor valor de

mercado que alcanzan los productos orgánicos, especialmente en el caso del chile piquín seco, cuyo precio es hasta diez veces superior al del producto fresco (Villalon-Mendoza et al., 2014; Villalon-Mendoza et al., 2015).

El análisis estadístico revela que no existen diferencias significativas entre los tratamientos F1, F2 y F3, ni entre F3 y F4. A simple vista, el tratamiento F1 muestra el mayor rendimiento con un valor promedio de 4.2 toneladas por hectárea. Sin embargo, al realizar la comparación de medias por Tukey se observa la ausencia de diferencias significativas. Por lo tanto, aunque F1 tiene el valor promedio más alto, es similar a los demás tratamientos. Por otra parte, aunque el tratamiento F4 presenta el rendimiento más bajo, el análisis estadístico indica que no se diferencia significativamente de F3, lo que evidencia que la caída en rendimiento de F3 a F4 no es concluyente desde el punto de vista estadístico. Sin embargo, sí se detecta una separación clara entre el grupo F1-F2-F3 y F4, ya que F4 no se diferencia de F3, pero sí de F1 y F2, lo que permite clasificar los tratamientos en dos bloques de desempeño.

Por otro lado, la densidad de raíces finas resultó ser mayor bajo el tratamiento que empleó fertilizante orgánico. Este resultado es similar al reportado para el crecimiento radicular de pejíbaye (*Bactris gasipaes* K.), quien reportó una densidad radicular 3.97 veces mayor en palmas tratadas con fertilizante orgánico en comparación con fertilización química o combinada (Chaimsohn et al., 2007). Esta tendencia también se refleja en las plántulas de chile piquín evaluadas en el presente estudio, ya que el crecimiento radicular fue mayor en presencia del tratamiento F1 y F3 en comparación con los tratamientos F2 y F4. Los tratamientos F1 y F3 fueron los que promovieron un sistema radicular más desarrollado, evidenciado por una mayor cantidad de raíces finas. Este patrón puede explicarse no solamente por la presencia de nutrientes esenciales, sino también por el equilibrio de estos elementos, su forma disponible y la sinergia que generan en la rizosfera (Zhang et al., 2022).

La superioridad de F1 y F3 en cuanto al desarrollo de raíces finas sugiere que estos tratamientos proporcionaron un entorno más favorable para el crecimiento subterráneo, en comparación con F2 y F4. Esta diferencia no parece deberse a la cantidad absoluta de nutrientes, ya que, como es bien conocido, la nutrición vegetal no depende únicamente de la concentración de elementos, sino de su biodisponibilidad y proporciones balanceadas (Frossard et al., 2000). En el caso de F1, su formulación podría haber facilitado un entorno más estable para la elongación de raíces finas, posiblemente por un pH moderado y una adecuada relación entre macronutrientes primarios y secundarios (Fairweather-Tait et al., 1996). En F3, el comportamiento observado sugiere un efecto positivo relacionado con la disponibilidad de potasio y la acción sinérgica de micronutrientes que podrían haber estimulado el crecimiento radicular (Sustr et al., 2019). En cambio, los tratamientos F2 y F4 mostraron una menor respuesta en términos de densidad radicular. En el caso de F2, si bien presentaba niveles elevados de algunos nutrientes, el efecto no fue proporcional en cuanto al desarrollo de raíces finas. Esto podría deberse a un desbalance nutricional o incluso a la presencia de elementos en formas poco disponibles para la planta (Karthika et al., 2018).

Además, un exceso relativo de algunos nutrientes puede interferir en la absorción de otros, generando bloqueos o antagonismos fisiológicos que limitan el crecimiento subterráneo (Fageria, 2001).

Por su parte, el bajo rendimiento radicular de F4 podría estar asociado a una formulación con características fisicoquímicas menos favorables para la rizogénesis, como una posible salinidad elevada o una relación desequilibrada entre nutrientes esenciales (Gallegos-Cedillo et al. 2021). Factores como la conductividad eléctrica del sustrato y la acumulación de sales pueden afectar negativamente el desarrollo de raíces finas al generar estrés osmótico, restringiendo la absorción eficiente de agua y nutrientes (Franco et al., 2011). Resultados similares se obtuvieron para el crecimiento de chile piquín silvestre (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) del noreste de México. En este estudio se encontró que el uso de fertilizante orgánico promueve de manera significativa el desarrollo del sistema radical, posiblemente debido a la liberación paulatina de nutrientes, la mejora de la estructura del sustrato y el estímulo a la actividad microbiana beneficiosa. La fertilización mineral también favorece el desarrollo radicular, aunque en menor medida que el abono orgánico, probablemente por su alta disponibilidad inmediata de nutrientes esenciales, sin necesariamente mejorar la estructura física del suelo. En contraste con el tratamiento sin fertilización el cual tuvo la menor densidad de raíces finas (Garza-López et al., 2022).

Entre los tratamientos orgánicos, F2 y F3 destacaron por su eficiencia, lo cual concuerda con el estímulo de la actividad microbiana en el suelo, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes y la salud radicular. Una nutrición balanceada, con una adecuada proporción de macro y micronutrientes, es fundamental para maximizar el crecimiento y rendimiento del chile piquín. Aunque los fertilizantes convencionales como los empleados en F1 siguen siendo los más efectivos en términos de rendimiento, los tratamientos orgánicos evaluados (particularmente F1 y F3) ofrecen resultados prometedores, demostrando que es posible alcanzar una producción sostenible y económicamente viable si se mejora la formulación de los fertilizantes orgánicos utilizados (Márquez-Quiroz et al., 2013).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Carpio, C., Arriaga Rubio, L. M., Cervantes Adame, Y. F., Arenas-Julio, Y. R., & Escalante-Estrada, J. A. S. (2022). Rentabilidad y producción del maíz VS-535 en respuesta a la fertilización química y biológica. *Acta universitaria*, 32.
- Arancon, N., Edwards, C. A., Webster, K. A., & Buckerfield, J. C. (2010). The potential of vermicomposts as plant growth media for greenhouse crop production. *Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC, Boca Raton, 103-128.
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Welch, C., & Metzger, J. D. (2004). Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresource Technology*, 93(2), 145-153.

- Atiyeh, R. M., Arancon, N., Edwards, C. A., & Metzger, J. D. (2000). Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes. *Bioresource Technology*, 75(3), 175-180.
- Castellanos, J. Z., & Ojodeagua, J. L. (2009). Formulación de la solución nutritiva. Manual de producción de tomate en invernadero. Intagri, SC Celaya, Gto., México, 131-156.
- Chaimsohn, F. P., Villalobos, E., & Mora-Urpí, J. (2007). El fertilizante orgánico incrementa la producción de raíces en pejíbaya (*Bactris gasipaes* K.). *Agronomía Costarricense*.
- Edwards, C. A., Askar, A., Vasko-Bennett, M., & Arancon, N. (2010). The use and effects of aqueous extracts from vermicompost or teas on plant growth and yields. *Vermiculture Technology. Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. EDWARDS, CA, 235-248.
- El-Mogy, M. M., Abdelaziz, S. M., Mahmoud, A. W. M., Elsayed, T. R., Abdel-Kader, N. H., & Mohamed, M. I. A. (2020). Comparative effects of different organic and inorganic fertilisers on soil fertility, plant growth, soil microbial community, and storage ability of lettuce. *Agriculture*, 66(3), 87-107.
- Estrada-Castillón, E., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Cuéllar-Rodríguez, L. G., March-Salas, M., Encina-Domínguez, J. A., Himmeslbach, W., . . . Scott-Morales, L. M. (2022). Ethnobotany in Iturbide, Nuevo León: the traditional knowledge on plants used in the semiarid mountains of Northeastern Mexico. *Sustainability*, 14(19), 12751.
- Fageria, V. D. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of plant nutrition*, 24(8), 1269-1290.
- Fairweather-Tait, S., & Hurrell, R. F. (1996). Bioavailability of minerals and trace elements: Members of EC flair concerted action no. 10: Measurements of micronutrient absorption and status. *Nutrition Research Reviews*, 9(1), 295-324.
- Franco, J. A., Bañón, S., Vicente, M. J., Miralles, J., & Martínez-Sánchez, J. J. (2011). Root development in horticultural plants grown under abiotic stress conditions—a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 86(6), 543-556.
- Frossard, E., Bucher, M., Mächler, F., Mozafar, A., & Hurrell, R. (2000). Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(7), 861-879.
- Gallegos-Cedillo, V. M., Diáñez, F., Nájera, C., & Santos, M. (2021). Plant agronomic features can predict quality and field performance: a bibliometric analysis. *Agronomy*, 11(11), 2305.
- Garcia Martinez, I., Cruz Sosa, F., LarqueSaavedra, A., & Soto Hernández, M. (2002). Extraction of auxin-like substances from compost.
- Garza-López, E., Olivo, A. M., Avalos, J. G. M., & Ramírez-Meráz, M. (2022). Testing Organic Fertilizers to Improve Seedlings Quality of Wild “Piquin” Chilli Pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) from Northeastern Mexico. *Open Access Library Journal*, 9(4), 1-9.
- Gelaye, Y. (2023). Effect of combined application of organic manure and nitrogen fertilizer rates on yield and yield components of potato: A review. *Cogent food & agriculture*, 9(1), 2217603.

- Gutiérrez-Miceli, F. A., Santiago-Borraz, J., Molina, J. A. M., Nafate, C. C., Abud-Archila, M., Llaven, M. A. O., . . . Dendooven, L. (2007). Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Bioresource Technology*, 98(15), 2781-2786.
- Hidalgo, D., Corona, F., & Martín-Marroquín, J. M. (2022). Manure biostabilization by effective microorganisms as a way to improve its agronomic value. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(10), 4649-4664.
- Karthika, K. S., Rashmi, I., & Parvathi, M. S. (2018). Biological functions, uptake and transport of essential nutrients in relation to plant growth. *Plant nutrients and abiotic stress tolerance*, 1-49.
- Mares-Quinones, M. D., & Valiente-Banuet, J. I. (2019). Horticultural aspects for the cultivated production of piquin peppers (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*)—a review. *HortScience*, 54(1), 70-75.
- Márquez-Hernández, C., Cano-Ríos, P., Chew-Madinaveitia, Y. I., Moreno-Reséndez, A., & Rodríguez-Dimas, N. (2006). Sustratos en la producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(2), 183-188.
- Márquez-Quiroz, C., López-Espinosa, S. T., Cano-Ríos, P., & Moreno-Reséndez, A. (2013). Fertilización orgánica: una alternativa para la producción de chile Piquín bajo condiciones protegidas. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 19(3), 279-286.
- Martínez-Dalmau, J., Berbel, J., & Ordóñez-Fernández, R. (2021). Nitrogen fertilization. A review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses. *Sustainability*, 13(10), 5625.
- Rodríguez-Dimas, N., Cano-Ríos, P., Favela-Chávez, E., Figueroa-Viramontes, U., De Paul-Álvarez, V., Palomo-Gil, A., . . . Moreno-Reséndez, A. (2007). Vermicomposta como alternativa orgánica en la producción de tomate en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(2), 185-192.
- Rodríguez B, L. A., Ramírez M, M., & Pozo C, O. (2004). Tecnología de Producción de Chile Piquín en el Noreste de México. Campo Experimental Rio Bravo. Folleto Técnico Núm. 29. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional del Noreste. Tamaulipas, México. 33 p. In.
- Rueda-Puente, E. O., Murillo-Amador, B., Castellanos-Cervantes, T., García-Hernández, J. L., Tarazòn-Herrera, M. A., Medina, S. M., & Barrera, L. E. G. (2010). Effects of plant growth promoting bacteria and mycorrhizal on *Capsicum annuum* L. var. *aviculare* ([Dierbach] D'Arcy and Eshbaugh) germination under stressing abiotic conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(8), 724-730.
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232.
- Sillo, E. E. C., Montufar, G. H. V., Bermeo, M. d. R. R., & Coronel, A. L. E. (2023). Use of organic fertilizers in the production of *Capsicum annuum* L. in the western mountain range of the Andes. *Centrosur Agraria*, 1(19).

- Steffen, G. P. K., Antonioli, Z. I., Steffen, R. B., & Machado, R. G. (2010). Casca de arroz e esterco bovino como substratos para a multiplicação de minhocas e produção de mudas de tomate e alface. *Acta zoológica mexicana*, 26(SPE2), 333-343.
- Sustr, M., Soukup, A., & Tylova, E. (2019). Potassium in root growth and development. *Plants*, 8(10), 435.
- Villalon-Mendoza, H., Medina-Martinez, T., Ramirez-Meraz, M., Urbina, S. E. S., & Maiti, R. (2014). Factors influencing the price of chile piquin wild chili (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) of north-east Mexico. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 5(1), 128-131.
- Villalon-Mendoza, H., Ramirez-Meraz, M., Ocanas, F. G., Maiti, R. K., & de Jesus Luna-Ruiz, J. (2015). Sustainable Management of Wild Chili (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) as an Alternative from Production to the Northeast of Mexico. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 6(2), 261-267.
- Zhang, X., Hu, Z., Pan, H., Bai, Y., Hu, Y., & Jin, S. (2022). Effects of rare earth elements on bacteria in rhizosphere, root, phyllosphere and leaf of soil–rice ecosystem. *Scientific Reports*, 12(1), 2089.

Evaluación de híbridos de maíz cultivados en suelo en condiciones de salinidad

Recibido em: 20/04/2025

Aprobado em: 14/05/2025

 10.46420/9786585756563cap10

Lorenzo Pérez-López 

Ofelda Peñuelas-Rubio 

Leandris Argente-Martínez 

Joe Luis Arias Moscoso 

Francisco Cadena-Cadena 

Jony R. Torres Velázquez 

Francisco Cervantes Ortiz 

Cesar Leobardo Aguirre-Mancilla* 

INTRODUCCIÓN

La salinidad es la consecuencia de la presencia en el suelo de sales solubles en altas concentraciones, se pueden encontrar tanto en la fase sólida como en la fase líquida por esta razón tiene una extraordinaria movilidad en el suelo Lutenberg (2019). Es uno de los factores abióticos que limitan el buen desarrollo y crecimiento de las plantas y como consecuencia la baja producción, principalmente en regiones de clima árido y semiárido, estrés que se manifiesta en bajos rendimientos de los cultivos, pérdida de variedades (Rodríguez-Delgado et al., 2025). Se proyecta que la salinización impactará el 50% de los cultivos alrededor del mundo en el 2050, lo que tendrá marcados efectos en la producción Velázquez-Ventura, et al (2020).

Evidentemente el problema de salinidad en los suelos ya es mundial, reflejándose en la baja producción de cultivos en la agricultura regada, así como en la no regada (Zhang et al., 2022). Los suelos afectados por este agente abiótico generalmente se desarrollan en zonas que reciben y acumulan sales que son transportadas de otros lugares con el agua. Su presencia afecta la asimilación de nutrientes por las plantas y la actividad microbiana del suelo (Irshad et al., 2022). Actualmente existen más de 833 millones de hectáreas de suelos afectados por salinidad en todo el mundo, que representan el 8.7 % del planeta. La mayoría de ellos se pueden encontrar en entornos naturalmente áridos o semiáridos en África, América Latina y Asia (Fadl et al., 2023).

Específicamente en México, la salinización afecta el 3.2% del territorio nacional alcanzando un promedio de 600,000 ha⁻¹ siendo los estados de Sonora, Sinaloa, Tamaulipas, San Luis Potosí, Chiapas, Nuevo León, Oaxaca, Veracruz y Zacatecas con mayor superficie agrícola con problemas de salinización (Jiménez-Mejía et al., 2022).

* Autor correspondiente: cesar.am@roque.tecnm.mx

El mejoramiento genético en el cultivo de maíz, es denominado mejoramiento vegetal convencional implementando diseños dialélicos mediante la hibridación de líneas puras endogámicas el cual contribuye a la selección de genotipos con tolerancia a la salinización.

Tomando como perspectiva la expansión demográfica en las últimas décadas, nos vemos obligados a elaborar estrategias para incrementar la producción de este cereal y así poder cubrir la futura demanda alimenticia. Por lo que una de las alternativas es comenzar a producir en zonas que presentan problemas de erosión, salinidad en el suelo y sequías. Por lo descrito anteriormente el objetivo del presente trabajo tiene como premisa la evaluación de cinco híbridos simples de maíz en suelos con condiciones moderadas de salinización.

MATERIAL Y MÉTODOS

El lugar donde se realizó el experimento fue en el área experimental del Tecnológico Nacional de México campus Tecnológico del Valle del Yaqui, ubicado sobre la Calle 600, Av. Tecnológico, Block 611, Bácum. Sonora. México, CP 85276, San Ignacio Río Muerto, Sonora. A una altitud de 26 msnm. El clima del municipio se clasifica en dos tipos, el sector al norte del río Yaqui tiene un clima Seco muy cálido y cálido, mientras que la mitad al sur del río registra clima Seco templado. La temperatura media anual de BÁCUM es de 24 °C. El suelo donde se estableció el experimento presenta un contenido de materia orgánica de 0.59 % y una conductividad eléctrica del extracto de saturación de 4.81 (Pérez-López et al., 2025).

Material Genético

El material genético utilizado se generó de un diseño dialélico, en el cual se realizaron cruza directas y recíprocas basado en el método I de Griffing; en base a nueve líneas endocriadas de maíz blanco (Tabla 2). De las 36 Cruzas Directas (CD) posibles se obtuvieron 21, 21 Cruzas Recíprocas (CR) y 7 autopolinizaciones. El total de tratamientos o genotipos fue de 5 híbridos simples, evaluados bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Tabla 2. Tratamientos. Híbridos simples evaluados

Tratamientos	Híbridos de maíz evaluados
T1	L6 PROMON X L7 TecNM – DCA 107
T2	L6 PRMON X L9 TecNM – 95 – 30 P16
T3	L1 TecNM – 38-R X L7 TecNM – DCA 107
T4	L7 TecNM – DCA 107 X L6 PROMON
T5	L2 TecNM – 144 - R56 X L6 PROMON

La siembra fue manual y se realizó el 25 de diciembre 2022, en surcos con una longitud de 5 metros, una distancia de 0.16 m entre plantas y 0.80 m entre surcos. En cuanto al manejo agronómico del cultivo la fertilización se realizó mediante cuatro aplicaciones de fertilizantes: una de fondo a base de UREA (46%) y mezcla de DAP (fosfato diamónico) (400 kg ha^{-1}) en el momento de la siembra. Durante la conducción del experimento se efectuaron otras tres aplicaciones de fertilizante previo a los riegos de auxilio, a razón de 150 kg ha^{-1} de NPK (18-18-18).

Riegos

Se aplicaron cinco riegos uno de emergencia y cuatro de auxilio, estos últimos con un intervalo 39 a 15 días para mantener una humedad aceptable durante la fenología del cultivo; con un promedio en láminas de riego de 11.5 mm.

Control de plagas

La presencia de plagas fue significativa en las primeras etapas del cultivo como el trips (*Rankliniella occidentalis*) y gusano cogollero (*Spodoptera fugiperda*), para lo cual se realizaron aplicaciones preventivas de los insecticidas Rimón® Supra y Decís® (deltametrina), en dosis de 1.0 L ha^{-1} respectivamente.

Para mantener el cultivo libre de malezas se realizaron dos pasos con la cultivadora y con ello proporcionar la suficiente aireación al suelo, además se realizó el control manual (deshierbes, cuando fue necesario) para eliminar posibles hospederos de plagas y enfermedades.

Variables evaluadas

Se midieron variables fisiológicas con el equipo portátil Irgaporómetro, durante la fenofase de floración, como la fotosíntesis (A) medidos en unidades de $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-2}$, Conductancia estomática (Gs) medido en unidades de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ y la transpiración (E) medidos en ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-2}$) y la Eficiencia de uso de agua foliar (WUE) medido en unidades de $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-2}$.

Variables agronómicas y de rendimiento evaluadas

Se evaluaron las variables componentes del rendimiento, como la profundidad del grano (PG, cm), se determinó mediante la diferencia entre el diámetro de la mazorca, el diámetro del olote (DOH) fue medida con un vernier digital, longitud y diámetro de la mazorca (LM y DM, respectivamente) ambas medidas en cm con flexómetro y la segunda con vernier digital marca TRUPUER.

El número de hileras por mazorca (NHM, unidad), número de granos por hilera (NGH, unidad), peso volumétrico (PV, g) expresado en gramos, se determinó en tres repeticiones de volúmenes de 250 g usando la balanza volumétrica (SUMILAB), y rendimiento (Rnd) de grano expresado en (kg ha^{-1}) al 14% de humedad siguiendo la metodología propuesta por Espinoza et al. (2010). De cada híbrido se tomaron veintiocho plantas (tres repeticiones de siete plantas en un metro lineal), tomando las mazorcas y desgranándolas para pesarlas y obtener el rendimiento.

La humedad del grano se determinó con el equipo Staeinlite® modelo 90 y la báscula para pesar los granos de cada híbrido simple evaluado.

Análisis estadísticos

Para el análisis estadístico de las variables evaluadas, se utilizó un análisis de varianza de rangos simples de efectos fijos para la identificación de las posibles diferencias significativas entre los 5 híbridos evaluados (Fisher, 1937). Los indicadores estadísticos error cuadrático medio (MSE), el valor calculado de Fisher (valor F), probabilidad de error cuando se está rechazando la hipótesis nula (p), el error estándar de la media (EE) y el coeficiente de determinación no ajustado fueron calculados. Cuando hubo efectos significativos entre los híbridos, se utilizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey para un nivel de significancia del 1%. Se utilizó el Paquete estadístico profesional STADISTICA, versión 14.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de clorofilas

En la Figura 1 se puede observar que el contenido de la variable clorofila, medidos en la etapa R2 y R3 en los cinco híbridos evaluados presentaron diferencias altamente significativas con un intervalo de 49.5 a 58 en unidades SPAD, siendo el tratamiento 1 (T1) el de mayor valor y el tratamiento 2 (T2) el de menor valor, y los tratamientos T3, T4 y T5 presentaron cantidades muy similares sin diferencias significativas entre sí. Dichos resultados coinciden con los obtenidos por Autores como Castañeda et al., (2018); en las mismas etapas fenológicas del cultivo., quienes reportaron valores de 54 unidades usando tal fertilizante nitrogenado en un suelo salino. Este estudio confirma que las plantas resultaron tolerantes a la salinidad con base a contenido de clorofila.

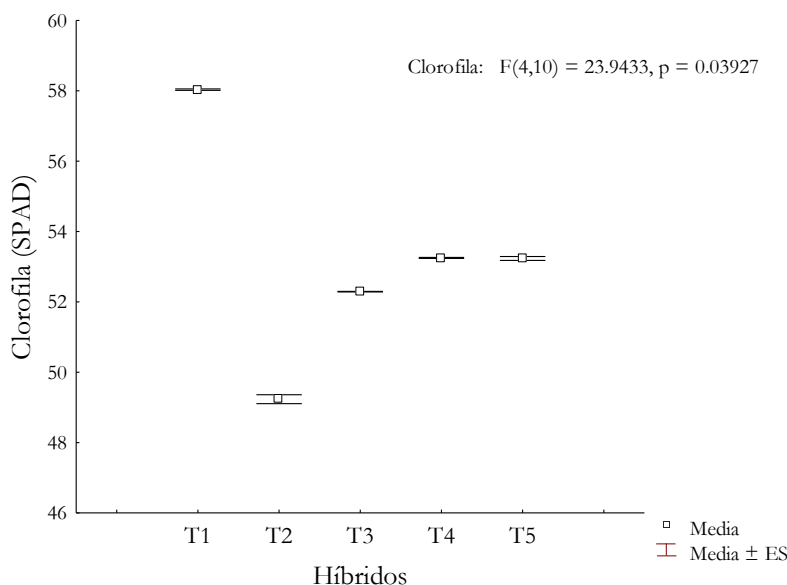


Figura 1. Contenido de clorofila (unidades SPAD) en cinco híbridos de maíz establecidos en un suelo salino a una $CE = 4.2 \text{ dS m}^{-1}$. Barras rectangulares representan error estándar de la media de los tratamientos. F (4,10): F de Fischer para cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. P: probabilidad de error.

La salinidad afecta el contenido de clorofila en algunas especies vegetales particularmente en maíz (Irshad et al., 2022). Algunos de los reportes más recientes indican que el uso de ácidos húmicos y otras enmiendas químicas reducen los efectos de la salinidad en el contenido de clorofilas a, b y consecuentemente en la actividad fotosintética (Malik et al., 2023). Estudios desarrollados recientemente por Sezer et al. (2021) demostraron el rol que tiene el uso de melatonina en el incremento del desarrollo y el contenido de clorofilas en maíz. Estos autores obtuvieron una disminución significativa superior al del contenido de clorofilas cuando el nivel de salinidad se acercaba a los 8 dS m^{-1} . Estos hallazgos confirman el efecto adverso de la salinidad en el desarrollo de las plantas dado que la salinidad obstaculiza la maquinaria fotosintética, la transpiración y el intercambio gaseoso al disminuir el contenido de clorofila y carotenoides, distorsionar la ultraestructura del cloroplasto y el sistema PSII y reducir la conductancia estomática (Sang et al., 2020).

Conductancia estomática

De esta variable en la Figura 2 se puede observar que hubo diferencias altamente significativas en los cinco tratamientos en los cinco híbridos evaluados, donde el tratamiento 1 (T1) presento la conductancia mayor y el tratamiento 5 (T5) el menor valor en unidades $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 315 y 130 respectivamente.

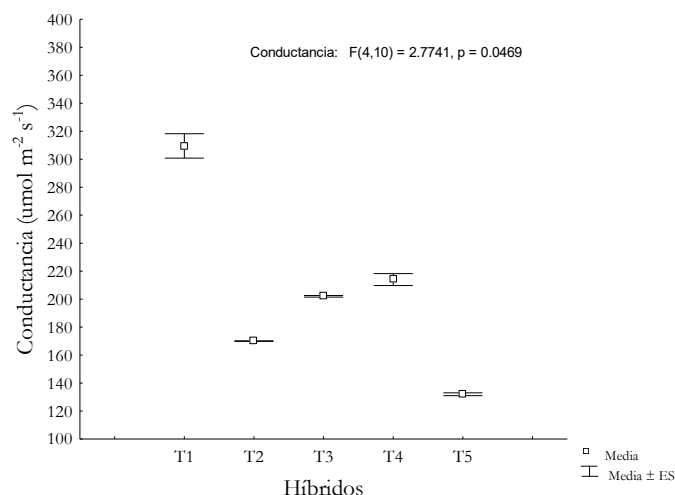


Figura 2. Conductancia estomática en cinco híbridos de maíz establecidos en un suelo salino a una CE= 4.2 dS m⁻¹. Barras rectangulares representan error estándar de la media de los tratamientos. F (4,10): F de Fischer para cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. P: probabilidad de error.

Las estomas juegan un papel clave en la regulación de la fotosíntesis y la transpiración, afectando el rendimiento y la productividad de los cultivos. Las variaciones de la conductividad estomática son mayormente función de las condiciones edáficas y ambientales más que de las capacidades morfológicas de las estomas (Haworth et al., 2021). Este proceso fisiológico conductancia estomática permite saber el grado de apertura de las estomas en las hojas de las plantas, considerado como un parámetro que regula la pérdida de vapor de agua y la entrada de CO₂, regulando la transpiración (E), maximizando la fotosíntesis (A). El rango promedio normal de la conductancia estomática va desde los 200 a los 300 $\mu\text{mol m}^{-2}$ y en este estudio fueron tres híbridos que presentaron estos valores, y dos por debajo de este parámetro.

Fotosíntesis

La variable fotosíntesis en los cinco híbridos evaluados Figura 3, presentaron diferencias altamente significativas, con un rango de 18 a 27 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de fotosíntesis máxima, destacándose el tratamiento 1 (T1) con el máximo valor con 27 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y el tratamiento 2 (T2) el de menor valor con 18 $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Estos valores se consideran relativamente buenos puesto que la fotosíntesis máxima promedio que puede presentar las plantas de maíz durante su desarrollo fenológico es de 35 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, en condiciones de suelo optimas sin problemas de salinidad.

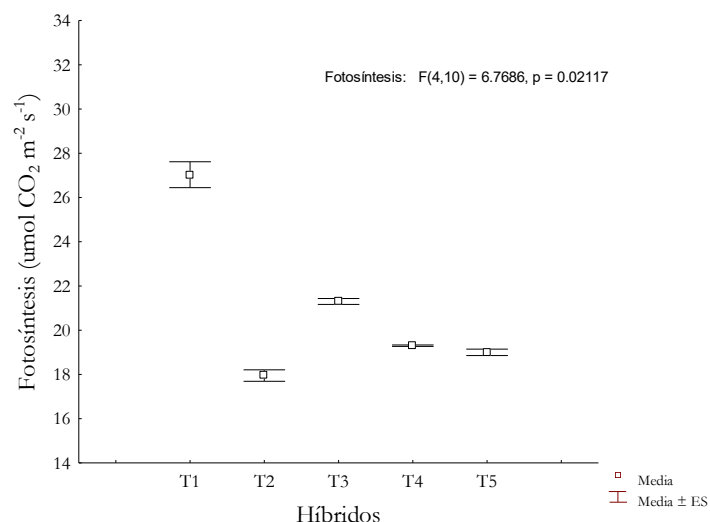


Figura 3. Fotosíntesis máxima en cinco híbridos de maíz establecidos en un suelo salino a una CE= 4.2 dS m⁻¹. Barras rectangulares representan error estándar de la media de los tratamientos. F(4,10): F de Fischer para cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. P: probabilidad de error.

Transpiración

En la Figura 4 se presentan los valores de transpiración de los cinco tratamientos evaluados en $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, con diferencias altamente significativas entre los tratamientos, observándose que el tratamiento 3 (T3), arroja los valores más altos con 1.98 y el tratamiento 2 (T2) el valor más bajo con 1.80 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

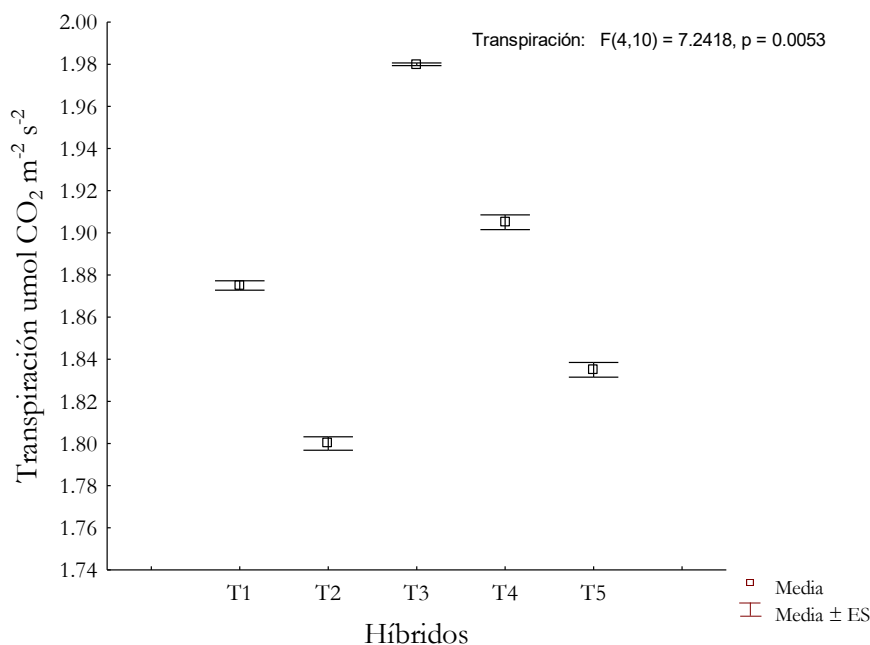


Figura 4. Transpiración en cinco híbridos de maíz establecidos en un suelo salino a una CE= 4.2 dS m⁻¹. Barras rectangulares representan error estándar de la media de los tratamientos. F(4,10): F de Fischer para cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. P: probabilidad de error.

Múltiples estudios demuestran el rol de la fotosíntesis y la transpiración en el desempeño agronómico del maíz (Yan et al., 2024). En condiciones de salinidad, con el incremento de estas variables se reducen las pérdidas por concepto del estrés salino. Mantener alta fotosíntesis y menor pérdida de agua por transpiración, tal como se observó en el híbrido T1 aquí evaluado, asegura una mayor eficiencia de uso de agua y por consiguiente un mayor rendimiento de grano (Nasar et al., 2021).

Rendimiento de grano

En la Figura 5 se muestra el rendimiento de grano de los híbridos evaluados. Existieron diferencias altamente significativas entre todos los híbridos. El rendimiento más alto se obtuvo en híbrido T1, superando las 14.3 t ha⁻¹. El híbrido T2 fue el de menor rendimiento de grano, clasificando como el más susceptible a la condición de salinidad existente en el suelo donde se desarrolló el experimento.

Estudios recientes demuestran que el maíz es más susceptible a la salinidad que el trigo encontrándose intensidad del estrés hasta del 80% cuando el nivel de salinidad supera los 6.5 dS m⁻¹ (Argente-Martínez et al., 2024). La reducción del rendimiento del maíz, es el resultado de diferentes afectaciones metabólicas y fisiológicas en las plantas que afectan la síntesis de almidón y de proteínas. Estudios desarrollados por Gao et al. (2024) encontraron afectaciones entre 20 % y 38 %, por efectos de la salinidad. Esta condición generó el aborto de granos, lo cual se identificó como la principal causa de la reducción del rendimiento del maíz bajo estrés hídrico y salino.

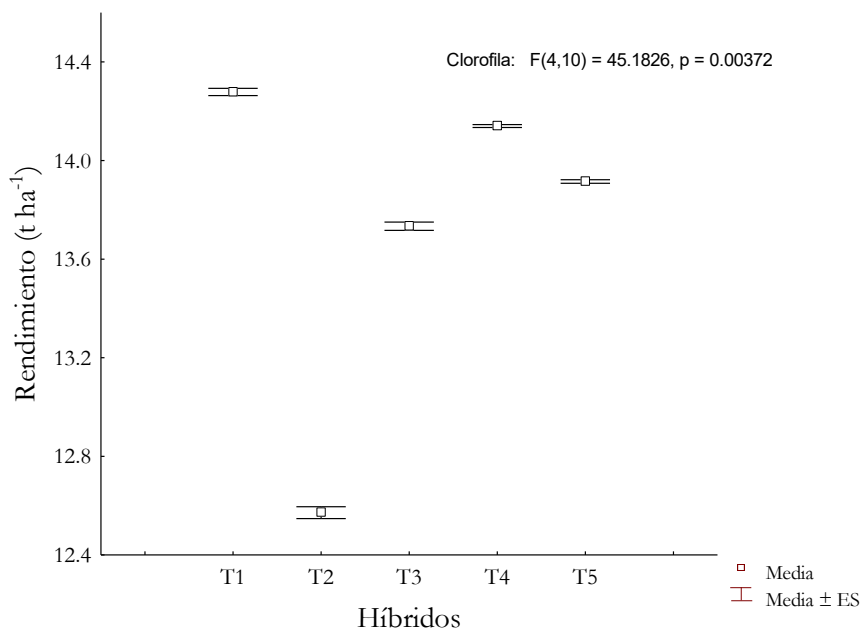


Figura 5. Rendimiento de grano de cinco híbridos de maíz establecidos en un suelo salino a una CE= 4.2 dS m⁻¹. Barras rectangulares representan error estándar de la media de los tratamientos. F(4,10): F de Fischer para cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. p: probabilidad de error.

CONCLUSION

Conforme a los resultados obtenidos en el presente estudio se concluyó que el híbrido T1, en todas las variables evaluadas fue el de valores más altos y por consiguiente menores afectaciones por la salinidad. El estrés salino a una conductividad eléctrica en el extracto de saturación de 4 dS m⁻¹ reduce el rendimiento de los híbridos evaluados entre el 6 y el 13%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argentel-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., Pérez-López, L., Aguilera, J. G., Steiner, F., Zuffo, A. M., & Ratke, R. F. (2024). Assessing Salinity, Drought and High Temperature Stress in Maize (*Zea mays* L.) and Wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties: Theoretical Combination as Multifactorial Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 210(6), e70001.
- Castañeda, C. S., Almanza-Merchán, P. J., Pinzón, E. H., CELY-REYES, G. E., & SERRANO-CELY, P. A. (2018). Estimación de la concentración de clorofila mediante métodos no destructivos en vid (*Vitis vinifera* L.) cv. Riesling Becker. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 329-337.
- Espinosa, A., Tadeo, M., Gómez, N., Sierra, M., Virgen, J., Palafox, A., Caballero, F., Vázquez, G., Rodríguez, F., & Valdivia, R. (2010). V-54 A, a new yellow grain maize variety for delayed rainfed planting in the High Valleys of Mexico. *Mexican Journal of Agricultural Sciences*, 1, 677-680.
- Fadl, M. E., Jalhoum, M. E., AbdelRahman, M. A., Ali, E. A., Zahra, W. R., Abuzaid, A. S., ... & Scopa, A. (2023). Soil salinity assessing and mapping using several statistical and distribution techniques in arid and semi-arid ecosystems, Egypt. *Agronomy*, 13(2), 583.
- Fisher RA. 1937. *The Design of Experiments*. Edinburgh; London: Oliver and Boyd.
- Gao, J., Liu, N., Wang, X., Niu, Z., Liao, Q., Ding, R., ... & Tong, L. (2024). Maintaining grain number by reducing grain abortion is the key to improve water use efficiency of maize under deficit irrigation and salt stress. *Agricultural Water Management*, 294, 108727.
- Haworth, M., Marino, G., Loreto, F., & Centritto, M. (2021). Integrating stomatal physiology and morphology: evolution of stomatal control and development of future crops. *Oecologia*, 197(4), 867-883.
- Irshad, I., Anwar-ul-Haq, M., Akhtar, J., & Maqsood, M. (2022). Effects of different organic amendments on maize (*Zea mays* L.) growth in salt affected soil. *Seed*, 1000, 100.
- Jiménez-Mejía, R., Medina-Estrada, R. I., Carballar-Hernández, S., Orozco-Mosqueda, M. D. C., Santoyo, G., & Loeza-Lara, P. D. (2022). Teamwork to survive in hostile soils: use of plant growth-promoting bacteria to ameliorate soil salinity stress in crops. *Microorganisms*, 10(1), 150.
- Lutenberg, O. (2019). La Salinidad y su Influencia en suelos y plantas. Línea]. Available: <http://www.ana.gob.pe/media/496359/salinidad.pdf>. Fecha de Consulta, 9, 32.

- Malik, Z., Malik, N., Noor, I., Kamran, M., Parveen, A., Ali, M., & Fahad, S. (2023). Combined effect of rice-straw biochar and humic acid on growth, antioxidative capacity, and ion uptake in maize (*Zea mays* L.) grown under saline soil conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(5), 3211-3228.
- Nasar, J., Khan, W., Khan, M.Z. et al. Photosynthetic Activities and Photosynthetic Nitrogen Use Efficiency of Maize Crop Under Different Planting Patterns and Nitrogen Fertilization. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 2274–2284 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00520-1>
- Pérez-López, L., Martínez, L. A., Peñuelas-Rubio, O., Moscoso, J. L. A., Aguilera, J. G., Cervantes-Ortiz, F., ... & Chávez, C. C. (2025). Preliminary selection of F1 maize hybrids for saline soils in the Yaqui Valley, Mexico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 29(7), e283312.
- Rodríguez-Delgado, I., Martín-Martín, G. J., Pérez-Iglesias, H. I., & García-Batista, R. M. (2025). Comportamiento de propiedades físicas, químicas y biológica del suelo en sistemas de producción agrícola. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 8(S1), 184-196.
- Sang, H., Guo, W., Gao, Y., Jiao, X., & Pan, X. (2020). Effects of alternating fresh and saline water irrigation on soil salinity and chlorophyll fluorescence of summer maize. *Water*, 12(11), 3054.
- Sezer, İ., Kiremit, M. S., Öztürk, E., Subrata, B. A. G., Osman, H. M., Akay, H., & Arslan, H. (2021). Role of melatonin in improving leaf mineral content and growth of sweet corn seedlings under different soil salinity levels. *Scientia Horticulturae*, 288, 110376.
- Velázquez-Ventura, J. C., Rincón-Sánchez, F., Ruiz-Torres, N. A., & Martínez-Reyna, J. M. (2020). Respuesta al estrés por salinidad de familias s1 de dos poblaciones de maíz. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(1).
- Yan, Y., Duan, F., Li, X., Zhao, R., Hou, P., Zhao, M., ... & Zhou, W. (2024). Photosynthetic capacity and assimilate transport of the lower canopy influence maize yield under high planting density. *Plant Physiology*, 195(4), 2652-2667.
- Zhang, Y., Hou, K., Qian, H., Gao, Y., Fang, Y., Xiao, S., ... & Ren, W. (2022). Characterization of soil salinization and its driving factors in a typical irrigation area of Northwest China. *Science of the Total Environment*, 837, 155808.

Efectos del QuitoMax[®] en la germinación de plántulas de tomate de las variedades Amalia y Claudia en condiciones semicontroladas

Recibido em: 31/03/2025

Aprobado em: 19/04/2025

 10.46420/9786585756563cap11

Carlos Avila Amador 

Nydia Estrellita Buitimea Cantua* 

Leandris Argenteal-Martínez 

Ofelda Peñuelas Rubio 

Joe Luis Arias Moscoso 

Francisco Cadena Cadena 

Raúl Carlos López Sánchez 

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es, a nivel mundial, uno de los cultivos más relevantes debido a su extensa producción, alta demanda y múltiples usos en la industria alimentaria. Puede consumirse tanto fresco como procesado en diversos productos (Ji et al., 2023; Al-Roshdi et al., 2023).

En la agricultura moderna, los productos bioactivos han ganado atención por sus múltiples beneficios para las plantas, tales como la inducción de mecanismos de defensa y la estimulación del crecimiento vegetal. Además, presentan la ventaja de no ser dañinos ni para las plantas ni para el medio ambiente (Alzate et al., 2022; Gedeon et al., 2022).

Dentro de esta categoría, los bioestimulantes constituyen una variedad de productos que contienen principios activos capaces de influir en la fisiología de las plantas, promoviendo su desarrollo, mejorando su productividad y aumentando su resistencia frente a enfermedades, lo que se traduce en un incremento de los rendimientos agrícolas (Hernández et al., 2022; Chele et al., 2021). El quitosano estimula las enzimas y otros metabolitos en plantas y el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Malerba; Cerana, 2016).

Hace varios años Falcón et al. (2021) informaron que el QuitoMax[®], una formulación líquida basada en quitosano, ha mostrado efectos positivos en el rendimiento de cultivos como hortalizas, granos y tubérculos. Estos estudios se realizaron en diversas localidades y condiciones en Cuba. Así mismo, los efectos fueron beneficiosos en la fisiología y el crecimiento de plántulas de tabaco en semillero, con la aspersión foliar de QuitoMax[®] (Sotolongo et al., 2025).

* Autor correspondiente: nydia.buitimea@unison.mx

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la imbibición, durante 24 horas, de semillas de tomate de las variedades Amalia y Claudia en una solución de QuitoMax[®] con una concentración de 1 g L⁻¹, sobre el desarrollo de las plántulas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en condiciones semicontroladas en el invernadero de producción de plántulas del Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Yaqui, Obregón, México. El área experimental presentó las siguientes condiciones climáticas: temperatura promedio (medida con pistola de infrarrojo, *TRUPER*) 21 °C y una humedad relativa (HR) del 37% (determinada mediante heliógrafo satelital).

Preparación del sustrato y siembra

Las semillas se colocaron en bandejas de polipropileno de 128 cavidades (66.4 cm de largo x 33.5 cm de ancho y 7.7 cm de alto). Las semillas se sembraron a una profundidad de 1 cm. Se utilizó un sustrato inerte tipo *SUNSHINE*, el cual fue humedecido hasta un 95% de la capacidad de campo con agua común con una conductividad eléctrica de 0.22 dS m⁻¹.

Se utilizaron semillas de los cultivares Amalia y Claudia, con un poder germinativo superior al 95%, ambas variedades obtenidas a través del Programa de Mejoramiento Genético del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). Las semillas empleadas se desinfectaron con hipoclorito de sodio durante 30 segundos y se lavaron con abundante agua destilada estéril.

El bioestimulante QuitoMax[®] (4 g L⁻¹, 0.5% de ácido acético y 0.07% de iones de potasio), cuyo ingrediente activo es un polímero de quitosano, obtenido por el Grupo de Productos Bioactivos (GPB) del INCA (Terry et al., 2017). Este producto se obtiene a partir de la desacetilación básica (NaOH) de la quitina presente en la cubierta de las langostas y se utilizó para embeber 64 semillas de cada variedad en una solución de QuitoMax[®] a una concentración de 1 g L⁻¹ durante 24 horas.

Posteriormente, las semillas se extrajeron de los tubos *Falcon* donde fueron pregerminadas, separando el residual de la solución con toallas de papel estériles y se sembraron manualmente en las bandejas.

Fertilización, riegos y atenciones culturales a las plántulas

Se realizó una fertilización a los siete días después de la emergencia (dde) a razón de 1 g L⁻¹ a base del fertilizante fórmula completa (Triple 19) (19-19-19). Posteriormente, se aplicó una segunda fertilización con el mismo fertilizante, pero a una concentración de 5 g L⁻¹ aplicando un volumen de 10 ml por cepellón. El riego en las bandejas se aplicó a diario, para mantener el sustrato en el 95% de la capacidad de campo.

Tratamientos, hipótesis y diseño experimental

Durante la pregerminación de las semillas, aplicando la dosis de 1 g L⁻¹ de QuitoMax[®] durante 24 horas en ambas variedades, los frascos de pregerminación se mantuvieron a temperatura ambiente (21 °C) para evaluar su efecto en el tiempo de ocurrencia de la emergencia y el porcentaje final de germinación.

Hipótesis a probar

H0: la aplicación de QuitoMax[®] durante el proceso de imbibición de las semillas no modifica el tiempo de ocurrencia de la emergencia, el porcentaje final de germinación ni las variables del desarrollo.

Hi: la aplicación de QuitoMax[®] durante el proceso de imbibición de las semillas sí modifica el tiempo de ocurrencia de la emergencia, el porcentaje final de germinación y las variables del desarrollo.

Tratamientos y diseño experimental

Se establecieron cuatro tratamientos, que consistieron en las dos variedades utilizadas sin el bioestimulante, y los otros dos tratamientos con la dosis de QuitoMax[®]. En todos los tratamientos el tamaño de muestra fue de n= 64 semillas.

Tabla 1. Tratamientos.

Tratamientos	Variedades	QuitoMax [®] (g L ⁻¹)
T1	Amalia	0
T2	Amalia	1
T3	Claudia	0
T4	Claudia	1

Variables Evaluadas

Tiempo de ocurrencia de la emergencia. El tiempo de ocurrencia de la emergencia se evaluó cuando más del 50% de las plántulas habían emergido, contando la cantidad de días transcurridos hasta este momento, su respectivo porcentaje y el tiempo a la emergencia hasta lograr mayor porcentaje de germinación.

El vigor vegetal inicial de las plántulas

El vigor vegetal inicial de las plántulas (VVi), se evaluó siguiendo la metodología propuesta por Esparza et al. (2010), clasificando las plántulas de la siguiente forma: 5- plántulas sanas, sin clorosis ni curvaturas del tallo; 4- plántulas con clorosis y/o curvaturas en tallo; 3- plántulas dañadas o con ausencia de alguna hoja cotiledonal; 2- plántulas marchitas; 1- plántulas muertas. Esta medición se desarrolló por única vez a los 20 días posterior a la emergencia.

Índice de vegetación de diferencia normalizada

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI de sus siglas en inglés) se midió con un sensor portátil (Govaerts; Verhulst, 2010), a partir de los 6 días después de la emergencia, estableciendo una dinámica de mediciones a intervalos semanales, en cada bandeja se tomaron 30 mediciones a una altura de 0.60 m del dosel de las plántulas, conforme a la referencia del sensor. Esta variable se evaluó para comparar, en cada tratamiento, el valor del NDVI (por sus siglas en inglés); $-1 < \text{NDVI} < 1$, cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutrimentales del cultivo (en especial de nitrógeno) y la posible incidencia de estrés. Valores mayores del NDVI representan un mejor estado nutritivo (Inman et al., 2005).

Variables del desarrollo de las plántulas

A los 25 dde en condiciones de semillero, se seleccionaron 10 plántulas al azar por cada tratamiento, a las que se les realizaron las siguientes evaluaciones:

- Altura de las plántulas (AP): se midió en cm con cinta o flexómetro marca *TRUPER*, con un error de medición de 0.0001 cm, la base del tallo hasta el primordio.
- Longitud de la raíz (LR): se midió en cm con similar instrumento (flexómetro) desde el cuello de la raíz hasta el límite de la raíz principal.
- Diámetro del tallo de las plántulas (DT): se determinó en cm con un pie de rey digital (*TRUPER*), a partir de dos centímetros por encima del cuello de la raíz.
- Relación raíz-altura de la planta ($r_{R/T}$). En las plántulas tomadas para ambas mediciones se calculó la relación entre órganos mediante el cociente entre la longitud de las raíces y la altura de las plántulas.
- Número de hojas por plántula (NH): por conteo.
- Volumen de las raíces (VR): se tomaron raíces de forma aleatoria, las que fueron lavadas cuidadosamente con agua destilada para separar el sustrato y se introdujeron, de forma individual en una probeta graduada con agua, a volumen conocido y por diferencia de volumen se determinó el correspondiente a cada medición, se expresó en cm^3 .

Análisis estadísticos

Se comprobó el cumplimiento de los supuestos teóricos de homogeneidad de varianzas (Kolmogorov, 1933). Posteriormente, se realizaron análisis de varianza de clasificación simple basados en un modelo lineal de efectos fijos (Fisher, 1935) y cuando existieron diferencias entre las medias de los tratamientos, se empleó la prueba de comparación múltiple de Tukey, para un nivel de significación del 1% (Tukey, 1960). Se empleó para este análisis el paquete estadístico profesional *ESTATISTIC*, versión 14.2 para *Windows*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tiempo de ocurrencia de la emergencia (TOE) se afectó con la imbibición de la semilla en la solución de QuitoMax® a una dosis de 1 g L⁻¹ (Tabla 2). En la variedad Amalia la emergencia se retrasó dos días al compararla con el control, con diferencias significativas ($F=4.1936$; $p=0.00421$). En esta variedad (Amalia) el tiempo de ocurrencia al 95% de emergencia de las plántulas (germinación efectiva) fue de 11 días, mientras que sin el bioestimulante fue de nueve días. Similar respuesta se encontró en la variedad Claudia, donde la emergencia ocurrió un día después, respecto a cuando no se pregerminaron las semillas con QuitoMax® (a los 10 días). Con estos hallazgos, se rechaza la hipótesis nula referida a que la aplicación de QuitoMax® durante el proceso de imbibición de las semillas no modifica el tiempo de ocurrencia de la germinación ni el porcentaje final de esta.

Estos resultados difieren de los obtenidos por Reyes y Enríquez (2019), quienes reportaron una disminución del tiempo de emergencia al tratar las semillas con (1000, 2000 y 3000 mg L⁻¹) en la variedad de tomate Amalia. Una explicación de los resultados obtenidos en esta variable (TOE) en el presente trabajo, puede ser debido a que el QuitoMax® es una molécula orgánica considerablemente grande (124 kDa de masa molecular, 44-60% de grado de acetilación y viscosidad de 0,08-0,12 g cm⁻¹ seg⁻¹) (Falcón et al., 2015), lo que puede hacer más lenta la absorción durante la pregerminación.

Tabla 2. Tiempo de ocurrencia de la emergencia (TOE) y vigor vegetal inicial (VVi) de las variedades Amalia y Claudia embebidas en la solución de QuitoMax® y respectivo su control.

Tratamientos	TOE (días)	VVi
Amalia	9a	5
Amalia + Q	11c	5
Claudia	9a	5
Claudia + Q	10b	5

En concordancia con este supuesto, Mouden et al. (2020) estudiaron que a las 24 horas después de iniciada la imbibición, las semillas pueden aún incrementar su peso por concepto de absorción de agua, este trabajo indica que 24 horas quizás no es suficiente para que el quitosano penetre la cubierta seminal. Otros resultados también publicaron el efecto del tamaño de la molécula de quitosano lo que pudiera dificultar su entrada a través de la testa o cubierta seminal.

Se conoce que el tomate tiene una cubierta seminal semipermeable, fina y dura (Bewley Black, 1882, citado por Vázquez, 2021) pero no todos los compuestos orgánicos logran atravesarla (Mouden et al., 2020), conforme fue descrito al evaluar la permeabilidad de la testa de ocho cultivares de tomate y el efecto del uso de ácido jasmónico.

El porcentaje de germinación efectiva (PGe), asumiendo este a partir del momento en que el 95% de las plántulas habían emergido, presentó diferencias significativas entre tratamientos ($F= 687.75$;

$p=0.00054$) y este indicador fue superior en 4% en la variedad Claudia (Figura 1) al compararla los valores de los tratamientos de semillas embebidas en la solución de QuitoMax[®] con su control.

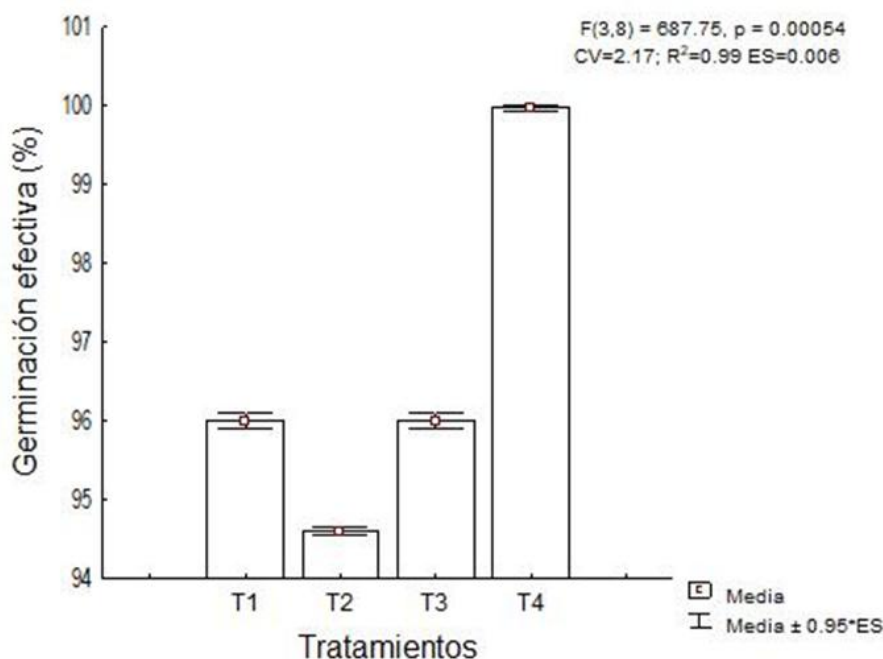


Figura 1. Germinación efectiva de las semillas de las variedades Amalia y Claudia al aplicar QuitoMax[®] y su respectivo control (T1: Amalia; T2: Amalia + Q; T3: Claudia; T4: Claudia + Q).

En la variedad Amalia el valor del PGe fue menor en un 1.4%. Las plantas que germinaron en las bandejas, posterior a los 12 días se desecharon ya que tendría teóricamente variaciones en los parámetros del desarrollo para posteriores evaluaciones.

La evaluación de esta variable permitió concluir que, por efecto de los tratamientos, se explicó el 99% de la variabilidad total existente en los datos ($R^2=0.99$) y el porcentaje de variación fue del 2%. Con independencia de lo obtenido con o sin QuitoMax[®] y del tiempo de ocurrencia, todas las semillas establecidas germinaron (datos no mostrados), lo que indica que las semillas de ambas variedades eran básicas presentan suficiente energía de germinación y poder germinativo.

Coincidiendo con los resultados obtenidos en la variedad Claudia, se informa que el uso del QuitoMax[®] mejora los porcentajes de emergencia en el cultivo del tomate (López et al., 2021; González et al., 2021), pepino (*Cucumis sativus*) (Masjuan et al., 2018), pimiento (*Capsicum annuum*) (Masjuan et al., 2022), maíz (*Zea mays* L.) (Blanco et al., 2022) aunque en este caso sólo a partir del quinto día. Efecto similar fue obtenido al aplicar Quitina y/o Quitosano en la semilla a 25, 50 y 100 ml L⁻¹ (Amine et al., 2020).

En cambio, el vigor vegetal inicial (VVi) no mostró diferencias al observar las plántulas de los diferentes tratamientos (Tabla 2). Se les asignó a todos, conforme a la metodología de Esparza et al. (2010), la puntuación máxima en la escala de evaluación.

Todas las plántulas presentaron uniforme pigmentación, sin clorosis ni necrosis, ni daños en la conformación normal de las hojas cotiledonales y verdaderas, ni curvaturas del tallo.

La similitud observada en el VVi de las plántulas, a los 20 dde, evidencia que las semillas presentaban suficiente poder germinativo, y que la aplicación del QuitoMax® durante la pregerminación no afectada el vigor vegetal inicial, por lo que para este indicador se acepta la hipótesis nula planteada.

Altura de las plántulas y tiempo de crecimiento relativo

Existieron diferencias significativas, entre los tratamientos, para la variable AP ($F=2009.3$; $p=0.00389$). La aplicación de QuitoMax® promovió el desarrollo de las plántulas, aun cuando el tiempo de ocurrencia de la emergencia fue menor en los tratamientos donde se aplicó. La mejor contribución del bioestimulante aplicado fue en la variedad Claudia respecto a las restantes variantes experimentales establecidas (Figura 2).

Además, por efecto de los tratamientos, la variabilidad total encontrada en la variable AP fue del 95%. Esto demuestra que el QuitoMax® aporta al desarrollo inicial de las plantas de forma significativa ($r=0.99^{**}$ y 0.98^{**}) para los tratamientos en Claudia y Amalia, respectivamente. En ambos casos el grado de bondad de ajuste de los datos superior a 94%.

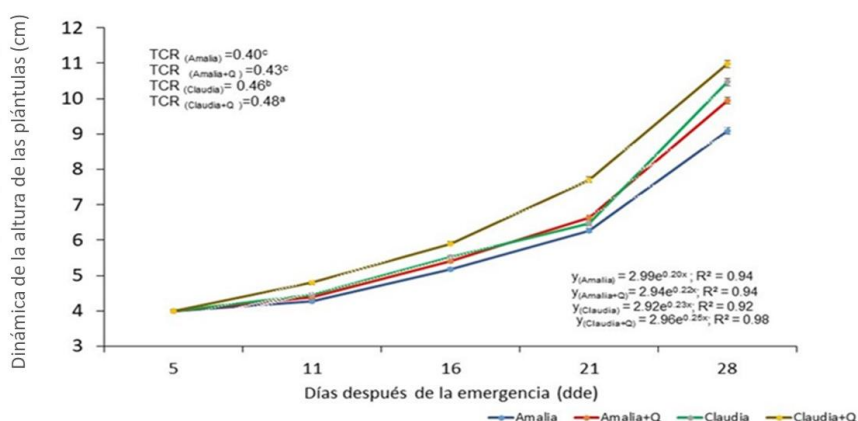


Figura 2. Dinámica de la altura de las plántulas en los tratamientos a los 6; 11; 16; 21 y 28 dde. Tiempo de crecimiento relativo, expresado en cm cada 24 horas.

En todos los tratamientos la AP describieron una curva de la forma $F_{(x)} = c \cdot e^{f(x)}$ (curva exponencial) del desarrollo y en ambas variedades (Figura 2). Lo obtenido demuestra que, aunque hubo una mejor respuesta de las plantas para la variable AP con la aplicación del bioestimulante, la normalidad teórica del desarrollo no se afectó, por tanto, el efecto solo fue metabólico, sin alteraciones extremadamente diferentes al desarrollo normal de las plantas (Fang et al., 2022; Hsieh et al., 2021).

También, por efecto de la aplicación del QuitoMax® se incrementó la pendiente de las curvas que describen la AP (ecuaciones exponenciales en Figura 2). En el presente ensayo, la variedad Claudia superó

a Amalia en altura de las plántulas. La tasa de crecimiento relativo aumentó en 0.02 y 0.03 cm día⁻¹ para Claudia y Amalia, respectivamente, cuando las semillas fueron embebidas en la solución de QuitoMax[®].

Los resultados del presente trabajo coinciden con los obtenidos por Castro et al. (2022) que, al aplicar quitosano en la semilla de plantas de tomate, reportaron la obtención de plantas más robustas. Estos efectos beneficiosos pueden deberse a que el quitosano aumenta la eficiencia de la absorción de nutrientes (Zanin et al., 2018), y consecuentemente se estimula el desarrollo de la parte aérea. Resultados similares obtuvieron al utilizar el quitosano en tomate Reyes y Enríquez (2019) y Terry et al. (2017). Efecto similar fue obtenido al aplicar Quitina y/o Quitosano en la semilla a 25, 50 y 100 ml L⁻¹ (Amine et al., 2020).

La influencia de este bioestimulante pudiera estar relacionada con la disponibilidad de los productos de la descomposición de la quitina tales como amonio y sus derivados que, al germinar las plantas, pueden ser utilizadas en las primeras etapas del desarrollo de las plántulas y pueden constituirse en una fuente lenta pero sostenida de nitrógeno, cuya duración puede llegar incluso a los tres meses (Beier; Bertilsson, 2013).

Estos resultados conllevan a rechazar la hipótesis nula en relación a la influencia del bioestimulante en la calidad de las plántulas. Demostrándose la factibilidad de la utilización del bioestimulante, al ser este indicador más visible para determinar que las plantas están de trasplante.

Índice de vegetación de diferencia normalizada

Al evaluar el NDVI en las plántulas de tomate, se pudo observar que las semillas de las variedades que fueron tratadas con el bioestimulante en la pregerminación mostraron los mayores valores. La variedad Claudia con QuitoMax[®] fue la de mejores resultados con 0.73 y la variedad Amalia sin QuitoMax[®], la de más bajo NDVI con 0.67, con diferencias altamente significativas entre los tratamientos (F=1021; p=0.00172) (Figura 3). Al comparar los resultados de este indicador, en cada variedad con su control, los valores se incrementaron al utilizar el bioestimulante en 0.2 unidades en ambos cultivares.

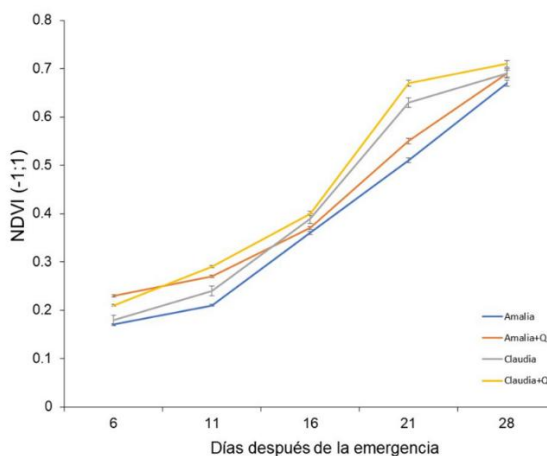


Figura 3. Índice de vegetación de diferencia normalizada, en los tratamientos a los 6; 11; 16; 21 y 28 días después de la emergencia (dde). Barras rectangulares en las líneas representan error estándar para $p < 0.01$.

Con los datos obtenidos se demuestra que las plantas presentaban buena nutrición carbonada y nitrogenada (Chiesi et al., 2022) Se informó que los mayores valores del NDVI ($-1 < \text{NDVI} < 1$) representan un mejor estado nutricional de las plantas (Inman et al., 2005).

Además, el NDVI es un indicador importante del estado nutricional de las plantas (Stefen et al., 2016) y ofrece una aproximación de la eficiencia de uso de N disponible en el suelo (Allbed et al., 2014). El NDVI reconocido, como un indicador preciso del buen estado fisiológico y nutricional en plantas (Bian et al., 2021) y que existe una alta correlación entre NDVI y el índice de área foliar en el cultivo del tomate (Chicaneli, 2019).

Se informó que, en las plantas, la funcionalidad del sistema radicular se refleja en el rendimiento del área foliar (Chen et al., 2019). El alto vigor vegetal (NDVI alto) indica que las raíces han explorado la profundidad suficiente para obtener agua y nutrientes y apoyar la demanda transpiratoria (Blum, 2017), en plántulas de tomate es relevante el funcionamiento del sistema radical y por tanto el uso de QuitoMax[®] en la pregerminación.

Los resultados encontrados en el presente experimento indican que el QuitoMax[®] favorece el desarrollo foliar, especialmente si se reconoce que el NDVI es uno de los indicadores de vegetación más prácticos y de fácil acceso utilizados por ecólogos y agrónomos para utilizarlo con éxito en trabajos científicos y prácticos (Shammi; Meng, 2021; Lykhovyd et al., 2021). Además, es el índice de vegetación de mayor aceptación debido a su capacidad para representar la intensidad de los procesos de crecimiento de las plantas (Li et al., 2019).

Variables morfológicas

Al analizar la variable altura de las plántulas se encontraron diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($F=0213.4$; $p=0.00001$) por lo que se rechaza la hipótesis sobre la similitud de respuesta de la variable evaluada en los tratamientos (hipótesis nula). Los tratamientos establecidos contribuyeron en un 95% a la variabilidad total encontrada en la altura de las plantas, por lo que el modelo matemático empleado permitió identificar estas diferencias ($R^2=0.95$).

Los mayores valores de AP se obtuvieron con el uso del QuitoMax[®] en la variedad Claudia (10.89 ± 0.03 cm) y los menores en la variedad Amalia (9.11 ± 0.01 cm) sin la aplicación de este. En la variedad Amalia este indicador fue de (9.96 ± 0.04 cm) al embeber la semilla en la solución del bioestimulante comparado con el control solo con agua destilada. En la variedad Claudia la AP fue menor 10.35 ± 0.04 cm) en el tratamiento que no se aplicó el bioestimulante (Tabla 3).

Este resultado demuestra la efectividad del bioestimulante empleado para la promoción del desarrollo aéreo, por tanto, su mayor efecto es a nivel foliar, coincidiendo con lo reportado para el tomate por otros autores (Gómez et al., 2023; Castro et al., 2022; Reyes et al., 2020; Reyes; Enríquez, 2019), y en pimiento (Sierra et al., 2023; Masjuan et al., 2022). Efecto similar fue obtenido al aplicar quitina y/o

quitosano en la semilla de tomate a 25, 50 y 100 ml L⁻¹ (Amine et al., 2020). Asimismo, al determinar el efecto de seis concentraciones de QuitoMax[®] sobre el crecimiento y producción del cultivo de pepino, Reyes et al. (2024) concluyeron que este bioestimulante influyó en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Tabla 3. Variables morfológicas evaluadas a los 28 dde en los tratamientos establecidos.

Tratamientos	AP	LR	GT	Pf A	Pf R	VR	r _{R/T}	NH
Amalia	9.11 ^d	7.9	2.25 ^b	0.61 ^b	0.48 ^b	3.9	1.39 ^a	3.3 ^b
Amalia + Q	9.96 ^c	8.5	2.25 ^b	0.77 ^b	0.67 ^a	3.9	1.63 ^a	3.8 ^{ab}
Claudia	10.35 ^b	7.8	2.25 ^{ab}	1.0 ^a	0.46 ^b	3.6	1.02 ^b	4.1 ^a
Claudia + Q	10.89 ^a	8.8	2.26 ^a	1.01 ^a	0.58 ^{ab}	4.6	1.11 ^b	3.8 ^{ab}
ES	0.1	0.23	0.22	0.01	0.03	0.03	0.15	0.05
R ²	0.95	0.83	0.36	0.59	0.29	0.45	0.45	0.24

[AP: Altura de las plántulas (cm); LR: Longitud de la radícula (cm); GT: Grosor del tallo (mm); Pf A: Peso fresco parte aérea (g); Pf R: Peso fresco de la raíz (g); VR: Volumen de la raíz (ml³); r_{R/T}: Relación longitud de la raíz/ altura de la planta; NH: Número de hojas (NH)]Medias con letras iguales no difieren por Tukey para p<0.01. ES: error estándar; CV: coeficiente de variación; R²: coeficiente de terminación sin ajustar]

En el presente trabajo solo en esta variable el modelo matemático permitió identificar la variabilidad de respuesta en un alto porcentaje, aunque en las restantes variables evaluadas existieron también diferencias.

Aunque se obtuvieron mayores valores de LR de ambas variedades y mayor VR en la variedad Claudia (Tabla 3), no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, resultado similar fue reportado por Reyes et al. (2020) en el cultivo del tomate concentraciones de 1,0 y 2,0 g L⁻¹.

Los resultados de esta investigación mostraron, además, que la imbibición de las semillas en QuitoMax[®] (1 g L⁻¹) durante 24 horas logró valores favorables al compararlo con el control en la AP, GT, LR, Pf A, Pf R, VR en la variedad Claudia, y en la variedad Amalia para el NH y R(LR/AP) (Tabla 3). Resultados similares reportaron González et al. (2021) y Reyes et al. (2020) al evaluar la influencia del QuitoMax[®] sobre la germinación y la calidad de las plántulas de tomate.

El mecanismo de acción del quitosano en tomate, se relacionó con un incremento del contenido de clorofila luego de la aplicación foliar (Reyes et al., 2020). Condición que puede variar de acuerdo a la concentración de quitosano utilizada (Salachna; Zawadzinska, 2014). Al aplicar quitosano en el cultivo del pepino, este presentó efectos positivos en las variables de crecimiento y desarrollo el cual estimula un incremento de la producción de clorofila y la fotosíntesis en las plantas (Rendina et al., 2019).

Una posible explicación para estos resultados es que se deben a la incorporación de nutrientes (N, P, K), los cuales favorecen el crecimiento de las plantas (Castro et al., 2022) o al incremento de la actividad de enzimas claves del metabolismo del N y del C (Colman et al., 2019).

En sentido general, el efecto del QuitoMax[®] fue más notorio cuando se evaluó la altura de la planta, la tasa de crecimiento relativo, la masa fresca de la parte aérea y el índice de vegetación de diferencia normalizada. El bioestimulante estudiado influyó positivamente en el desarrollo aéreo de las plantas de tomate y se demuestra que el NDVI fue un indicador preciso para establecer las diferencias con el uso del QuitoMax[®], en ambas variedades.

CONCLUSIONES

La aplicación de QuitoMax[®] en la imbibición de semillas de tomate demostró efectos positivos sobre diversas variables morfológicas y fisiológicas, tales como el incremento en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la mejora en la altura y el vigor vegetal inicial de las plántulas.

En la variedad Claudia, el bioestimulante mostró un impacto significativo, aumentando la altura de las plántulas y la tasa de crecimiento relativo, con resultados superiores a los observados en la variedad Amalia.

Si bien las diferencias en ciertas variables (como el volumen de la raíz y la longitud de la radícula) no fueron significativas, los resultados obtenidos sugieren que el uso de QuitoMax[®] mejora el desempeño general de las plántulas al proporcionar una fuente adicional de nutrientes durante las primeras etapas del desarrollo.

La variabilidad observada en los tratamientos demuestra que QuitoMax[®] influye directamente en el desarrollo aéreo de las plantas, lo que reafirma la factibilidad de emplear QuitoMax[®] como una alternativa para mejorar la calidad de las plántulas ofreciendo beneficios específicos que contribuyen al manejo sostenible de este cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allbed, A., Kumar, L., y Aldakheel, Y. Y. (2014). Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma*, 230, 1-8. doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025
- Al-Roshdi, M. R., Ammara, U., Khan, J., Al-Sadi, A. M., y Shahid, M. S. (2023). Artificial microRNA-mediated resistance against Oman strain of tomato yellow leaf curl virus. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1164921. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1164921.
- Alzate, Z, M. Y., Miras, M, B., Monterisi, S., Rouphael, Y., Colla, G., Lucini, L., y Pii, Y. (2022). Integrated Metabolomics and Morpho-Biochemical Analyses Reveal a Better Performance of *Azospirillum brasilense* over Plant-Derived Biostimulants in Counteracting Salt Stress in Tomato. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14216.https://doi.org/10.3390/ijms232214216.

- Amine, R., Abba, E. H., Mohammed, B. I., and Khadija, O. (2020). The Amendment with Chitin and/or Chitosan Improves the Germination and Growth of *Lycopersicon esculentum* L., *Capsicum annum* L. and *Solanum melongena* L. *Indian Journal of Agricultural Research*, 54(4), 420-428. DOI: 10.18805/IJAR.A-452
- Beier, S., and Bertilsson, S. (2013). Bacterial chitin degradation—mechanisms and ecophysiological strategies. *Frontiers in microbiology*, 4, 149. doi.org/10.3389/fmicb.2013.00149
- Bian, L., Wang J., Liu J. y Han B. (2021). Spatiotemporal Changes of soil salinization in the yellow river delta of China from 2015 to 2019. *Sustainability* 13(2): 822.https://doi.org/10.3390/su13020822.
- Blanco, B., Y., Cartay R., O. E., & Espina N., M. (2022). Efecto de diferentes formas de aplicación del QuitoMax® en el crecimiento del maíz. *Agroonomía Mesoamericana*, 47246-47246.
- Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant Cell and Environment* 40(1):4–10. Doi.org/10.1111/pce.12800
- Castro, L. I., Calero H, A., Rodríguez H, M. G., Peláez C, A., Martínez B, D., & Pérez, Y. (2022). Potencialidades de dos bioestimulantes en la germinación y el crecimiento de las plántulas de tomate. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2343
- Chele, K. H., Steenkamp, P., Piater, L. A., Dubery, I. A., Huyser, J., y Tugizimana, F. (2021). A global metabolic map defines the effects of a Si-based biostimulant on tomato plants under normal and saline conditions. *Metabolites*, 11(12), 820.https://doi.org/10.3390/metabo11120820.
- Chen, G., Hobbie SE, Reich PB, Yang Y, Robinson D. (2019). Allometry of fine roots in forest ecosystems. *Ecology Letters* 22(2):322–331. https://doi.org/10.1111/ele.13193
- Chicaneli, I. N. (2019). Avaliação de índice de área foliar por meio de sensoriamento remoto em pivo central na cultura do tomate. *Anais da semana agrônômica da faculdade evangélica de goianésia*, 9(1). https://www.rincon061.org/.
- Chiesi, M., Angeli, L., Battista, P., Fibbi, L., Rapi, B., Gozzini, B., & Maselli, F. (2022). Monitoring and analysis of crop irrigation dynamics in Central Italy through the use of MODIS NDVI data. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1), 23-36. https://doi.org/10.1080/22797254.2021.2013735
- Colman, S. L., Salcedo, M. F., Mansilla, A. Y., Iglesias, M. J., Fiol, D. F., Martín-Saldaña, S., Alvarez, V. A., Chevalier, A. A., & Casalongué, C. A. (2019). Chitosan microparticles improve tomato seedling biomass and modulate hormonal, redox and defense pathways. *Plant Physiology and Biochemistry*, 143, 203-211. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.002
- Esparza, D. G, López C. J, Villanueva- J. JA, Osorio A. F, Otero C. G & Camacho D. E (2010) Concentración de azadiractina, efectividad insecticida y fitotoxicidad de cuatro extractos de *Azadirachta indica* A. Juss. *Agrociencia* 44(7): 821- 833. https://www.scielo.org.mx/scielo.

- Falcón, R. A. B., Costales Mené, D., González-Peña Fundora, D., & Nápoles García, M. C. (2015). Nuevos productos naturales para la agricultura: las oligosacarinas. *Cultivos Tropicales*, 36, 111-129. <http://scielo.sld.cu/>.
- Falcón, R., González, D., Nápoles, M. C., Morales, D. M., Núñez, M. C., Cartaya Rubio, O. E., ... y Jiménez Arteaga, M. C. (2021). Oligosacarinas como bioestimulantes para la agricultura cubana. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115331>.
- Fang, S. L., Kuo, Y. H., Kang, L., Chen, C. C., Hsieh, C. Y., Yao, M. H., & Kuo, B. J. (2022). Using Sigmoid Growth Models to Simulate Greenhouse Tomato Growth and Development. *Horticulturae*, 8(11), 1021. <https://doi.org/10.3390>
- Fisher, R. A. (1937). *The Design of Experiments*. Edinburgh; London: Oliver and Boyd.
- Gedeon, S., Ioannou, A., Balestrini, R., Fotopoulos, V., y Antoniou, C. (2022). Application of Biostimulants in Tomato Plants (*Solanum lycopersicum*) to Enhance Plant Growth and Salt Stress Tolerance. *Plants*, 11(22), 3082. <https://doi.org/10.3390/plants11223082>.
- Gómez, S. A., López S. G., Jerez M. E., González C. P., & Guerrero D. L. (2023). Influencia de dos bioestimulantes en el crecimiento y desarrollo de plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 43(2), 07. <https://ediciones.inca.edu.cu/>
- González, L. G., Paz, I., Boicet, T., Jiménez, M. C., Falcón-, A., y Rivas, T. (2021). Efecto del tratamiento de semillas con QuitoMax® en el rendimiento y calidad de plántulas de tomate variedades ESEN y L-43. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.803>.
- Govaerts, B., and N. Verhulst. (2010). The normalized difference vegetation index (NDVI) Greenseeker (TM) handheld sensor: toward the integrated evaluation of crop management. Part A: -Concepts and Case Studies: Mexico, D.F. CIMMYT. p:13. <https://repository.cimmyt.org/>
- Hernández, H., Sánchez, H., Palmeros, S., Ocampo, Á., Santacruz, F., Meza, I. D., y Becerril, A. (2022). Seaweed Extract Improves Growth and Productivity of Tomato Plants under Salinity Stress. *Agronomy*, 12(10), 2495. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102495>.
- Hsieh, C. Y., Fang, S. L., Wu, Y. F., Chu, Y. C., & Kuo, B. J. (2021). Using sigmoid growth curves to establish growth models of tomato and eggplant stems suitable for grafting in subtropical countries. *Horticulturae*, 7(12), 537. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120537>
- Inman, D., Khosla, R. y Mayfield, T. (2005). On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review* 25: 209-214. <https://doi/10.1108/02602280510606499/full/html>.
- Ji, X., Deng, T., Xiao, Y., Jin, C., Lyu, W., Wu, Z., y Yang, H. (2023). Emerging Alternaria and Fusarium mycotoxins in tomatoes and derived tomato products from the China market: Occurrence, methods of determination, and risk evaluation. *Food Control*, 145, 109464. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109464>.
- Kolmogorov, A. (1933). *Basic Concepts of Probability Theory*. Berlin: Julius Springer; 62 p.

- Li, C., Li, H., Li, J., Lei, Y., Li, C., Manevski, K. y Shen Y. (2019). Using NDVI percentiles to monitor real-time crop growth. *Comput Electron Agric*, 162, 357-363. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.026>.
- López, T, S. F., Álvarez S, A. R., Reyes P, J. J., Vital L, L., & Yanez C, D. J. (2021). Respuesta agronómica y control fitosanitario de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L), a la aplicación de quitosano. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(3), 6-12. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/488>.
- Lykhovyd, P.V. (2021). Seasonal dynamics of normalized difference vegetation index in some winter and spring crops in the South of Ukraine. *Agrology* 4: 187-193. <https://doi.org/10.32819/021022>
- Malerba, M., y R. Cerana. (2016). Chitosan Effects on Plant Systems. *Int. J. Mol. Sci*, 996:1–15. <https://doi.org/10.3390/ijms17070996>
- Masjuan, Y. G., Olivera, N. T., y Escalona, Y. A. (2022). Efecto de diferentes dosis de QuitoMax en el crecimiento de plántulas de pimiento (*capsicum annuum* l) (Original). *Redel. Revista Granmense de Desarrollo Local*, 6(1), 30-39.
- Masjuan, Y. G., Olivera, N. T., Gómez, G. G., y Oduardo, R. (2018). Efecto de diferentes dosis de QuitoMax en el crecimiento de plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.). *Agrisost*. Recovered: <http://revistas.reduc.edu.cu/index.php/agrisost/index>
- Mouden, S., Kappers, I. F., Klinkhamer, P. G., & Leiss, K. A. (2020). Cultivar variation in tomato seed coat permeability is an important determinant of jasmonic acid elicited defenses against western flower thrips. *Frontiers in Plant Science*, 11, 576505. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.576505>
- Rendina, N., Nuzzaci, M., Scopa, A., Cuypers, A. y Sofo, A. (2019). Chitosan-elicited defense responses in Cucumber mosaic virus (CMV)-infected tomato plants. *Journal of Plant Physiology*. 234(235):9-17. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.01.003>.
- Reyes, P, J., y Enríquez A, E. (2019). Evaluación de QuitoMax® en la emergencia, crecimiento y nutrientes de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Ciencia Y Tecnología*, 11(2), 31–37. <https://doi.org/10.18779/cyt.v11i2.233>
- Reyes, P., Llerena, R., Quinatoa L., Llerena F., Palacios, A., Aragón, E., y de Luna, R. (2024). Crecimiento y desarrollo de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) bioestimuladas con QuitoMax®. *Revista Terra Latinoamericana*, 42. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1818>.
- Reyes, P., Rivero, H., García, B. (2020). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero. *Biotecnia*, 22(3): 156-163. <https://www.scielo.org.mx/>.
- Salachna, P. y Zawadzińska, A. (2014). Effect of chitosan on plant growth, flowering and corms yield of potted freesia. *Journal of Ecological Engineering*. 15(3):97-102. doi:10.12911/22998993.1110223.
- Shammi, S.A., Meng Q. (2021). Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling. *Ecol Indic* 121: 107124. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107124>

- Sierra, D. R. R., Gómez, G. G., & Pantoja, A. J. (2023). Evaluación de Pectimorf[®] y QuitoMax[®] en el cultivo del pimiento (*Capsicum annuum*, L. variedad Lical) (Original). Redel. Revista Granmense de Desarrollo Local, 7(1), 142-161.
- Sotolongo, J. C. G., González, Y. L., Menéndez, D. C., Hernández, L. T., & Rodríguez, A. F. (2025). Quitosano: estimulante del crecimiento del tabaco en etapa de semillero. Avances, 27(1), 48-64. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9966719>
- Stefen, DLV, Souza CA, Coelho CMM, Gutkoski LC, Sangoi EL. (2016). A adubação nitrogenada durante o espigamento melhora a qualidade industrial do trigo (*Triticum aestivum* cv. Mirante) cultivado com regulador de crescimento etil-trinexapac. Revista de la Facultad de Agronomía 114(2):161–169.
- Terry, A., Falcón R., Ruiz, P., Carrillo S. y Morales M. (2017). Respuesta agronómica del cultivo de tomate al bioproducto QuitoMax[®]. Cultivos Tropicales, 38(1), 147-154. <https://www.scielo.org/cu>.
- Tukey, J. W. (1960). A survey of sampling from contaminated distributions. In: Olkin I, ed. Contribution to Probability and Statistics: Essays in Honor to Harold Hotelling. Redwood City: Stanford University Press., 448-485.
- Vázquez, L, D. (2021). Rendimiento y calidad de semilla de tomates nativos (Doctoral dissertation). Consultado el 24 de febrero de 2023. Disponible en: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/4672/1/Vazquez_Lopez_D_MC_Fisiologia_Vegetal_2021.pdf
- Zanin, L., Tomasi, N., Zamboni, A., Sega, D., Varanini, Z., & Pinton, R. (2018). Water-extractable humic substances speed up transcriptional response of maize roots to nitrate. Environmental and Experimental Botany, 147, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.014>

Tratamiento a la semilla de maíz y su efecto en la calidad fisiológica en dos condiciones de almacenamiento

Recibido em: 08/05/2025

Aprobado em: 19/05/2025

 10.46420/9786585756563cap12

Francisco Cervantes-Ortiz 

José Antonio Rangel-Lucio 

Mariano Mendoza-Elos* 

Hugo Cesar Cisneros-López 

José Francisco Rodríguez-Rodríguez 

Blanca C. López-Ramírez 

Leticia Rodríguez-Zárate 

INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz (*Zea mays* L.) ocupa el octavo lugar en la lista de los productos agrícolas más importantes en el mundo, con una producción de cerca de 1,100 millones de toneladas (Erenstein et al., 2021). De acuerdo con Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021), en México es el cultivo más importante desde varios aspectos; alimentario, industrial, político y social. Además, contribuye con cerca del 65% del volumen de la producción de cereales, con una superficie cultivada de 7.5 millones de hectáreas en una amplia diversidad de agroecosistemas.

La agricultura moderna es inconcebible sin el uso de pesticidas. En este sentido, se hace necesaria la protección completa de las semillas con el uso plaguicidas como tratamiento. Uno de los productos ampliamente utilizados es el thiamethoxam como tratamiento a la semilla, debido a que es un insecticida que se adhiere y penetra rápidamente, lo cual permite estabilidad y biodisponibilidad del ingrediente activo. Se distribuye muy bien de semilla a semilla durante el tratamiento. Además, el thiamethoxam es lentamente metabolizado en la planta, de tal forma que está disponible en ella por un periodo cercano a 30 días (Clavijo, 2008).

La literatura destaca el éxito del uso de plaguicidas con respecto a la germinación uniforme y el desarrollo normal de las plántulas (Bradley et al., 2001, Galli et al., 2005, Govender 2008). El tratamiento químico a la semilla consiste en la adición de pequeñas cantidades de sustancias activas; plaguicidas, fungicidas o macronutrientes, necesarias para ofrecer protección a la plántula durante unos 30 días contra plagas y patógenos o para facilitar la absorción de microelementos en el crecimiento y nutrición de las plántulas. El periodo del efecto depende de una combinación de factores como es la formulación del

* Autor correspondiente: mariano.me@roque.tecnm.mx

producto y el modo de acción, la calidad del tratamiento, así como la calidad física y fisiológica de la semilla (Brzezinski et al., 2015). Además, hay investigaciones que afirman que el tratamiento de la semilla con fungicidas e insecticidas, solos ó combinados, promueven la emergencia de plántulas (Balardin et al., 2011; Abati et al., 2014; Conceição et al., 2014). Por otro lado, se sostiene que los tratamientos a la semilla con fungicidas se utilizan cada vez más y el efecto de estos preparados se aprecia mejor en los años en que las condiciones ambientales son óptimas para el desarrollo de patógenos (Bradley, 2008).

Para obtener semillas de alta calidad se debe realizar un manejo adecuado en los campos de producción y realizar la cosecha en el momento correcto. Aunque, es necesario mantener una inspección rigurosa, evitando así que se siembren semillas de bajo vigor. El vigor es un atributo que define el nivel de desempeño de la semilla en la germinación y emergencia de las plántulas (Tillmann; Menezes, 2012) y es controlado por distintos mecanismos en ambientes desfavorables (Miransari; Smith, 2014). La disminución de la calidad está relacionada con el bajo porcentaje de germinación, el aumento de plántulas anormales y reducción del vigor de las plántulas (Toledo et al., 2009). El aumento del porcentaje de semillas de alto vigor, en un determinado lote, es favorable para el crecimiento inicial del cultivo de maíz (Mondo et al., 2013). La baja velocidad de germinación asociada a la alta sensibilidad a las tensiones de las semillas durante la germinación y plantas con crecimiento lento y bajo desarrollo radicular son típicas de semillas con menor potencial fisiológico (Marcos Filho, 2015).

En base a lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar si el thiamethoxam como tratamiento químico a la semilla afecta la calidad fisiológica en híbridos maíz bajo diferentes condiciones de almacenamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Tecnológico Nacional de México, Campus Roque (TecNM-Roque), ubicado en el km 8 de la carretera Celaya-Juventino Rosas, en Celaya, Guanajuato, México (20°34'41.1'' N, 100°49'31.7'' O) y una altitud de 1765 m.

Genotipos de maíz

Se utilizaron tres híbridos experimentales de maíz; TNM01 (grano amarillo), TNM02 y TNM03 (grano blanco) pertenecientes al TecNM-Roque. Todos los genotipos fueron producidos bajo las mismas condiciones agroecológicas. De cada material se obtuvo una muestra de 3.2 kg, de los cuales se utilizaron 800 g para la aplicación del tratamiento.

Tratamiento químico

Por otro lado, se utilizaron como tratamiento a la semilla dos insecticidas (Thiamethoxam y pirimifos-metil), un fungicida (Fludioxonil) y Rodamina como colorante. En la Tabla 1 se muestran los ingredientes activos y las dosis utilizadas para cada tratamiento estudiado.

Tabla 1. Tratamientos evaluados en semilla de maíz.

Ingrediente activo	T1	T2	T3	T4
Thiamethoxam (ml)	9.75	4.87	0.00	0.00
Fludioxonil (ml)	20.10	20.10	20.10	0.00
Pirimifos-metil (ml)	2.10	2.10	2.10	0.00
Rodamina (ml)	0.60	0.60	0.60	0.00

T=tratamiento

Almacenamiento de semilla

Inmediatamente después de que las semillas fueron tratadas, se procedió a almacenarlas utilizando empaques (bolsas) que usan las empresas para almacenamiento y transporte de semilla. El almacenamiento se hizo bajo dos condiciones de confinamiento; temperatura ambiente (bodega, 24-28°C y HR 60 %) y almacén en frío (10 ± 1 °C y HR 50 %). El almacenamiento comprendió un periodo de 9 meses (270 días); donde se realizó un muestreo mensual para determinar la calidad fisiológica de la semilla y el vigor inicial de plántula.

Diseño experimental

Se usó un Diseño Factorial con tres repeticiones con la combinación de los siguientes factores de estudio: tres genotipos, cuatro tratamientos a la semilla y dos condiciones de almacenamiento (3 x 4 x 2) lo que generó 24 tratamientos. La unidad experimental se conformó de 50 semillas por repetición.

Características fisiológicas evaluadas en Laboratorio

Germinación estándar (G.E)

La prueba se realizó de acuerdo a la metodología establecida por la ISTA (2015); que considera el porcentaje de plántulas normales en dos recuentos; al cuarto y séptimo día después de ser sometido el ensayo. Las semillas fueron distribuidas en papel germinación color café, previamente humedecido usando únicamente agua (Anchor paper company, st, paul, MN). Se formaron rollos o tacos de papel y se colocaron en bolsas de polietileno transparente previamente etiquetadas y se metieron en una cámara de germinación (Conviron, modelo TC-16) 16/8 h de luz/oscuridad.

Vigor de plántula en cama de arena bajo condiciones de vivero

Se determinó bajo condiciones de vivero usando arena como sustrato. La unidad experimental se constituyó de 50 semillas por repetición. Se evaluó el porcentaje de emergencia (PE) y velocidad de emergencia (VE). Con base en una muestra de 10 plántulas con competencia completa por unidad experimental, se midió el peso seco de vástago (PSV) y peso seco de raíz (PSR). Se calculó el índice de vigor II (IVII), el cual resulta de multiplicar PE por PSV (Kharb et al., 1994).

Se realizaron conteos diarios de plántulas emergidas a partir de que se observó la primera plántula en emergencia (día 4) y el último conteo el día 8 después de la siembra. La velocidad de emergencia (VE) se determinó de acuerdo con la fórmula de Copeland y McDonald (1995).

$$V.E = \frac{N^{\circ} \text{ de plántulas normales}}{\text{Día del primer conteo}} + \dots + \frac{N^{\circ} \text{ de plántulas normales}}{\text{Día del conteo final}}$$

El porcentaje de emergencia (PE) se calculó dividiendo el número total de plántulas emergidas entre el número de semillas establecidas multiplicado por 100.

$$\% \text{ de emergencia} = \left(\frac{\text{plántulas emergidas}}{\text{semillas sembradas}} \right) \times 100$$

Análisis estadístico

Para todos los caracteres evaluados se realizó un análisis de varianza combinado a través de tipo de almacenamiento, usando el procedimiento PROC GLM del programa estadístico SAS, ver. 9.4 (SAS, 2016). La comparación múltiple de medias se realizó de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2, se muestra el análisis de varianza combinado a través de ambientes de almacenamiento para los caracteres de calidad de semilla y vigor de plántula en maíz; en él se puede observar que existen diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para genotipos (G), muestreo (M) y las interacciones tratamiento x muestreo (T x M), almacenamiento x muestreo (A x M), genotipo x tratamiento x muestreo (G x T x M) y tratamiento x almacenamiento x muestreo (T x A x M), en todas las características registradas. Por otro lado, el tratamiento a la semilla (T), mostró diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para velocidad de emergencia (VE), porcentaje de emergencia (PE), peso seco de vástago (PSV) e índice de vigor II (IVII), sin embargo, no afectó estadísticamente la germinación estándar (GE) y el peso seco de raíz (PSR). Con respecto al ambiente de almacenamiento (A), mostró efecto estadístico ($P \leq 0.01$) para todos los caracteres evaluados, excepto para la germinación estándar (GE). Las interacciones simples; genotipo x tratamiento (G x T), genotipo x almacenamiento (G x A) y tratamiento x almacenamiento (T x A) no mostraron efecto estadístico significativo para GE y PSR. La triple interacción; genotipo x tratamiento x almacenamiento (G x T x A), sólo modificó estadísticamente ($p \leq 0.01$) el porcentaje de emergencia (PE), peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) y el índice de vigor II.

Es importante destacar que al analizar los valores de los cuadrados medios (Tabla 2) se observa que la fuente de variación de mayor importancia por su contribución a la varianza total para GE fue el de genotipos; lo que indica que esta característica se determinó principalmente por la constitución

genética de los híbridos de maíz. Estos resultados están de acuerdo con los reportados por Tamindžić et al. (2013) quienes trabajaron con líneas endogámicas de maíz. Para el resto de las variables registradas; VE, PE, PSV, PSR e IVII, la fuente de variación de mayor importancia fueron los muestreos realizados, seguidos por el efecto del tipo de almacenamiento de la semilla (bodega y frío). Lo antes indicado afirma que el tiempo de almacenamiento de la semilla determina su calidad fisiológica.

El coeficiente de variación (CV) presentó un intervalo de 3.6 a 15.7 %, lo que significa que los resultados son confiables y que hubo eficiencia en el manejo del experimento (Palafox-Caballero et al., 2006; Noriega-Carmona et al., 2019).

Tabla 2. Cuadrados medios de análisis de varianza combinado a través de ambientes de almacenamiento para calidad fisiológica en genotipos de maíz.

FV	GL	GE	VE	PE	PSV	PSR	IVII
Genotipo (G)	2	295.5**	67.3**	8382.1**	6.47**	80.83**	273441**
Tratamiento (T)	3	4.4	14.5**	1009.1**	2.95**	2.56	37256**
Almacen (A)	1	4.8	315.2**	24897.2**	73.72**	109.78**	761687**
Muestreo (M)	8	25.8**	990.7**	19026.8**	155.47**	757.24**	3410131**
G x T	6	1.4	4.1**	334.6**	1.54**	0.46	21392**
G x A	2	8.01	3.3**	218.7*	0.14	0.08	28231**
G x M	16	9.3	6.0**	794.9**	3.55**	4.81**	32511**
T x A	3	2.42	2.3**	276.1**	1.33**	2.64	16089**
T x M	24	22.7**	2.4**	213.6**	0.80**	10.01**	7221**
A x M	8	33.5**	49.8**	6697.8**	16.88**	36.83**	187354**
G x T x A	6	6.02	0.7	214.3**	1.30**	6.06**	15223**
G x T x M	48	16.0**	2.7**	248.1**	0.85**	2.98**	8503**
T x A x M	24	2.2**	5.2**	309.4**	0.68**	3.66**	4508*
G x T x A x M	64	13.2	3.0**	426.7**	1.48**	5.99**	11149**
Error	432	10.2	0.6	65.1	0.18	1.66	2894
CV (%)	-----	3.6	15.0	11.5	11.35	15.77	15

*, **, significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente. FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación; GE: germinación estándar; VE: velocidad de emergencia; PE: porcentaje de emergencia; PSV: peso seco de vástago; PSR: peso seco de radícula; IVII: índice de vigor II.

Con respecto a la prueba de comparación de medias (Tukey, 0.05), en la Tabla 3 se observa que para germinación estándar (GE) todos los genotipos mostraron valores superiores a 97.5 % de plántulas normales después del segundo recuento; este porcentaje es superior al requerido por el Sistema Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS, 2013) en México, que señala 90% de GE para considerar lotes de semilla de maíz de alta calidad. Para VE, PE, PSV, PSR e IVII destaca el híbrido

TNM02 con la mayor respuesta, generando un mayor número de plantas emergidas y con una alta velocidad (6.08 p d^{-1}), además plantas con alto peso seco de vástago y de raíz, caracteres importantes en el vigor inicial de plántula (Cervantes-Ortiz et al., 2016).

En lo que respecta del tratamiento químico, la aplicación de Thiamethoxam a la semilla presentó efecto positivo en el PE y PSV; por el contrario, este producto tuvo un efecto negativo en la VE y en el IVII y no presentó ningún efecto en la GE y PSR, ya que el comportamiento de estas variables no fueron modificadas (Tabla 3). Los resultados de esta investigación coinciden parcialmente con los reportados por Tamindžić et al. (2013) quienes encontraron efecto negativo del thiamethoxam en el vigor inicial de plántula en la línea endogámica de maíz L-2, pero en el resto de las líneas evaluadas hubo efecto positivo. Los resultados de este experimento están de acuerdo con los reportados por Almeida et al. (2013) quienes indican la influencia positiva del thiamethoxam en el desarrollo de vástago en arroz. En este contexto, muchos investigadores han demostrado que el thiamethoxam estimula la germinación promoviendo una mayor actividad enzimática que aumenta el metabolismo primario y secundario y, por tanto, proporciona una mejor germinación y un crecimiento uniforme para muchos cultivos (Clavijo, 2008; Cataneo, 2008). Del mismo modo, se ha confirmado que el thiamethoxam aumenta la viabilidad, la acumulación de biomasa, el desarrollo radicular y la tasa de fotosíntesis (Cataneo, 2008), resultados que coinciden parcialmente (acumulación de biomasa) con los registrados en este experimento. También, Nunes (2006) evaluó el efecto del thiamethoxam sobre germinación de semillas y encontró plantas con mayor desarrollo radicular, resultados que se contraponen a los obtenidos en esta investigación, debido a que la aplicación de thiamethoxam no modificó el peso seco de raíz.

También se ha demostrado que algunos productos químicos aplicados a la semilla conducen a la reducción de la germinación estándar y vigor de las plántulas, debido al efecto de la fitotoxicidad (Oliveira; Cruz, 1986). Sin embargo, la aplicación de tratamiento químico a la semilla es considerado uno de los métodos más eficientes para proteger la semilla y la planta en los primeros estadios de desarrollo (Ceccon et al., 2004). Así mismo, Fessel et al. (2003) afirman que semillas de maíz tratadas con Deltametrina y Pirimifos-metil reducen la longevidad, el vigor y la tasa de emergencia. Otros autores concluyeron que el tratamiento químico debería aplicarse cerca del momento de la siembra porque el almacenamiento presenta un efecto negativo en la calidad fisiológica de las semillas de maíz (Bittencourt et al., 2000; Fessel et al., 2003).

El tipo de almacenamiento; bodega ambiente ($24-28 \text{ }^{\circ}\text{C}$, HR 60 %) y condiciones de frío ($10 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) sí modificó todas las variables de vigor inicial de plántula, con excepción de la GE, de esta manera, el almacenamiento en frío de la semilla sobresale con la respuesta más alta, resultado que era esperado por la conservación de la viabilidad de las semillas (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de medias para calidad de semilla y vigor de plántula en genotipos de maíz.

Genotipos	GE	VE	PE	PSV	PSR	IVII
	(%)	(p d⁻¹)	(%)	(g)	(g)	
TNM01	99.79 a	5.52 b	90.70 b	3.80 b	8.39 a	367.89 b
TNM02	97.55 b	4.96 c	79.60 c	3.63 c	7.49 b	324.95 c
TNM03	99.26 a	6.08 a	93.30 a	3.98 a	8.66 a	395.57 a
DSH	0.72	0.18	1.82	0.09	0.29	12.17
Tratamiento químico						
1	98.90 a	5.55 b	89.60 a	3.84 a	7.99 a	357.09 b
2	98.92 a	5.35 bc	85.90 b	3.84 a	8.25 a	359.70 b
3	98.63 a	5.93 a	91.60 a	3.92 a	8.21 a	384.66 a
4	99.01 a	5.25 c	86.38 b	3.61 b	8.27 a	349.76 b
DSH	0.91	0.23	2.24	0.12	0.36	15.41
Almacenamiento						
Bodega (24-28°C)	98.95 a	4.82 b	83.40 b	3.46 b	7.77 b	328.52 b
Frio (10±1°C)	98.78 a	6.22 a	94.50 a	4.14 a	8.59 a	397.09 a
DSH	0.49	0.12	1.21	0.06	0.19	8.30
Muestreo (días de almacén)						
30	98.24 b	9.16 a	99.60 a	6.46 a	14.78 a	634.13 a
60	98.42 ab	9.16 a	98.80 a	3.04 e	8.09 d	634.13 a
90	99.36 ab	8.18 c	99.65 a	5.89 b	11.36 b	688.56 a
120	99.13 ab	7.21 d	98.16 a	3.69 c	7.79 d	532.18 b
150	98.88 ab	8.66 b	98.50 a	3.44 d	6.94 e	485.16 c
180	100.00 a	0.74 g	69.82 b	2.17 f	3.94 g	208.53 e
210	99.06 ab	0.04 h	56.91 c	2.25 f	5.51 f	209.13 e
240	98.58 ab	3.85 e	71.20 b	3.63 cd	6.38 e	264.95 d
270	98.12 b	2.68 f	58.50 c	3.63 cd	8.85 c	288.46 d
DSH	1.66	0.43	4.19	0.22	0.67	27.95

Medias con letras iguales en las columnas dentro de cada factor de variación no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: diferencia Significativa honesta; GE: germinación estándar; VE: velocidad de emergencia; PE: porcentaje de emergencia; PSV: peso seco de vástago; PSR: peso seco de raíz; IVII: índice de vigor II.

En este sentido, Smaniotto et al. (2014) observaron una reducción del potencial fisiológico de las semillas almacenadas en un ambiente sin control climático en función del contenido de humedad inicial. En el manejo comercial de las semillas agrícolas, los dos factores físicos más importantes que reducen su

viabilidad son la humedad relativa y la temperatura; sin embargo, el mayor efecto nocivo se le ha atribuido a la humedad relativa, aunque la alta temperatura acelera el deterioro fisiológico (Roberts, 1972). En consecuencia, por el efecto nocivo de ambos factores físicos, la longevidad de las semillas se puede prolongar al reducir tanto el contenido de humedad de la semilla como la temperatura de almacenamiento (Ellis y Roberts, 1980). Además de las condiciones de almacenamiento, la velocidad de deterioro se ve afectada por factores genéticos, manejo agronómico en la producción de semilla, maduración de las semillas y el manejo postcosecha, incluido el almacenamiento (Baudet y Villela, 2012; Marcos-Filho, 2015).

Con respecto al tiempo de muestreo, se dio una reducción en los valores para todas las variables de vigor inicial de plántula, tendencia que era esperada ya que con el envejecimiento de la semilla reduce el vigor. Esta reducción sucedió en diferentes momentos, de acuerdo con la variable estudiada; por ejemplo, se redujo la VE a partir de los 60 días de almacenamiento y a partir de los 150 días se presentó una disminución de cerca del 100%, el PE sufrió una fuerte disminución (casi 30%) a partir del muestreo 6 (180 días), el PSV y PSR disminuyeron sus valores de forma significativa a partir de los 30 días y finalmente, el IVII tuvo una caída de forma significativa en el muestreo 4 (120 días) de 33% y en el muestreo 6 (180 días) hubo una disminución hasta del 70% del vigor de la plántula de maíz (Tabla 3). En un estudio de almacenamiento de semillas de soya bajo condiciones refrigerado y no refrigerado demostró que las semillas disminuyen o aumentan la velocidad y la intensidad del deterioro según el ambiente de almacenamiento. En este sentido, la conservación de la calidad fisiológica se obtuvo en un ambiente a 13 °C durante un máximo de 225 días (Ferreira et al., 2017). También se ha confirmado que el deterioro empieza después que la semilla alcanza la madurez fisiológica y continua hasta perder su capacidad de germinar, es un proceso inexorable e irreversible. La duración del proceso de deterioro se determina principalmente por la interacción entre el genotipo, el contenido de humedad de la semilla y la temperatura del almacén (Delouche, 2003).

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Se presentó diferencias significativas entre genotipos en la expresión de todos los caracteres evaluados, indicativo de la influencia de la carga genética de cada material.
- La aplicación del thiamethoxam como tratamiento a la semilla de maíz tuvo efecto positivo al incrementar el porcentaje de emergencia (PE) y peso seco de vástago (PSV); sin embargo, el efecto fue negativo en la velocidad de emergencia (VE) y el índice de vigor II (IVII), esto bajo condiciones de cama de arena en vivero en todos los genotipos.
- El almacenamiento bajo condiciones de frío (10 ± 1 °C) presentó la mejor respuesta para todos los caracteres de vigor inicial de plántula en maíz.

- De manera general, la calidad de la semilla de maíz fue afectada a partir del sexto mes (180 días) de almacenamiento; por lo tanto, se recomienda que la semilla no debe almacenarse por largos periodos de tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abati J et al. (2014). Treatment with fungicides and insecticides on the physiological quality and health of wheat seeds. *Journal of Seed Science*, 36(4), 392-398. <http://doi.org/10.1590/2317-1545v36n41006>
- Almeida AS et al. (2013). Thiametoxam: An Insecticide that Improve Seed Rice Germination at Low Temperature in Insecticides. In: Stanislav Trdan (ed.), *Development of Safer and More Effective Technologies*. (pp. 417-426). <https://doi.org/10.5772/53207>.
- Balardin RS et al. (2011). Tratamento de sementes com fungicidas e inseticidas como redutores dos efeitos do estresse hídrico em plantas de soja. *Ciencia Rural*, 41(7), 1120-1126. <http://doi.org/10.1590/s0103-84782011000700002>
- Baudet L; Villela FA (2012). Armazenamento de sementes. In: PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G.E. *Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos*. 3. ed. Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, p.481-528.
- Bittencour SRM et al. (2000). Desempenho de sementes de milho tratadas com inseticidas sistêmicos. *Revista Brasileira de Sementes*, 22(2): 86-93. https://www.abrates.org.br/files/artigos/58984c51515df1.07068080_artigo12.pdf
- Bradley CA (2008). Effect of fungicide treatments on stand establishment, seedling disease and yield of soybean in North Dakota. *Plant Disease*, 92, 120-125.
- Bradley CA et al. (2001). The effect of fungicide seed protectants, seedling rates, and reduce rates of herbicides on no-till soy bean. *Crop Protection*, 20, 615-622.
- Brzezinski CR et al. (2015). Seed treatment times in the establishment and yield performance of soybean crops. *Journal of Seed Science*, 37(2), 147-153. <http://doi.org/10.1590/2317-1545v37n2148363>
- Cataneo AC (2008). Ação do Tiametoxam sobre a germinação de sementes de soja (*Glycine max* L.): Enzimas envolvidas na mobilização de reservas e na proteção contra situação de estresse (deficiência hídrica, salinidade e presença de alumínio). In D.L. Gazzoni (Ed.), *Tiamethoxam: Uma revolução na agricultura brasileira*. pp. 123-192.
- Cervantes-Ortiz F et al. (2016) Aptitud combinatoria general y específica en la calidad de semilla de líneas S3 de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:259-268.
- Clavijo J (2008). *Tiametoxam: un nuevo concepto en vigor y productividad*. Ed. M. Manrique. Bogotá D.C., CO. 196p.

- Conceição GM et al. (2014). Desempenho de plântulas e produtividade de soja submetida a diferentes tratamentos químicos nas sementes. *Biosciences Journal*, 30(6), 1711-1720.
- Copeland LO; McDonald MB (1995). *Principles of Seed Science and Technology*. Third edition. Chapman and Hall. New York, USA. 409 p.
- Delouche JC (2002). Germinación, Deterioro y Vigor de Semillas. *Seed News* 6(6). http://www.seednews.inf.br/espanhol/seed66/artigocapa66_esp.shtml
- Ellis RH; Roberts EH (1980). Improved Equations for the Prediction of Seed Longevity, *Annals of Botany*, 45 (1): 13–30. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085797>
- Erenstein O et al. (2021). Estimating the global number and distribution of maize and wheat farms. *Global Food Security*, 30:100558.
- Ferreira FC et al. (2017). Cooling of soybean seeds and physiological quality during storage. *Journal of Seed Science*, 39(4): 385-392. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2317-15372017000400385&script=sci_arttext-
- Fessel AS et al. (2003). Efeito do tratamento químico sobre a conservação de sementes de milho durante o armazenamento. *Revista Brasileira de Sementes*, 25(1): 25-28. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222003000100005>
- Galli JA et al. (2005). Effect of *Fusarium graminearum* and infection index on germination and vigor of maize seeds. *Fitopatologia Brasileira*, 3, 470-474.
- Govender V (2008). Vigour of fungicide-treated and untreated maize seed following storage (Doctoral tesis). University of Pretoria. 131p.
- ISTA, International Seeds Testing Association. (2015) *International Rules for Seed Testing*. Introduction to the ISTA rules. Zurich, Switzerland. pp:1-6. <https://doi.org/10.15258/istarules.2015.i>
- Kharb RPS et al. (1994). Prediction of field emergence through heritability and genetic advance of vigour parameters. *Seed Science and Technology* 22:461-466.
- Marcos-Filho J (2015). *Seed physiology of cultivated plants*. (2a ed.) Londrina: ABRATES, 2005, 660p.
- Miransari M; Smith DL (2014). Plant hormones and seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 99: 110–121. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847213001895>
- Mondo VHV et al. (2013). Seed vigor and initial growth of corn crop. *Journal of Seed Science*, 35(1), 64-69. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-15372013000100009.
- Noriega-Carmona MA et al. (2019). Efecto de la fecha de siembra sobre la calidad de semilla de trigo en el Bajío, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42 (4): 375-384. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.375-384>
- Nunes JC (2006). Bioativador de plantas, *Seeds News*. Pelotas, 3(5), 30-31.
- Oliveira LJ; Cruz I (1986) Efeito de diferentes inseticidas e dosagens na germinação de sementes de milho (*Zea mays* L.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 21(2): 578-585.

- Palafox-Caballero A et al. (2006). Híbridos trilineales de maíz comunes y de alta calidad de proteína para Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana* 17:201-206, <https://doi.org/10.15517/am.v17i2.5160>
- Roberts EH (1972). Storage Environment and the Control of Viability. In: Roberts, E.H. (eds) *Viability of Seeds*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5685-8_2
- SAS (2016). SAS para Windows. Version 9.4. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Seccon G et al. (2004). Effect of insecticides at sowing on seedling pests and yield off-season maize crop under no-tillage system, *Bragantia* 63(2): 227-237. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000200008>
- SIAP - Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Available in: <<https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>>
- Smaniotto TAS et al. (2014). Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(4):446-453.
- SNICS, Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2013). Regla para la calificación de semilla de maíz (*Zea mays* L.). SAGARPA- SNICS. México, D.F. 36 p.
- Tamindžić G et al. (2013). Effect of Seed Treatments with Neonicotinoids on Maize Inbred Lines Seed Quality, *Ratar. Povrt.* 50(3): 37-44. <https://doi.org/10.5937/ratpov50-4792>
- Tillmann MAA; Menezes NL (2012). Análise De Sementes. In: Peske ST, Villela FA, Meneghello GE. *Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos*. (3a ed.) Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 161-272.
- Toledo MZ (2009). Physiological quality and storage of bean seeds as affected by late side dressing nitrogen. *Pesquisa Agropecuaria Tropical.*, 39(2): 124-133. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DJ2012057474>

Aceites esenciales y caldos minerales como tratamieto pregerminativo en semilla de maíz

Recibido em: 14/05/2025

Aprobado em: 19/05/2025

 10.46420/9786585756563cap13

José Francisco Rodríguez Rodríguez 

Eva Lizbeth León Arreguin 

Diego Martín Badillo Garcia 

Francisco Cervantes Ortiz* 

Alfredo Josué Gámez Vázquez 

José Guadalupe García Rodríguez 

Sarahyt Santamaría Gonzalez Figueroa 

Anselmo Hernández Pérez 

INTRODUCCIÓN

Actualmente la agricultura está obligada en aumentar la producción agrícola, su calidad, procesamiento y almacenamiento (de Andrade et al., 2023), por lo que se han propuesto varias innovaciones tecnológicas para mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción, con la finalidad de reducir el uso de agroquímicos sintéticos como plaguicidas y fertilizantes (Rouphael; Colla, 2020), por lo anterior es importante desarrollar nuevas estrategias, basadas en la aplicación y uso de productos biorracionales que incrementen los rendimientos y garanticen la seguridad y sostenibilidad de los cultivos (SADER, 2023). Una alternativa a los productos de síntesis química son los bioestimulantes que ayudan a mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos (Kapoore et al., 2021). Los bioestimulantes agrícolas son compuestos naturales y/o microorganismos aplicados a plantas o semillas, con la finalidad de romper la latencia, potenciar el crecimiento vegetal y aumentan la absorción de nutrientes al mejorar el sistema radicular, lo que favorece los parámetros de calidad de los cultivos (Parađiković et al., 2019).

Los extractos o aceites obtenidos de las plantas contienen metabolitos secundarios como fenoles, flavonoides, cumarinas y taninos, entre otros, los cuales pueden ser considerados para usarse como bioestimulantes (Rodríguez et al., 2020), además de proteger a las plantas del ataque de patógenos e insectos plagas y tolerar el estrés ambiental (Dhifi et al., 2016). Los compuestos bioactivos de los aceites esenciales, al ser aplicados a la semilla son absorbidos por la misma y actúan como precursores de vías bioquímicas que ayudan en una germinación temprana (Barone et al., 2018), como es el caso de los polifenólicos que influyen en procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas, como la germinación de semillas, la división celular y la síntesis de pigmentos fotosintéticos (Tanase et al., 2019). Ignat et al. (2011) reportan que la aplicación de extractos polifenólicos

* Autor correspondiente: francisco.co@roque.tecnm.mx

estimularon la longitud de raíz en avena (*Avena sativa*) y maíz (*Zea mays*), además de incrementar su biomasa.

Por su parte, los caldos minerales, son compuestos elaborados a base de minerales, por ejemplo, el azufre, cenizas, calcio y zinc los cuales son controladores de plagas y patógenos, además de mejorar la fertilidad del suelo (IDMA, 2020); por consecuencia nutren a la planta y estimulan el crecimiento de raíces además de bloquear metales pesados (Herran et al., 2008). El azufre (S) es un componente vital de cada célula viva al forma parte de aminoácidos, por lo que es indispensable para las síntesis de proteínas en las plantas, como parte de su estructura y de algunas hormonas y aceites (Quispe-Cusi et al., 2016). El zinc (Zn) es un micronutriente importante para las plantas, ya que participa en funciones celulares clave, como los procesos metabólicos y fisiológicos, la activación enzimática y la homeostasis iónica (Alsafran et al., 2022). El calcio (Ca) es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones de estrés y sin estrés, ya que éste no solo cumple la función de la estabilidad de la pared y la membrana celular, sino que también actúa como mensajero en procesos celulares (Thor, 2019). Por otro lado, la ceniza llega aportar una gran cantidad de nutrientes como: el óxido de silicio, potasio (K), fósforo (P), aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg) y microelementos como el hierro (Fe) y zinc (Zn) (Arias et al., 2021). Por lo antes mencionado el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto bioestimulante de aceites esenciales y caldos minerales como tratamiento pregerminativo en la semilla de maíz.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

La presente investigación se realizó en el invernadero del Laboratorio de Entomología del Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en la Carretera Celaya-San Miguel Allende, Km. 6.5, Celaya, Gto., México.

Material vegetal

Se evaluaron tres genotipos de maíz (Roque Nuevo Milenio, Roque 2015 y Roque 2020) proporcionados por el Programa de Mejoramiento Genético del Tecnológico Nacional de México en Roque, además de un híbrido comercial (Antilope).

Tratamientos pregerminativos

Como tratamientos pregerminativos a la semilla se utilizaron tres aceites esenciales, canela, romero y lemon grass, de la empresa Parvitra® y tres caldos minerales, silicosulfocálcico, sulfocálcico y de zinc, los cuales fueron elaborados de acuerdo a lo descrito por Restrepo, (2007). Tanto los aceites

esenciales y caldos minerales se evaluaron a dosis de 0,5 y 1 ml por 200 g de semilla y un testigo sin aplicación, dosis 0.

Pruebas de calidad fisiológica

Para la evaluación de las pruebas de calidad fisiológica de la semilla de maíz tratada con aceites esenciales y caldos minerales se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado con un arreglo trifactorial, donde el factor 1 fueron los genotipos de maíz (6), factor 2, tratamientos a la semilla (6) y factor 3, dosis (3) y cuatro repeticiones por tratamiento; cada unidad experimental consistió de una cama de arena con dimensiones de 160 x 65 x 65 cm y 25 semillas de cada tratamiento.

Los tratamientos a la semilla se realizaron de forma manual, pesando 200 g de semilla de maíz, posteriormente se colocaron en un recipiente de cristal de un volumen de 500 ml, se adiciono la dosis correspondiente de cada tratamiento y agito durante 3 min, esto con la finalidad de asegurar la adherencia y la homogeneidad en la semilla, una vez que la semilla estaba tratada se colocó sobre papel absorbente y se dejó secar durante 30 min. Este procedimiento se realizó cada para genotipo, aceite esencial, caldo mineral y dosis en estudio.

Ya tratada la semilla se maíz se realizó la siembra en camas de arena, se marcaron surcos de 65 cm de largo, con una separación de 3 cm entre surcos, se colocaron 25 semillas por surco a una distancia de 2.5 cm y una profundidad de 5 cm. Los riegos se realizaron diariamente, para evitar la pérdida de humedad del sustrato. A partir de la emergencia de la primera planta diariamente se contabilizo el número de plantas emergidas, hasta que la emergencia de plantas se mantuvo, posteriormente se le dio seguimiento al experimento durante 15 días.

Las variables evaluadas fueron:

Porcentaje de emergencia: Se obtuvo mediante la relación del número de plántulas emergidas y el total de las semillas sembradas por 100 (Fakorede; Ayoola, 1980).

$$\% \text{ de emergencia} = \left(\frac{\text{no. de plántulas emergidas}}{\text{no. total de semillas sembradas}} \right) \times 100$$

Velocidad de emergencia: A partir de la emergencia de la primera planta y durante los próximos 10 días se registró el número de plantas por día y se utilizó la fórmula propuesta Maguire (1962).

$$V_e = \frac{\text{no. de plántulas normales}}{\text{días al primer conteo}} + \dots + \frac{\text{no. de plántulas normales}}{\text{días al último conteo}}$$

Longitud de raíz y planta: 15 días después de la emergencia, de cada repetición se sacaron 10 plantas al azar, la cuales se enjugaron en agua y se midió la longitud de raíz desde la parte apical hasta el cuello e la planta, para la longitud de plúmula de medio desde el cuello de la planta hasta el ápice de la hoja.

Peso fresco y peso de seco de planta: Posteriormente las plantas que se midieron se llevaron a laboratorio y se pesaron en una báscula digital marca Ohaus, modelo Adventurer y el dato obtenido se consideró como peso fresco, posteriormente se colocaron en bolsas de papel del número 8 y se metieron a una estufa de secado durante 48 h a 60 °C, transcurrido este tiempo se sacaron y se volvieron a pesar y obtener el peso seco. para obtener la biomasa de la planta se calculó mediante la diferencia del peso fresco y peso seco.

Índice de vigor I: Se calculó de acuerdo a lo descrito por Kharb et al. (1994) multiplicando el porcentaje de emergencia por la longitud de planta.

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos en las pruebas de calidad fisiológica de la semilla de maíz tratada con aceites esenciales y caldos minerales se realizó un análisis de varianza (ANDEVA), cuando este mostro diferencia significativa entre los factores en estudio se procedió a realizar la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la comparación de las medias. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo en el programa computacional R-studio ver. 4.4.2 (R-core, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los cuadros del análisis de varianza de las variables de calidad fisiológica de la semilla de maíz.

TABLA 1. Cuadrados medios del análisis de varianza de variables de calidad fisiológica de semilla de maíz tratada con aceites esenciales y caldos minerales a dosis de 0.5 y 1 ml. Fuente: los autores.

FV	GL	VE	PE	LP	LR	PFP	PSP	BP	IVI
G	3	100.2***	439**	48.2***	98.9***	1.552***	0.244***	0.502***	193569 ***
T	6	784.7***	12008***	60.2***	323.9***	0.655***	1.411***	2.149***	2258463***
D	1	1831.9***	29058***	665.7***	1182.1***	5.289***	4.893***	0.288***	12142420***
G*T	18	52.1***	144*	5.2***	38.6***	0.170***	0.121***	0.205***	43093 **
G*D	3	110***	474***	10.7***	164.5***	0.165***	0.419***	0.175***	116024 **
T*D	5	383.1***	11462***	20.0***	141.5***	0.233***	0.145***	0.374***	1165796***
G*T*D	15	25.4***	121	10.1***	23.6*	0.206***	0.243***	0.236***	75640***
Error	156	1,3	79	0,8	11,3	0,552	0,002	0,0083	20495
CV	-	6,59	10,82	8,05	13,94	5,63	8,63	14,4	14,59

FV=Fuente de variación; GL= Grados de libertad; VE= Velocidad de emergencia; PE=Porcentaje de emergencia; LP= Longitud de plúmula; LR=Longitud de radícula; PFP=Peso fresco de planta; PSP=Peso seco de planta; IVI= Índice de vigor I; G=Genotipo; T=Tratamiento; D= Dosis; CV= Coeficiente de variación. Diferencia significativa (0.05*, 0.001** y 0.0001***).

Se observa que para las fuentes de variación, genotipo, tratamiento y dosis, así como para sus interacciones, genotipo por tratamiento, genotipo por dosis, tratamiento por dosis y la triple interacción genotipo por tratamiento por dosis se reportan diferencias significativas, excepto para la variable porcentaje de emergencia para en la triple interacción de los factores en estudio. Por otro lado, también se reportan los coeficientes variación para cada una de las variables en estudio, mostrando valores inferiores al 15%.

Las medias por genotipo de maíz con tratamiento de aceites esenciales y caldos minerales se observan en la Tabla 2, donde el material Nuevo Milenio reporta la mayor emergencia y velocidad de emergencia con valores de 18.08 plantas por día y 85.34 %, respectivamente, mientras que, el testigo comercial presenta la media más baja para ambas variables con 15.2 plantas por día y 78.50 %, respectivamente. En lo que se refiere a longitud de plúmula y radícula, Roque 2015, reporta los valores más altos con 12.26 y 26.06 cm, respectivamente, por su parte, testigo comercial muestra el menor valor para longitud de radícula con 9,95 cm y Roque 2020 la media más baja para longitud de raíz con 22.92 cm. Roque 2015 presentó el peso fresco de planta más alto con una media de 1,16 g, por otro lado, el testigo comercial muestra el menor valor con 0,79 g. Para el peso seco de planta el genotipo Nuevo Milenio reporta el valor mayor con 0.56 g, mientras que, Roque 2020 mostró el menor peso seco con 0.41 g. Para el índice de vigor inicial I Roque 2015 reporta la media mayor con un valor de 1039.69, por otro lado, el testigo comercial fue el material que mostro el menor vigor con 898.96.

Tabla 2. Comparación de medias de genotipos de maíz tratados con aceites esenciales y caldos minerales a dosis de 0,5 y 1 ml y su efecto en la calidad fisiológica de la semilla. Fuente: los autores.

Genotipo	VE (plan día ⁻¹)	PE (%)	LP (cm)	LR (cm)	PFP (g)	PSP (g)	BP (g)	IVI
Nuevo Milenio	18.04 a	85.34 a	11.21 b	23.76 b	1.14 ab	0.56 a	0.58 b	1011.44 a
Roque 2020	17.71 a	83.26 a	11.50 b	22.92 b	1.11 b	0.41 c	0.72 a	972.88 a
Roque 2015	17.55 a	81.39 ab	12.26 a	26.06 a	1.16 a	0.48 b	0.68 ab	1039.69 a
Testigo comercial	15.2 b	78.50 b	9.95 c	23.49 b	0.79 c	0.43 c	0.36 c	898.96 b

Columnas seguidas de la misma letra no presenta diferencia significativa (Tukey, $p < 0,05$); VE= Velocidad de emergencia; PE=Porcentaje de emergencia; LP= Longitud de plúmula; LR=Longitud de radícula; PFP=Peso fresco de planta; PSP=Peso seco de planta; IVI= Índice de vigor I.

El efecto de los aceites esenciales y caldos minerales como tratamientos pregerminativos en semillas de maíz se muestra en la Tabla 3. Los tratamientos que presentan mayor la velocidad y porcentaje de emergencia de las semillas fueron el testigo absoluto, seguido del aceite de romero y los caldos silicosulfocálcico y sulfocálcico con valores de 21.04, 20.52 y 20.28 plantas por día y 97.25, 94.68 y 96.18 %, respectivamente, para la longitud de plúmula el testigo presentó la media más alta con 13.61 cm, mientras que, la aplicación de los tratamientos inhibió el crecimiento, destacando el aceite de canela con

un valor de 8.80 cm, por su parte, el caldo silicosulfocálcico estimulo el desarrollo radicular con un valor de 28.03 cm. Para la variable de peso fresco se observa que los tratamientos de lemon grass y canela disminuyeron el peso de planta en más de 0.43 g en comparación con el testigo que reporta el valor más alto. En tanto, para el peso seco destaca el aceite de romero y canela con medias de 0.71 y 0.68 g, respectivamente. Los tratamientos que disminuyeron la biomasa de las plantas fueron lemon gran seguido de canela con valores de 0.24 y 0.39 g, respectivamente. Por otro lado, el uso de caldos minerales y aceites esenciales disminuye el índice de vigor I de las semillas de maíz, siendo los aceites de lemon grass y canela los que afectaron más esta variable con medias de 694.43 y 544.12.

Tabla 3. Comparación de medias de tratamientos aplicados a dosis de 0,5 y 1 ml a genotipos de maíz y su efecto en la calidad fisiológica Fuente: los autores.

Tratamientos	VE (plan día ⁻¹)	PE (%)	LP (cm)	LR (cm)	PFP (g)	PSP (g)	BP (g)	IVI
Testigo	21.04 a	97.25 a	13.61 a	27.77 a	1.32 a	0.14 e	1.17 a	1344.93 a
Romero	20.52 ab	94.68 a	11,31 c	21.85 b	1.14 bc	0.71 a	0.44 d	1049.21 c
Silicosulfocálcico	20.28 ab	96.18 a	12.28 b	28.03 a	1.17 b	0.33 c	0.83 b	1198.59 b
Sulfocálcico	19.91 b	93.12 a	11.55 c	25.79 a	1.03 d	0.29 d	0.74 c	1108.34 bc
Zinc	19.77 b	92.62 a	11.94 bc	25.59 a	1.10 c	0.33 c	0.76 c	1107.65 bc
Lemon grass	11.03 c	54.96 b	10.31 d	22.06 b	0.89 e	0.65 b	0.24 e	694.43 d
Canela	9.00 d	53.61 b	8.80 e	19.18 c	0.86 e	0.68 a	0.39 de	544.12 e

Columnas seguidas de la misma letra no presenta diferencia significativa (Tukey, $p < 0,05$); VE= Velocidad de emergencia; PE=Porcentaje de emergencia; LP= Longitud de plúmula; LR=Longitud de radícula; PFP=Peso fresco de planta; PSP=Peso seco de planta; IVI= Índice de vigor I.

En efecto de dosis de aceites esenciales y caldos minerales aplicados en semillas de maíz y su impacto en la calidad fisiológica se puede observar en la Tabla 4, donde se muestra que la dosis 0 presenta los valores más altos para cada una de las variables en estudio, excepto en el peso seco de la planta. Por su parte, la dosis de 0.5 ml reporta una disminución en la velocidad de emergencia del 1.2 plantas por día y de 4.08 % en la emergencia, en comparación a la dosis 0, en lo que se refiere a la longitud de plúmula esta también se vio afectada con una inhibición de su crecimiento de 0.72 cm, por otro lado, el crecimiento radicular no se afectó significativamente en comparación al testigo; el peso fresco de la planta presenta una reducción de 0.12 g, mientras que, el peso seco se incrementó en 0.52 g en comparación a las semillas sin tratamiento, además de reporta la media más baja en biomasa de planta (0.54 g); en lo que respecta al índice de vigor inicial I se disminuyó en 143.06. Por su parte, la dosis alta (1ml) reporta los

valores más bajos para todas las variables evaluadas excepto peso fresco y biomasa, por lo que se considera que los tratamientos presentaron un efecto tóxico sobre la semilla, evitando su buen desarrollo y crecimiento de la misma.

Tabla 4. Comparación de medias de dosis aplicadas a genotipos de maíz y su efecto en la calidad fisiológica Fuente: los autores.

Dosis	VE	PE	LP	LR	PFP	PSP	BP	IVI
(ml)	(plan día ⁻¹)	(%)	(cm)	(cm)	(g)	(g)	(g)	
0	21.04 a	97.25 a	13.61 a	27.77 a	1.32 a	0.14 c	1.17 a	1344.93 a
0,5	19.84 b	93.17 a	12.89 b	26.23 a	1.20 b	0.66 a	0.54 c	1201.87 b
1	13.66 c	68.56 b	9.17 c	21.27 b	0.86 c	0.34 b	0.62 b	698.91 c

Columnas seguidas de la misma letra no presenta diferencia significativa (Tukey, $p < 0,05$); VE= Velocidad de emergencia; PE=Porcentaje de emergencia; LP= Longitud de plúmula; LR=Longitud de radícula; PFP=Peso fresco de planta; PSP=Peso seco de planta; IVI= Índice de vigor I.

Los efectos mostrados por los aceites de canela y lemon grass se pueden asociar principalmente a la presencia de metabolitos secundarios como cinamaldehído, eugenol, citronelal, citronelol y citral (Lins et al., 2019), que han demostrado la capacidad de inhibir la germinación de semillas y causar fitotoxicidad en las plantas (Muñoz et al., 2020). El eugenol inhibe la germinación y reduce el crecimiento de las plantas de *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., *Phalaris minor* Retz., *Sorghum halepense* (L.) Pers. y *Leptochloa chinensis* (L.) Nees, causando fitotoxicidad debido a la baja respiración celular y concentración de clorofila (Ahuja et al., 2015). Por su parte, Torres et al. (2024) reportar una menor biomasa en malezas tratadas con eugenol. La aplicación de cimaldehído ha demostrado tener un efecto inhibitorio sobre la germinación de las semillas y el crecimiento de los brotes y las raíces del amaranto chino en un 55%, 75% y 85%, respectivamente (Chotsaeng et al., 2018). Por otro lado, el citronelol esta asociado en la fuga de solutos e induce la generación de ROS en el crecimiento de raíces y brotes lo que provoca una peroxidación lipídica y daño a la membrana (Kaur et al., 2011). El citronelal inhibe la emergencia de malezas y el crecimiento temprano de plántulas, tanto en raíces y brotes (Dudai et al., 2000); si se aplica vía foliar llega a producir clorosis y necrosis causadas por la pérdida de clorofila y la reducción de la respiración celular (Singh et al., 2006). Se ha demostrado que la aplicación del citronelal reduce la germinación de *Digitaria horizontalis* y *Cenchrus echinatus* en un 98% (Ootani et al., 2017). Por otro lado, el aceite esencial de romero ha demostrado tener efecto positivos sobre las plantas (Jalali et al., 2011). Souri y Bakhtiarizade (2019) reportan que la aplicación foliar de aceite esencial de romero a una dosis de 1,000 ppm disminuyo la altura de planta, pero sin embargo, se incremento el valor SPAD de las hojas, el peso fresco de los brotes y las raíces, los carbohidratos solubles en hojas y la concentración de nutrientes de nitrógeno, potasio, magnesio, hierro y zinc en las plantas.

Para el caso de los caldos minerales al ser compuestos elaborados a base de materiales inorgánicos, llega aportar en pequeñas cantidades nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, como son el azufre, calcio, zinc, silicio, fósforo, potasio y hierro. En el caso del azufre presente principalmente en los caldos sulfocálcico y silicosulfocálcico, juega un papel importante al ser componente de aminoácidos proteínicos como la metionina y la cisteína, el glutatión, las vitaminas (biotina y tiamina), las fitoquelatinas, la clorofila, la coenzima A y la S-adenosil-metionina (Li et al., 2020), también participa en la formación de enlaces disulfuro en la regulación de proteínas y enzimas, en particular en el control redox y además de brindar protección contra el daño oxidativo mediante el glutatión y sus derivados (Aarabi et al., 2020). Otro ingrediente de los caldos sulfocálcico y silicosulfocálcico es la cal monohidrata que aporta calcio un macronutriente esencial disponible en los brotes (Thor, 2019) y actúa regulando procesos en el crecimiento y desarrollo de las plantas, además de mediar respuestas celulares a los estímulos ambientales, por lo tanto, desempeña un papel importante en la tolerancia al estrés de las plantas (Pirayesh et al., 2021). Por otro lado, la ceniza llega aportar altas concentraciones de silicio (Arias et al., 2021) P, K, Ca, Mg, B y Zn, lo que incrementa la producción de cultivos (Dourado et al., 2021). El silicio actúa aumentando la capacidad fotosintética, reduciendo la tasa de transpiración y proporcionando mayor resistencia al estrés biótico y abiótico (dos Santos et al., 2021). Por su parte el Zn desempeña un papel fundamental en el metabolismo vegetal, ya que influye en la actividad de la hidrogenasa y la anhidrasa carbónica, la estabilización de las fracciones ribosomales y la síntesis de citocromo (Reddy; Kumari, 2022) y se ha identificado como un componente principal de diferentes proteínas asociadas con la síntesis de ADN y ARN (Bashir et al., 2016). Peck y McDonald (2010) observaron que un menor suministro de Zn obstaculizaba significativamente el proceso de crecimiento de la planta, mientras que un suministro adecuado de Zn minimizaba los efectos negativos del estrés térmico.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que la semilla del genotipo Nuevo Milenio presenta mejor respuesta a la aplicación de caldo minerales y aceites esenciales como tratamiento pregerminativo, al reportar la mayor velocidad y porcentaje de emergencia y vigor. Por su parte, la aplicación de caldos minerales, silicosulfocálcico, sulfocálcico, zinc y el aceite esencial de romero no afectan de manera importante la calidad fisiológica de la semilla de maíz, sin embargo, los aceites esenciales de canela y legom grass presentaron toxicidad sobre la semilla de maíz, afectando la velocidad de emergencia, porcentaje de emergencia, longitud de plúmula y raíz y por consecuencia su vigor, por lo que se puede considerar que ambos aceites presentan efecto herbicida al inhibir la emergencia y desarrollo de la semilla de maíz. Por lo otro lado, es importante conocer la dosis ideal para la aplicación de tratamientos pregerminativos, como se muestra en los resultados una mayor dosificación presenta problemas de toxicidad en la semilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarabi F et al. (2020). Coordinating sulfur pools under sulfate deprivation. *Trends in Plant Science*, 25(12): 1227-1239.
- Ahuja N et al. (2015). Actividad herbicida del eugenol sobre algunas malezas gramíneas y de hoja ancha. *J. Pest Sci.*, 88: 209–218.
- Alsafran M et al. (2022). Understanding the phytoremediation mechanisms of potentially toxic elements: a proteomic overview of recent advances. *Frontiers in plant science*, 13, 881242.
- Arias Q et al. (2021). Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras. *Revista cubana de química*, 33(3), 452-466.
- Barone V et al. (2018). Root morphological and molecular responses induced by microalgae extracts in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Applied Phycology*, 30: 1061-1071.
- Bashir K et al. (2016). Regulating subcellular metal homeostasis: the key to crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1192.
- Chotsaeng N et al. (2018). Inhibitory Effects of a Variety of Aldehydes on *Amaranthus tricolor* L. and *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. *Molecules*, 23: 471.
- de Andrade LA et al. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4): 1088.
- Dhifi W et al. (2016). Essential oils' chemical characterization and investigation of some biological activities: A critical review. *Medicines*, 3(4): 25.
- dos Santos LC et al. (2021). O papel do silício nas plantas. *Research, Society and Development*, 10(7): e3810716247-e3810716247
- Dourado LGA et al. (2021). Effects of wood ash and soil water potential on vegetative development of mung bean (*Vigna radiata* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 15(3), 354-361.
- Dudai N et al. (2000). Biotransformation of constituents of essential oils by germinating wheat seed. *Phytochemistry*, 55; 375–382.
- Fakorede MAB; y Ayoola OA. (1980). Relationship between seedling vigor and selection for yield improvement in maize. *Maydica*, 25: 135-147.
- Herrán JAF et al. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 4(1): 57-68.
- IDMA (Instituto de Desarrollo y Medio Ambiente). (2020). Caldos minerales y biocidas naturales. 19p.
- Ignat I et al. (2011). Characterization of grape seed aqueous extract and possible applications in biological systems. *Cellulose Chemistry and Technology*, 45: 205-209.
- Jalali M et al. (2011). Analysis of Iranian rosemary essential oil: Application of gas chromatography–mass spectrometry combined with chemometrics. *Journal of chromatography A*, 1218(18): 2569-2576.
- Kapoor RV et al. (2021). Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, 49: 107754.

- Kaur S et al. (2011). Citronellol Disrupts Membrane Integrity by Inducing Free Radical Generation. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 66: 260–266.
- Kharb, RPS et al. (1994). Prediction of field emergence through heritability and genetic advance of vigour parameters. *Seed Science and Technology*, 22: 461-466.
- Li Q et al. (2020). Sulfur homeostasis in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21.23: 8926.
- Lins L et al. (2019). Insights into the relationships between herbicide activities, molecular structure and membrane interaction of cinnamon and citronella essential oils components. *International journal of molecular sciences*, 20(16); 4007.
- Maguire JD, (1962). Speed of germination. Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2: 176-177.
- Muñoz M et al. (2020) Efectos fitotóxicos de tres compuestos naturales: ácido pelargónico, carvacrol y aldehído cinámico, contra malas hierbas problemáticas en cultivos mediterráneos. *Agronomía*, 10: 791.
- Ootani MA et al. (2017). Phytotoxic effects of essential oils in controlling weed species *Digitaria horizontalis* and *Cenchrus echinatus*. *Biocatal. Agric. Biotechnol*, 12: 59–65.
- Parađiković N et al. (2019). Biostimulants research in some horticultural plant species-A review. *Food and Energy Security*, 8(2): 1-12.
- Peck AW; McDonald GK (2010). Adequate zinc nutrition alleviates the adverse effects of heat stress in bread wheat. *Plant and soil*, 337; 355-374.
- Pirayesh N et al. (2021). Organellar calcium signaling in plants: An update. *biochimica et biophysica Acta (bbA)-molecular Cell Research*, 1868(4): 118948.
- Quispe A et al. (2016). Influencia de niveles de azufre en la producción, composición química bromatológica y digestibilidad del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.). *Revista de investigación veterinaria*, 27(1): 31-38.
- R Core Team (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Reddy NS; Kumari K (2022). Importance of zinc in plant nutrition: a review. *Asian J. Microbiol. Biotechnol. Environ. Sci*, 490-493.
- Rodríguez A et al. (2020). Extractos vegetales para el control de *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*, una alternativa sostenible para la agricultura. *Abanico Agroforestal*, 2: 1-13.
- Rouphael Y; Colla G (2020) Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11: 1-7.
- SADER. Chile, cebolla y jitomate, el tricolor de las fiestas patrias: Agricultura. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/chile-cebolla-y-jitomate-el-tricolor-de-las-fiestas-patrias-agricultura>. Consultado en: 05/febrero/2024.
- Singh HP et al. (2006). Phytotoxicity of the volatile monoterpene citronellal against some weeds. *Zeitschrift fur Naturforsch. Sect. C J. Biosci.*, 61: 334–340.

- Souri MK; Bakhtiarizade M. (2019). Biostimulation effects of rosemary essential oil on growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 243; 472-476.
- Tanase C et al. (2019). Wood bark as valuable raw material for compounds with a bioregulator effect in lemon balm (*Melissa officinalis* L.) plants. *Applied Sciences*, 9(15): 1-10.
- Thor K (2019). Calcium nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science* 10: 440-453.
- Torres N et al. (2024). Herbicidal potential of the natural compounds carvacrol, thymol, eugenol, p-cymene, citral and pelargonic acid in field conditions: indications for better performance. *Agronomy*, 14(3): 537.

Productividad de melón Zacapa con diferentes densidades de siembra en Michoacán

Recibido em: 14/05/2025

Aprobado em: 19/05/2025

 10.46420/9786585756563cap14

Jose Mario Miranda-Ramírez 

Lucila Perales-Aguilar* 

Ernesto González-Gaona 

Catarino Perales-Segovia 

Ramón del Val-Díaz 

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación en el mundo se producen alrededor de 29,54 millones de t de melón (*Cucumis melo* L.) anualmente, en 1.09 millones de ha⁻¹ (FAOSTAT, 2025), y en México se cuenta con una superficie de 19 mil 759 ha⁻¹ que producen 648 mil 541 t por año, que representan una derrama económica de USD \$ 235.76 MDD, mientras que en Michoacán se siembran alrededor de 3 mil 532 ha⁻¹ que producen 144 mil 824 t por año, que generan un ingreso de USD \$ 64.43 MDD y que corresponde a la mayor superficie de todos los estados productores de melón (SADER-SIAP, 2025).

El melón es una importante planta diploide anual perteneciente a la familia de las Cucurbitáceas (Torres-Quezada, 2023) y es una especie herbácea, de tallos o guías tiernos, blandos, flexibles, rastreros que alcanzan de 1.5 a 3.5 m de largo, provistos de zarcillos, por medio de los cuales puede tener hábito trepador (Crawford; Abarca, 2017) y las hojas son simples, trilobuladas o pentalobuladas (Raché-Mármol 2008; Torres-Quezada, 2023). La raíz es pivotante, la principal puede alcanzar hasta 1.5 m de profundidad y puede tener de 100 a 150 raíces secundarias (Crawford; Abarca, 2017) que suelen extenderse más allá de la biomasa aérea (Torres-Quezada, 2023). Su fruto, climatérico, corresponde a una baya con gran contenido de agua y sabor dulce (Crawford; Abarca, 2017).

En el Catálogo de la Unión Europea hay registradas más de 300 variedades de melón (Comisión Europea, 2023). Sin embargo, Los genotipos de melón comerciales más comunes se agrupan en cuatro variedades botánicas (Maroto-Borrego, 2002), los melones 1) Cantalupensis conocidos como cantalupos [con frutos de epidermis rugosa, dura y acostillada, tipo Galia, Charentais (Maroto-Borrego, 2002; Oregon State University 2025); 2) Reticulatus (Maroto-Borrego, 2002; Comisión Europea, 2023) [epidermis reticulada, algunos cultivares son de origen estadounidense como Zacapa Gold®, Barbossa® (US Agriseeds, 2025) y de origen japonés como Super Vida (Sakata, 2025)]; 3) Inodorus (Maroto-Borrego,

* Autor correspondiente: lucila.pa@pabellon.tecnm.mx

2002) [epidermis lisa, de color verde o amarilla, como Honey Dew variedad Megabrew, Súper Néctar (Sakata, 2025)] y 4) Saccharinus (Comisión Europea, 2023) [epidermis lisa y reticulada o moteada (Maroto-Borrego, 2002); conocidos como piel de sapo, como los genotipos Graciano, Cencibel y Macabeo (Syngenta, 2025)]. Los genotipos de melón que se cultivan en México principalmente son Cantaloupe (epidermis redada) y el Honey Dew (conocido como valenciano, de epidermis lisa de color blanco o verde pálido) y escasamente otros tipos de variedades sin clasificar (SADER-SIAP, 2025).

Los genotipos híbridos de melón Cantaloupe, por lo general son plantas vigorosas que requieren un espacio de plantación mayor, esto para evitar la competencia entre sí mismas por nutrientes, agua y luz principalmente. Ante ello, es necesario determinar la densidad de siembra apropiada que permita obtener el mayor rendimiento posible. Aunado a esto, la densidad de siembra, está influida en primer lugar por la variedad sembrada cuyo desarrollo y frondosidad puede necesitar marcos de plantación más o menos amplios. En climas más cálidos el desarrollo de la planta es mayor (Raché-Mármol, 2008). E igualmente, un aumento en ésta, incrementa el número de plantas, por tanto, la producción y el número de frutos por planta disminuye, así como su peso. Si se amplía el marco de siembra, el rendimiento es menor pero la producción por planta aumenta (Díaz-Alvarado et al. 2021).

Existen antecedentes de investigaciones realizadas sobre el efecto de la implementación de diferentes densidades de siembra en el cultivo de melón (Díaz-Alvarado; Monge-Pérez, 2017a; Díaz Alvarado; Monge Pérez, 2017b; Díaz-Alvarado et al., 2021; Díaz-Alvarado; Monge-Pérez, 2023) así como también en otros cultivos hortícolas, como el pimiento (Grijalva-Contreras et al., 2008; Monge-Pérez; Loría-Coto, 2022; Carrillo-Montoya; Vargas-Rojas, 2023), en camote (Rodríguez-Soto et al., 2023), haba (Araujo-Díaz et al., 2023), pepino (López-Elías et al., 2011), tomate de bola (Grijalva-Contreras et al., 2010), y berenjena (Arguedas-García; Monge-Pérez, 2017). En varias de estas investigaciones se ha reportado que la densidad de siembra tiene un efecto importante e interesante sobre el rendimiento, aunque no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos. De acuerdo con la literatura revisada, a mayor densidad de plantación, mayor rendimiento, pero menor calidad.

Por lo antes expuesto, se planteó como objetivo evaluar el efecto de diferentes densidades de siembra sobre el rendimiento de melón Zacapa Gold® cultivado a cielo abierto.

MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio del experimento

El sitio del experimento se estableció en una parcela con una superficie aproximada de 30 hectáreas de siembra comercial de melón, situada en el km 3 del entronque – carretera a Tepalcatepec, en Buenavista Michoacán México, a los 19° 13' 10.18" N, 102° 36' 27.26" O, a 488 msnm (Google Earth, 2025). Este sitio se caracteriza por tener un tipo de suelo vertisol pélico (INEGI, 2025a), con un tipo de clima BS1 (h') W (W) que corresponde al grupo de climas cálidos semi secos BS1 (INEGI, 2025b), con temperatura media anual de 34.5 °C y 800 mm de precipitación media anual (SMN-CONAGUA, 2025).

Material vegetal

Melón híbrido tipo Harper Zacapa Gold®, planta vigorosa y fuerte, produce de 8 a 10 frutos por metro, 16 °Brix en fruto, color de pulpa naranja intenso con cavidad firme y apretada, de epidermis color crema con red fina (US Agriseeds, 2025).

Manejo de cultivo

En la preparación del terreno se utilizó plástico de color plata-negro (polietileno calibre 100 µm) de 1.20 m de ancho, con perforaciones a doble hilera de diferentes medidas en zigzag (Tabla 1) y cintilla de riego de la marca Toro® con un diámetro de 16 mm y separación entre goteros a 30 cm, con un gasto hidráulico de 1.0 L por hora, instalada a doble hilera. La siembra se hizo directamente en el terreno previamente húmedo, al marco prefijado (densidad de siembra), depositando la semilla a una profundidad de 2 a 3 cm aproximadamente.

Con relación a los riegos, las láminas se determinaron de acuerdo a las necesidades hídricas del cultivo, tomando en cuenta la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo para los meses de enero a abril, con intervalos de cada tres días.

Para el manejo de plagas de insectos chupadores, se utilizó agribón de 17 g m² de 1.80 m de ancho, tapando las plántulas de melón al siguiente día posterior a la germinación, con una duración de 26 días. Los productos utilizados para el manejo fitosanitario del cultivo fueron Fractal® (extracto de cítrico 9.99%) Berni Labs/México, en dosis de 2 ml L⁻¹, Ovitech (ácidos orgánicos 20%, sales minerales 10%) Biotech/México, en dosis de 2 ml L⁻¹, Lifetech S60 (*Saccharopolyspora spinosa* 60 g, ácidos grasos concentrados 70%) Biotech/México, en dosis de 2 ml L⁻¹, Solak® (extracto de piretro *Chrysanthemum cinerariaefolium* 20% + extracto de eugenol *Syzygium aromaticum* 15%), Biologa/México, en dosis de 2 ml L⁻¹ y adherente Inex A® (alcohol graso etoxilado al 20.2%) de Cosmocel/México, en dosis de 1 ml L⁻¹. Para las aplicaciones, se utilizó un aspersor marca Búfalo con capacidad de volumen para 2,000 litros con aguilón integrado de cuatro pistolas, jalado por un tractor New Holland modelo TT4. Los repelentes se alternaron una vez por semana, de acuerdo con los muestreos realizados. Para la prevención y manejo de enfermedades se utilizaron fungicidas de contacto como el Mancozeb de 1 a 2 g por L⁻¹, oxiclورو de cobre al 85% en dosis de 1.0 g L⁻¹, y sistémicos clorotalonil al 54% de 1 a 2 ml L⁻¹ y metalaxil 1 a 2 g por L⁻¹.

Con relación a la fertilización, durante todo el ciclo de producción del cultivo se aplicaron diferentes tipos de fertilizante en el riego: 32 L ha⁻¹ de ácido nítrico (HNO₃); 50 L ha⁻¹ de fosfonitrato (NH₄NO₃); 25 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄; 87.5 kg ha⁻¹ de fosfato Monoamónico MAP (NH₄H₂PO₄); 140 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio (KCl); 140 kg ha⁻¹ de sulfato de potasio (K₂SO₄); 50 kg ha⁻¹ de Nova PeKacid® 00-60-20 (60% P₂O₅ - 20% K₂O); 50 kg ha⁻¹ de triple 19-19-19 (N-P-K); 112.5

kg ha⁻¹ de nitrato de calcio Ca(NO₃)₂; 12.5 kg ha⁻¹ de óxido de boro B₂O₃; 35 kg ha⁻¹ de sulfato de magnesio (MgSO₄·7H₂O) y 25 kg ha⁻¹ de Fosfitos de potasio (KH₂PO₃).

Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental irrestricto (diseño completamente al azar DCA), con siete tratamientos, nueve repeticiones y la unidad experimental fue una planta de melón.

Tratamientos

Se evaluaron siete densidades de siembra, a doble hilera en zigzag, con dimensiones de 1.20 m de ancho y 100 m de longitud que equivale una cama. Con una superficie total del experimento de 1 680 m², con densidades poblacionales estimadas en:

$$\text{Plantas por ha}^{-1} = \text{Número de plantas por hilera} * \text{Número de hileras por ha}^{-1}$$

Las densidades de siembra evaluadas fueron las siguientes:

T1) Doble hilera en zigzag a 0.40 m (testigo) con 19 883.33 plantas ha⁻¹; T2) Doble hilera en zigzag a 0.80 m con 9 916.67 plantas ha⁻¹; T3) Doble hilera en zigzag a 1.00 m con 7 933.33 plantas ha⁻¹; T4) Doble hilera en zigzag a 1.10 m con 7 212.12 plantas ha⁻¹; T5) Doble hilera en zigzag a 1.20 m con 6 611.11 plantas ha⁻¹; T6) Doble hilera en zigzag a 1.30 m con 6,102.56 plantas ha⁻¹ y T7) Doble hilera con dos plantas separadas a 0.40 m en zigzag con espacio de 0.80 m con 19 833.33 plantas ha⁻¹.

El arreglo de los tratamientos se realizó en siete camas, con igual espaciamiento entre estas a 2.40 m (surcado) y 100 m de longitud. Cada cama corresponde a un tratamiento con nueve repeticiones (Figura 1 y 2).

- a)** Cama a doble hilera en zigzag, con **b).** Cama a doble hilera con dos plantas separadas
espaciamientos de plantación a ep = 0.40, 0.80, a 0.40 m en zigzag, con espaciamiento de
1.00, 1.10, 1.20 y 1.30 m plantación ep = 0.80 m

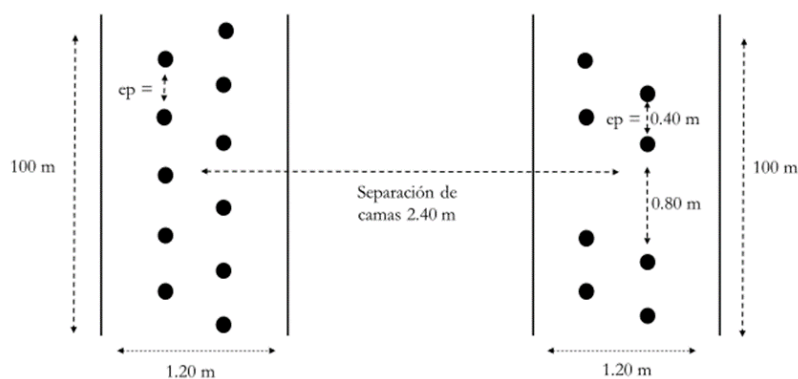


Figura 1. Espaciamiento entre plantas de melón a doble hilera en la cama. **(a)** Corresponde a los T1, T2, T3, T4, T5 y T6. **(b).** Corresponde al T7. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Siembra de melón Zacapa en zigzag en Buenavista Michoacán, México (Foto: Dr. José Mario Miranda Ramírez).

Variables de estudio

Se analizaron las siguientes variables:

- 1) Frutos por m^2 , se cuantificó el número de frutos en planta por m^2 de forma manual (Figura 3).
- 2) Peso de fruto (kg), se pesó el número de frutos obtenidos en una báscula digital Truper BASE-5EP con capacidad para 5 kg.
- 3) Frutos por planta (número) se calculó con *Frutos por m^2 / Densidad de siembra por m^2*), mientras que:

$$\text{Densidad de siembra por } m^2 = \left[\frac{1 m}{\text{distancia de plantas en m}} \right] * 2 \text{ hileras.}$$

- 4) Sólidos Solubles Totales (°Brix), cada fruto se midió por medio de refractometría, utilizando un refractómetro digital Atago® Modelo PR-100.
- 5) Diámetro ecuatorial de fruto (cm), se partieron por mitad los frutos y con un flexómetro de 3 m de longitud se midió el tamaño de fruto en sentido horizontal, esto en cuanto alcanzaron su madurez fisiológica.
- 6) Diámetro polar de fruto (cm), al igual que la variable anterior se realizó el mismo procedimiento, midiendo el tamaño de fruto de manera vertical.

Para la estimación del 7) Rendimiento se utilizaron las siguientes unidades: $(kg m^2) = \text{Peso de fruto (kg)} * \text{Frutos por } (m^2)$; seguido $(kg \text{ por planta}) = \text{Peso de fruto (kg)} * \text{Frutos por planta}$; después $(kg ha^{-1}) = [\text{Peso de fruto (kg)} * \text{Frutos por planta (número)}] * [\text{Número de plantas por } ha^{-1}]$ y se hizo la conversión a $t ha^{-1}$; por último, se calcularon las *Cajas Bruce* $(ha^{-1}) = \frac{\text{Rendimiento en } kg ha^{-1}}{\text{Peso de la caja Bruce } 18 kg}$

clasificando así los frutos de acuerdo a la cantidad almacenada por tamaño de los diámetros ecuatorial y polar (cm) en una caja Bruce de 18 kg aproximadamente (Tabla 1).



Figura 3. Frutos maduros de melón Zacapa en Buenavista Michoacán, México (Foto: Dr. José Mario Miranda Ramírez).

Tabla 1. Clasificación por tamaño y peso de frutos para mercado de exportación a EEUU (en cajas Bruce de 18 kg).

Tamaño	Frutos por caja Bruce (18 kg)	Diámetro mínimo (cm)*	Diámetro máximo (cm)*	Peso promedio de fruto (kg)
Grande	9	15x15	15x16	1.875
Grande	12	14x14	14x15	1.420
Grande	15	13x13	13x14	1.180
Mediano	18	12x12	12x13	0.935
Mediano	23	11x11	11x12	0.760
Chico	28	10x10	10x11	0.650
Chico	30	9x9	9x10	0.500

* Diámetro ecuatorial por diámetro polar.

La toma de datos de todas las variables se realizó a los 72 días después de la germinación (1 día antes de la cosecha comercial).

Análisis estadístico

Para todas las variables, se realizó la prueba Levene's de normalidad y homocedasticidad de los datos de las varianzas [Post-Hoc], análisis estadístico de varianza (ANDEVA) y la prueba de medias Tukey ($p \leq 0,05$) para obtener las comparaciones entre tratamiento, todo ello en el programa STATISTICA Versión 13.2 (TIBCO Inc, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prueba Levene's de normalidad y homocedasticidad de los datos de las varianzas (Post-Hoc) para todas las variables corroboró una linealidad y una distribución normal. En el ANDEVA se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en los tratamientos para todas las variables (Tabla 2).

Tabla 2. Analisis de varianza ($p \leq 0,05$), para las variables evaluadas en melón.

Variable	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	gl	F calculada	Valor p	CV (%)
F (m ²)	37.33	6.22	6.56	278.96	0.000000	13.21656
PF (kg)	1.07	0.18	6.56	2.77	0.019681	17.71919
FP (núm)	45.21	7.53	6.56	1456.07	0.000000	33.65401
SST (°Brix)	50.04	8.34	6.56	3.04	0.012130	19.77450
DEF (cm)	10.11	1.69	6.56	2.98	0.013548	5.82719
DPF (cm)	19.64	3.27	6.56	4.56	0.000778	6.57802
REND (kg m ²)	82.88	13.81	6.56	5.51	0.000155	20.64601
REND (kg planta)	118.10	19.68	6.56	40.82	0.000000	38.48304
REND (t ha ⁻¹)	1304.06	217.34	6.56	5.51	0.000155	20.64601
REND (Cajas Bruce ha ⁻¹)	4024864.40	670810.73	6.56	5.51	0.000155	20.64601

F= Frutos; PF= Peso de fruto; SST= Sólidos solubles totales; DEF= Diámetro ecuatorial de fruto; DPF= Diámetro polar de fruto; REND= Rendimiento.

De acuerdo con la prueba de comparación de medias (Tukey $p \leq 0,05$) los tratamientos presentaron diferencias estadísticamente significativas en todas las variables evaluadas (Tabla 3), como se presenta en los resultados descritos y discutidos a continuación, de las variables más importantes.

Frutos

En esta variable todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticamente significativas. El tratamiento T5 presentó un número de frutos igual al testigo y solo el T7 fue superior con 7,30 frutos m², mientras que el número más bajo fue para el T6 con 4.60 frutos por m² (Tabla 3).

Peso de fruto

En esta variable, todos los tratamientos superaron al testigo, con un promedio de 1.32 kg de peso por fruto. El T3 fue el mejor con un peso de 1.72 kg por fruto, mientras que el T4 presentó el menor peso (1.42 kg) después del testigo.

Sólidos solubles totales

En grados Brix, solo uno de los tratamientos superó al testigo (10.31), el T5 con 10.53 °Brix. El tratamiento con los frutos menos dulces fue el T3, con 7.74 grados Brix. Por su parte Hai & Thao (2021), reportaron en frutos obtenidos de melón reticulado de una densidad de plantación de 38 mil plantas ha⁻¹ un contenido de azúcares entre 10.04 y 13.28 °Brix, esto comparado con el testigo (19 883.33 plantas ha⁻¹) y el T5 (6 611.11 plantas ha⁻¹) de esta investigación, son valores dentro de este rango.

Tabla 3. Resultados del efecto las densidades de siembra en las variables del cultivo de melón.

Trat.	F(m ²)	F (kg)	FP (núm)	SST (°Brix)	DEF (cm)	DPF (cm)	REND (kg m ²)	REND (kg planta ⁻¹)	REND (t ha ⁻¹)
T1	6.30 ^b	1.32 ^b	1.26 ^a	10.31 ^a	13.34 ^a	13.98 ^b	8.3 ^{ab}	1.66 ^c	32.93 ^a
T2	6.01 ^a	1.70 ^a	2.40 ^c	8.72 ^{ab}	14.42 ^{ab}	15.48 ^a	10.2 ^{bc}	4.08 ^a	40.47 ^{bc}
T3	5.47 ^d	1.72 ^a	2.73 ^d	7.74 ^b	14.67 ^b	15.74 ^a	9.41 ^{abc}	4.71 ^{ab}	37.35 ^{abc}
T4	5.80 ^a	1.46 ^{ab}	3.19 ^f	8.92 ^{ab}	14.07 ^{ab}	14.57 ^{ab}	8.49 ^{ab}	4.67 ^a	33.69 ^{ab}
T5	6.30 ^b	1.5 ^{ab}	3.78 ^g	10.53 ^{ab}	13.84 ^{ab}	14.76 ^{ab}	9.49 ^{abc}	5.69 ^b	37.62 ^{abc}
T6	4.60 ^c	1.61 ^{ab}	2.99 ^e	9.07 ^{ab}	14.32 ^{ab}	15.26 ^a	7.39 ^a	4.80 ^{ab}	29.31 ^a
T7	7.30 ^e	1.52 ^{ab}	1.26 ^b	8.89 ^{ab}	13.99 ^{ab}	14.72 ^{ab}	11.07 ^c	2.21 ^c	43.9 ^c

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0,05$). T1) Doble hilera en zigzag a 0.40 m (testigo); T2) Doble hilera en zigzag a 0.80 m; T3) Doble hilera en zigzag a 1.00 m; T4) Doble hilera en zigzag a 1.10 m; T5) Doble hilera en zigzag a 1.20 m; T6) Doble hilera en zigzag a 1.30 m; T7) Doble hilera con dos plantas separadas a 0.40 m en zigzag con espacio de 0.80 m. F= Frutos; PF= Peso de fruto; SST: Sólidos solubles totales; DEF: Diámetro ecuatorial de fruto; DPF=Diámetro polar de fruto; REND: Rendimiento; CV= 19,71%.

Diámetro ecuatorial y polar de fruto

En estas dos variables evaluadas se presentaron las diferencias menos significativas y todos los tratamientos superaron al testigo en ambos casos. En diámetro ecuatorial el tratamiento 3 presentó 14.67 cm y el testigo 13.34; mientras que en el diámetro polar el mejor fue el también el tratamiento 3 con 15.74 cm, comparado con los 13.98 cm del testigo.

Rendimiento

En los tres registros de datos para esta variable, todos los tratamientos superaron al Testigo (T1), sobresaliendo el tratamiento 7 con 11.70 kg m² y 43.90 t ha⁻¹. En kg de melón por planta⁻¹ el más alto fue el tratamiento 5 con 5.69 kg planta⁻¹ (Tabla 4). Los resultados obtenidos del T7 con una densidad poblacional de 19 833.33 plantas ha⁻¹, pueden ser comparados con los reportados por Hai & Thao (2021) para los tratamientos con densidad poblacional de 33 mil y 38 mil plantas ha⁻¹ con rendimientos de entre 34 y 46.11 t ha⁻¹ para la densidad más baja, y 37.78 y 46.22 t ha⁻¹ para la densidad más alta esto en melón reticulado 'Inthanon RZ'. En cambio, Aluko (2024) reportó un rendimiento de 10.29 t ha⁻¹, para una densidad poblacional de 20 mil plantas por ha⁻¹, valor muy bajo comparado con ambas investigaciones.

Por su parte Díaz-Alvarado y Monge-Pérez (2017c) encontraron en tres densidades de siembra en melón Cantaloupe, 1.9, 3.2 y 3.9 plantas por m², no se presentaron diferencias significativas en el rendimiento, el más alto fue de 2.76 kg m². Esto comparado con los resultados de esta investigación, para el T2 (2.5 plantas por m²) y el T7 (5 plantas por m²) con rendimientos de 10.20 y 11.07 kg m² respectivamente, fueron superados. Asimismo, Montes-Jara (2020) reportó en melón Súper Torreón F1 para las distancias de plantación de 0.60 y 0.40 m rendimientos de 24.27 y 21.66 t ha⁻¹ respectivamente, mientras que para el testigo de 0.50 m 22.39 t ha⁻¹, comparando esto con los resultados de esta investigación del testigo (0.40 m), fueron valores muy bajos (Tabla 3).

En cuanto al rendimiento en cajas Bruce, con excepción del T6, todos los demás tratamientos fueron superiores al testigo, sobre todo el T7 con 2 439.00 cajas Bruce (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del rendimiento de melón en Cajas Bruce (18 kg aproximadamente), con relación al tamaño de fruto.

Tratamiento	Tamaño de fruto [Diámetro promedio] (cm) [§]	Frutos por caja Bruce (No)	Rendimiento (Cajas Bruce de 18 kg ha ⁻¹)
T1	13.34 x 13.98	15	1829.50 ^{ab}
T2	14.42 x 15.48	9	2248.34 ^{bc}
T3	14.67 x 15.74	9	2074.76 ^{abc}
T4	14.07 x 14.57	12	1871.73 ^{ab}
T5	13.84 x 14.76	12	2090.26 ^{abc}
T6	14.32 x 15.26	12	1628.15 ^a
T7	13.99 x 14.72	12	2439.00 ^c

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0,05$). T1) Doble hilera en zigzag a 0.40 m (testigo); T2) Doble hilera en zigzag a 0.80 m; T3) Doble hilera en zigzag a 1.00 m; T4) Doble hilera en zigzag a 1.10 m; T5) Doble hilera en zigzag a 1.20 m; T6) Doble hilera en zigzag a 1.30 m; T7) Doble hilera con dos plantas separadas a 0.40 m en zigzag con espacio de 0.80 m.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos y con base en las variables evaluadas, la mejor densidad de siembra para melón Zacapa en Michoacán fue el T7) Doble hilera con dos plantas separadas a 0.40 m en zigzag con espacio de 0.80 m con 19 833.33 plantas ha⁻¹, superó al testigo T1) Doble hilera en zigzag a 0.40 m y a los demás tratamientos en número de frutos y en tres de los cuatro registros del rendimiento: kg m², cajas Bruce y t ha⁻¹. El T5) Doble hilera en zigzag a 1.20 m fue el mejor en grados Brix y en kg de melón por planta. El T3) Doble hilera en zigzag a 1.00 m fue mejor que el testigo y los otros tratamientos en peso de frutos, y en los diámetros polar y ecuatorial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sr. José Manuel Ochoa Morales, Director General de la Agroempresa Papayas y Melones El Jefe 8A, por haber otorgado todas las facilidades en el huerto para que se pudiera llevar a cabo esta investigación.

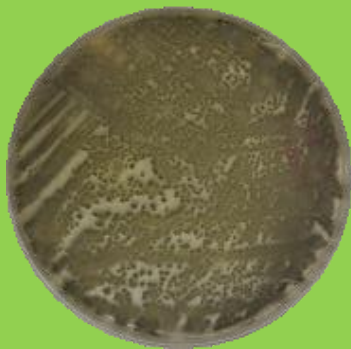
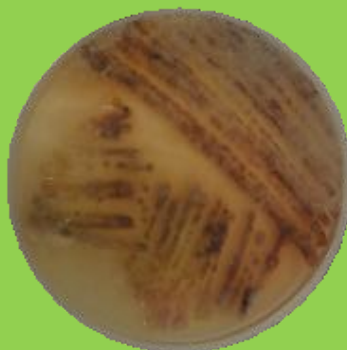
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aluko, M. (2024). Plant population density affect on muskmelon (*Cucumis melo* L.) growth and yield. Egyptian Journal of Agricultural Research, 102(3), 425-434. https://journals.ekb.eg/article_337807_18a3664a9ac1bc3e8f57991fae4e9d0e.pdf
- Araujo-Díaz, R., García-Hernández, G., Estrada-Campuzano, G., Martínez-Rueda, C.G. & Domínguez-López, A. (2023). Caracteres ecofisiológicos y numéricos del rendimiento en haba afectados por el cultivar, densidad de población y sistema de siembra. Revista mexicana de Ciencias Agrícolas, 14(1), 51-62. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i1.2992>
- Arguedas-García, C., & Monge-Pérez, J. E. (2017). Efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad de los frutos de dos genotipos de berenjena (*Solanum melongena* L.) cultivados en invernadero en Costa Rica. Tecnología en marcha, 30 (4), 66-79. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=699878536006>
- Carrillo-Montoya, K. & Vargas-Rojas, J. C. (2023). Rendimiento, características morfológicas y calidad del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) bajo dos densidades de siembra y tipos de podas. Agronomía Mesoamericana, 34(3), 53659. <https://dx.doi.org/10.15517/am.2023.53659>
- Comisión Europea (2023). Catálogos de variedades vegetales, bases de datos y sistemas de información. [Versión web]. Disponible en: https://food.ec.europa.eu/plants/plant-reproductive-material/plant-variety-catalogues-databases-information-systems_en#agri-veg . Consultado en: 27 de abril de 2025.
- Crawford, H. & Abarca, P. (2017). Manual de manejo agronómico para cultivo de Melón (*Cucumis melo* L.). Rengo, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, no. 366. 92 p. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6666> . Consultado en: 26 de abril de 2025.
- Díaz-Alvarado, J. M., Monge-Pérez, J. E. y Loría-Coto, M. (2021). Producción de melón (*Cucumis melo* L.) Cantaloupe en invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento. Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible, 9, 27-46. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5033>
- Díaz-Alvarado, J. M., & Monge-Pérez, J. E. (2017a). Producción de melón (*Cucumis melo* L.) en invernadero: efecto de poda y densidad de siembra. Posgrado y Sociedad Revista Electrónica del Sistema de Estudios de Posgrado, 15(1), 1–12. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1821>
- Díaz Alvarado, J. M., & Monge Pérez, J. E. (2017b). Efecto de poda y densidad de siembra sobre melón cultivado en invernadero*. Pensamiento Actual, 17(29), 105–115. <https://doi.org/10.15517/pa.v17i29.31583>
- Díaz-Alvarado, J. & Monge-Pérez, J. E. (2017c). Efecto de la poda y la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad de melón Cantaloupe (*Cucumis melo* L.) cultivado bajo invernadero. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 11(1), 21-29. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5742>

- Díaz-Alvarado, J. M., & Monge-Pérez, J. E. (2023). Densidad de población y tipo de poda en melón Cantaloupe cultivado en invernadero: evaluación económica. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 12(1), 13-25. <https://www.camjol.info/index.php/PAYDS/issue/view/1858>
- FAOSTAT (2025). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – Estadísticas. Cultivos y productos de ganadería. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> . Consultado en: 25 de abril de 2025.
- Google Earth (2025). Mapa de Buenavista Michoacán, México. Google Maps. Disponible en: https://earth.google.com/web/@19.42851401,-102.60431345,-43442.90489174a,50407.01986268d,35y,-0.0055121h,27.83694418t,359.9973r/data=CgRCAGgBOgMKATBCAggASg0I_____A RAA . Consultado en: 16 de abril de 2025.
- Grijalva-Contreras, R. L., Macías-Duarte, R., Grijalva-Durón, S. A. & Robles-Contreras, F. (2010). Evaluación de densidades y arreglos de plantación en tomate bola en condiciones de invernadero en el noroeste de Sonora. *Biotecnia*, 12(2), 20–28. <https://doi.org/10.18633/bt.v12i2.85>
- Grijalva-Contreras, R. L., Macías-Duarte, R., & Robles-Contreras, F. (2008). Productividad y calidad de variedades y densidades de chile Bell Pepper bajo condiciones de invernadero en el noroeste de Sonora. *Biotecnia*, 10(3), 3–10. <https://doi.org/10.18633/bt.v10i3.41>
- INEGI (2025a). Geografía y Medio Ambiente. Edafología. Escala: 1: 250 000. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/> Consultado en: 16 de abril de 2025.
- INEGI (2025b). Geografía y Medio Ambiente. Climatología. Escala: 1: 1 000 000. Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#mapas> . Consultado en: 16 de abril de 2025.
- López-Elías, J., Huez-López, M. A., Pacheco-Ayala, F., Jiménez-León, J., & Preciado-Flores, F. A. (2011). Productividad y calidad de dos cultivares de pepino en respuesta a la densidad de plantación. *Biotecnia*, 13(1), 23–28. <https://doi.org/10.18633/bt.v13i1.77>
- Maroto-Borrego, J. V. (2002). *Horticultura Herbácea Especial*. 5ta Edición. Mexico: Ediciones Mundi-Prensa. 463p.
- Monge-Pérez, J. E. & Loría-Coto, M. (2022). Relaciones entre densidad de siembra y variables de rendimiento en pimiento (*Capsicum annuum*). *Tecnología en Marcha* 35(4), 162-174. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v35i4.5853>
- Montes-Jara, M. G. (2020). Efecto de densidad de siembra sobre el rendimiento en melón (*Cucumis melo* L.), var Súper Torreón F1 en el valle de Hualar, 2016. Universidad San Pedro. [Tesis de maestría], 54p. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/15316>

- Oregon State University (2025). Melons: Cantaloupe, Muskmelon, Honeydew, Crenshaw, Casaba, etc. Disponible en: <https://horticulture.oregonstate.edu/oregon-vegetables/melons-cantaloupe-muskmelon-honeydew-crenshaw-casaba-etc-0> . Consultado en: 25 de abril de 2025.
- Raché-Mármol, J. R. (2008). Cultivo del melón en invernadero. Consejería de Agricultura y Pesca, Servicio de Publicaciones y Divulgación. Andalucía, España: Junta de Andalucía. https://guiaspdf.net/wp-content/uploads/2021/02/Manual-para-Cultivar-Melon-GuiasPDF.Net_.pdf
- Rodríguez-Soto, G., Pinedo-Taco, R. & Culqui-Gaslac, C. (2023). Dosis de fertilización y densidad de siembra en clones avanzados de camote (*Ipomoea batatas* L.). Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 10(1), 7-14. <https://dialnet.unirioja.es/revista/28074/V/10?anualidad=2023>
- SADER-SIAP (2025). Avance de siembras y cosechas. Secretaría de Desarrollo Rural - Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/ Consultado en: 16 de abril de 2025.
- Sakata (2025). Melones - Honeydew. Disponible en: <https://www.sakata.com.mx/semillas/melon/honeydew/> . Consultado en: 26 de abril de 2025.
- SMN-CONAGUA (2025). Datos meteorológicos. Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/> . Consultado en: 15 de abril de 2025.
- Syngenta (2025). Semillas vegetales – Melón. Disponible en: <https://www.syngentavegetables.com/es-es/product/seed/melon/graciano> . Consultado en: 26 de abril de 2025.
- TIBCO Inc (2017). STATISTICA data analysis software system, Version 13.3 for Windows, TIBCO® Inc, Tulsa, OK, USA. Disponible en: <https://www.tibco.com/products/data-science> . Consultado en: 17 de abril de 2025.
- Torres-Quezada, E. (2023). Basic melon (*Cucumis melo* L.) physiology and morphology. [Entrada de blog]. Disponible en: <https://www.pubs.ext.vt.edu/SPES/spes-507/spes-507.html> . Consultado en: 18 de abril de 2025.
- Hai, T. T. H., & Thao, P. T. (2021). Effect of plant density and foliar fertilizer spray on growth and yield of netted melon (*Cucumis melo* L.) 'Inthanon RZ'. Hue University Journal of Science: Natural Science, 130(1B), 27-34. <https://doi.org/10.26459/hueunijns.v130i1B.6015>
- US Agriseeds (2025). Resumen de cultivos – Harper, Zacapa Gold®. Disponible en: <https://www.usagriseeds.com/segments-overview/zacapa-2/> . Consultado en: 15 de abril de 2025.

Ciencias ambientales



Triticale: una opción sustentable para forraje bajo condiciones agroecológicas en el sur de Sonora

Recibido em: 14/05/2025

Aprobado em: 17/05/2025

 10.46420/9786585756563cap15

Rodriguez-Perez Gilberto* 

Gómez-Vázquez Alfredo Josué 

Avila-Perches Miguel Angel 

Latournerie-Moreno Luis 

Quintana-Camargo Martín 

INTRODUCCIÓN

La evaluación de líneas avanzadas de triticales experimentales en forma sustentable en el Valle del Yaqui permiten identificar su potencial de rendimiento y adaptación a condiciones ambientales semiáridas, adicionalmente encontrar rentabilidad y reconversión de cultivos en el estado de Sonora. En la actualidad el mejoramiento genético del triticale que realiza el CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo), es para la producción de grano en ensayos internacionales por distintos cooperadores ya sea instituciones educativas, agricultores o empresas lo que ha propiciado que se utilicen metodologías más sencillas, por ejemplo, en la selección aquellas variedades prometedoras para ser liberadas en un futuro (Abeledo et al., 2003). En México, en triticale ha tenido una adopción más en la producción de forraje en la Comarca Lagunera y del Bajío Mexicano, este tipo de material genético proporciona más proporción de proteína que el trigo, debido a su consistencia del gluten no ha sido utilizado en la línea industrial para la obtención de pastas o harinas de panificación, es por ello que es importante evaluar el comportamiento agronómico y de forraje para identificar aquellas líneas con potencial, Sonora es el estado con una alternativa para iniciar con la adopción de este tipo de material en la parte de elaboración de alimentos balanceados, como para la producción de forraje en épocas críticas de forrajes (Rodríguez et al., 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Tecnológico Nacional de México campus Valle del Yaqui en Av. Tecnológico, Block 611, Valle del Yaqui BÁCUM, Sonora, situado al sur del estado de Sonora, entre la Sierra Madre Occidental, y el Mar de Cortés, entre 27°02'49" latitud y 110°07'47" longitud a una altura de 13 msnm. El trabajo consistió en evaluar 20 líneas experimentales de triticales, provenientes de Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) al TecNM-Valle del Yaqui y el testigo

* Autor correspondiente: grodriguez.perez@itvy.edu.mx

comercial Bicentenario. El ensayo se sembró en cuatro surcos de cinco metros de largo a doble hilera en 20 cm a una distancia de 0.80 m entre surcos, se utilizaron de 12 gramos por parcela, con una densidad de 80 kg ha⁻¹, el área total de unidad experimental fue de 3.2 m².

El experimento se condujo bajo el diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Variables registradas: días a madurez fisiológica (DMF), para esta variable se contabilizó el número de días transcurridos desde la fecha de emergencia hasta el 50% + 1 de los pedúnculos que estén maduros (es decir, de color amarillo), y en este punto las glumas (las cuales son frecuentemente la última parte de la planta en fenecer) también estarán perdiendo su color; altura de planta (AP), se determinó con un estadal graduado (m), desde la base de la planta hasta las últimas glumas, considerando 10 plantas de cada parcela útil. Número de tallos (NT), se contaron los tallos cortados en un metro lineal de cada unidad experimentales, los cuales fueron utilizados para determinar rendimiento de forraje. Rendimiento de forraje verde: se realizó el corte de cada parcela útil (un surco de un metro lineal de longitud), en etapa de floración. Con los datos obtenidos se estimó el rendimiento en kg ha⁻¹. Rendimiento de forraje seco: para obtener este dato; se recolectó una muestra de 100 gramos del forraje que se cortó para determinar forraje verde, se introdujeron las muestras de 100 gramos de cada unidad experimental a una estufa a 60 °C por 48 horas. Pasado el tiempo se pesaron las muestras, se dejaron fuera de la estufa por 24 horas, pasadas las 24 horas se pesarán y se tomará el dato, esto para determinar que las muestras ya tendrán un peso constante (ha perdido toda su humedad), se pesarán las muestras para obtener el peso seco de las muestras de 100 gramos. Con los datos obtenidos se estimó el rendimiento en kg ha⁻¹.

Tabla 1. Material genético utilizado en el Tecnológico Nacional de México-Valle del Yaqui.

Línea	Genealogía	Línea	Genealogía
L-1	M2A/M2A	L-11	MEXTOL_1
L-2	BONITO	L-12	IGA46/BGL
L-3	OTTER	L-13	MAYA2/ARM
L-4	M2A/M2A	L-14	M2A/M2A
L-5	KATZE	L-15	MOUSE
L-6	KISS/CIN	L-16	TARASCA
L-7	NUTRIA 440	L-17	SISKIYOU
L-8	CINUEM/CIN	L-18	FARO-T 17
L-9	BICENTENARIO	L-19	NINGADHU
L-10	MAYA2/ARM	L-20	TEDDY

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) completamente al azar con tres repeticiones y en las variables que presentaron diferencias significativas, se procedió a realizar la comparación de medias diferencia mínima significativa (Tukey) $P \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ANDEVA indicó que existieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las líneas evaluadas (Tabla 2), los coeficientes de variación fluctuaron entre 2.04 a 4.44%, lo cual presentaron el 97.96% y 95.56% de confiabilidad del experimento y datos generados.

Tabla 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para producción de forraje y caracteres agronómicos de 20 líneas élite de triticales primaverales.

FV	GL	FV (t ha ⁻¹)	FS (t ha ⁻¹)	NT	AP (cm)	DMF (días)
Repetición	2	28.36	187.45	1462.21	0.07	120.45
Líneas	19	343.7**	210**	161214.4**	0.085**	208.42**
Error	38	1.51	0.701	97.31	0.00065	1.88
Total	59	56.41	34.08	26589.7	0.014	34.78
CV (%)		3.11	4.44	4.22	2.04	1.55

*, **Significativo con $p \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente; FV: Fuentes de variación; GL: Grados de libertad; FV: forraje verde; FS: forraje seco; NT: número de tallos; AP: altura de planta; DMF: días a madurez fisiológica. CV: Coeficiente de variación.

Las diferencias estadísticas encontradas fueron debido a que la expresión de las líneas en estas variables es atribuible principalmente a los efectos ambientales durante el ciclo biológico del cultivo. Las líneas (L) mostraron mayor contribución en FV (79.498%), NH (95.37%) y días a madurez fisiológica (DMF) (93.93%), esto indica que el potencial productivo de materia seca dentro de las 20 líneas está influenciado por el genotipo de la especie del triticales, mismo que se expresa cuando las condiciones ambientales son favorables (Pomortsev et al., 2019) encontraron que el efecto que contribuyó más a la varianza total fue el correspondiente al materia seca entre variedades de triticales y sus interacciones, variable de interés para los ganaderos.

También, se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) para todas las interacciones y las variables medidas; aunque su efecto fue mayor en FS (0.33%) y floración (9.09%). Esto refleja que los resultados se deben a la constitución genética de las líneas élite de triticales (Castro et al., 2011). Reportaron que los triticales tienen ventajas de adaptabilidad debido a que son más tolerantes a sequía y heladas comparadas con avenas, cebadas y trigos, por ende, su producción de forraje es más estable en condiciones ambientales diferentes.

Tabla 3. Comparación de medias (Tukey) de las 20 líneas élite de triticales primaverales en producción de forraje y variables agronómicas.

Línea	FV (t ha ⁻¹)	FS (t ha ⁻¹)	NT	AP (cm)	DMF (días)
L-1	33.50 kl	13.33 op	144.00 klmn	1.16 ijklm	82.33 kl
L-2	33.16 l	12.33 pq	146.16 klm	1.15 jklm	81.33 klm
L-3	53.66 a	28.33 a	680.66 a	1.60 a	96.33 ab
L-4	48.16 c	26.33 bc	516.50 c	1.42 b	97.33 a
L-5	45.83 cde	24.33 de	190.33 e	1.23 defg	94.33 bcd
L-6	42.83 fg	21.33 gh	178.67 efgh	1.20 fghij	89.33 gh
L-7	35.50 jkl	16.33 lm	159.50 hijkl	1.22 efgh	86.00 ij
L-8	45.00 def	23.33 ef	185.16 ef	1.21 efghi	92.33 def
Bicentenario	51.00 b	27.33 ab	598.66 b	1.43 b	95.33 abc
L-10	44.50 ef	22.33 fg	181.83 efg	1.30 c	91.33 efg
L-11	34.66 kl	14.33 no	150.00 jklm	1.18 ghijkl	85.33 ij
L-12	36.50 jk	17.33 kl	162.50 ghij	1.24 def	87.33 hi
L-13	40.00 hi	19.33 ij	171.50 efgh	1.19 fghijk	90.33 fg
L-14	40.33 gh	20.33 hi	175.33 efgh	1.28 cd	90.00 fgh
L-15	47.50 cd	25.33 cd	308.83 d	1.28 cd	93.33 cde
L-16	34.83 kl	15.33 mn	155.66 jkl	1.17 hijklm	83.33 jk
L-17	37.66 ij	18.33 jk	167.33 fghi	1.27 cde	86.33 i
L-18	27.16 n	9.33 s	124.50 n	1.12 m	78.33 n
L-19	29.83 m	11.33 qr	139.00 lmn	1.13 lm	79.33 mn
L-20	28.83 mn	10.33 rs	133.66 mn	1.14 klm	80.33 lmn
Tukey (0.05)	2.6	1.77	20.89	0.054	2.9

FV: forraje verde; FS: forraje seco; NT: número de tallos; AP: altura de la planta; DMF: días a madurez fisiológica.

El promedio de las líneas en la comparación de medias, mostraron que las líneas L-3, L-9, y L-4 mostraron mejor comportamiento en rendimiento de forraje verde, forraje seco, número de tallos y número de hojas (Tabla 3), debido a que el potencial de forraje dependió de la constitución genética cada línea, así mismo denotó que los resultados no concuerdan por los reportados de Soleymani y Shahrajabian (2012) y por Rosser (2013), quienes evaluaron producción de biomasa y sus componentes en triticales, reportaron rendimientos inferiores a esta investigación en forraje seco y número de tallos.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por (Pomortsev et al., 2019; Giunta et al., 2017), atribuyeron que una buena producción de biomasa en cereales y sus componentes son fuertemente afectadas por factores genéticos, ambientales (Aisawi et al., 2015). Los resultados

obtenidos mostraron que, dentro de la variación total de los valores de estas variables fueron debido a la interacción GxA estuvieron presentes, poniendo de manifiesto la dificultad de lograr un rendimiento estable y poder predecir el comportamiento de las 20 líneas al ser evaluadas en dos años (Castro et al., 2011).

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron diferencias estadísticas entre las líneas para todas las variables evaluadas, las líneas L-3 y el testigo Bicentenario fueron los que más produjeron forraje verde y seco y fueron de ciclo intermedio, las de mayor altura de planta fueron L-3, L-4 y L-9, las que fueron más tardías fueron L-3, L-4 y las más precoces L-2 y L-20 pero rindieron menos, con esta información puede ser una alternativa explorar con más experimentos para confirmar dichos resultados y verlo desde un punto de vista de adopción de este cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abeledo LG et al. (2003). Genetic improvement of yield responsiveness to nitrogen fertilization and its physiological determinants in barley. *Euphytica*. 133(3):291-298.
- Aisawi KAB et al. (2015). The physiological basis of the genetic progress in yield potential of CIMMYT spring wheat cultivars from 1966 to 2009. *Crop Science* 55 (4): 1749–1764. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.09.0601>
- Castro N et al. (2011). Evaluación del rendimiento de forraje y grano de triticales y tricepiros. *Rev. Investig. Agrop.* 37(3):281-289.
- Giunta F, Motzo R, Viridis A, Cabiglieri A. 2017. The effects of forage removal on biomass and grain yield of intermediate and spring triticales. *Field Crops Research* 200: 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.002>.
- Pomortsev AV et al (2019). The effect of planting date on Winter rye and triticales overwinter survival and yield in Eastern Siberia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 315 042031. AGRITECH. 5 pp.
- Rodríguez PG et al. (2023). Biomass production in spring habit triticales (X *Triticosecale* Wittmack) elite lines. *Agrociencia*. doi.org/ 10.47163/agrociencia.v57i6.2570.
- Rosser CL et al (2013). Effect of maturity at harvest on yield, chemical composition, and in situ degradability for annual cereals used for swath grazing. *Journal of Animal Science* 91 (8): 3815–3826. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5677>.
- Soleymani A and Shahrajabian MH. (2012). Changes in seed yield and yield components of elite barley cultivars under different plant populations and sowing dates. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 10 (1): 596–598.

Caracterización ambiental multi-hábitat de islas artificiales, para la gestión de sitios de anidación de aves acuáticas en Bahía del Tóbari, Sonora, México

Recibida em: 31/03/2025

Aprobado em: 19/04/2025

 10.46420/9786585756563cap16

Jony R. Torres* 

Julio C. Hurtado-Zazueta 

Germán Leyva-García 

Claudia Janeth Olivas-Castillo 

Ofelda Peñuelas-Rubio 

Leandris Argente-Martínez 

Francisco Cadena-Cadena 

INTRODUCCIÓN

Las islas artificiales de zona costera se forman a partir de dragados en el sistema lagunar, estos dragados consisten en la extracción de materiales como lo pueden ser el fango, arena, grava del fondo de los puertos, ríos y canales, con el fin de aumentar la profundidad. Estos azolves se descargan en las zonas de depósito, que pueden ser el mar, o utilizarlos en el relleno de áreas bajas, para asiento de instalaciones industriales y urbanización o simplemente para sanear terrenos pantanosos (Martínez, 2008). Las aves son organismos indicadores de la riqueza biológica y de las condiciones ambientales del planeta, además, se tiene conocimiento de un gran número de especies presentes en diversos hábitats, de sus características ecológicas y patrones de crecimiento poblacional, debido a eso se ha logrado comprender su importancia y el valor ecosistémico y social (Ceballos-Lascuráin et al., 2000).

La acelerada alteración y pérdida de hábitats para la fauna en México (Mas et al., 2004), han ocasionado que muchas especies de aves se encuentran en peligro de extinción (Arizmendi et al., 2005). En específico las aves marinas y playeras son importantes debido a que juegan un papel fundamental en las funciones ecológicas de las islas y los ecosistemas costeros, son excelentes indicadores de cambios de largo plazo y de gran escala (ICES, 2003; Velarde et al., 2019; Sydeman et al., 2021). Estas aves son las más amenazadas en el mundo a raíz de la actividad pesquera, la depredación y la pérdida de su hábitat. La mayor parte de las aves marinas son coloniales, y la disponibilidad de sitios de anidación óptimos puede ser una limitante para la reproducción (Bouliner; Lemel, 1996).

La zona costera Bahía de Tóbari, Sonora, México (Figura 1), representa un importante sitio de corredor biológico, de acuerdo a la justificación de la CONABIO, esta área es considerada como Área de importancia para la Conservación de Aves, número 129 (AICA, 1999), se presentan áreas de manglar,

* Autor correspondiente: jtorres.velazquez@itvy.edu.mx

bajos de arena, planicies fangosas, pastos marinos y algas que representan ambientes adecuados para el refugio, reposo, reproducción y etapas de crianza de diversas especies, es por eso que se considera como un sitio de invernación importante para aves playeras (Sagarpa, 2008). Además, desde 2014, es parte de la Red Hemisférica de Reservas para las Aves Playeras como de importancia Internacional (WHSRN, 2014).

Las principales causas de pérdida de hábitats son a través del desarrollo de zonas costeras y perturbación de humedales, la depredación por organismos introducidos, cambios y desplazamientos de los sitios de anidación, variabilidad en la obtención y accesibilidad de alimentos, y los disturbios naturales y antropogénicos (Parnell et al., 1988; Burger; Gochfeld, 1994; Gochfeld; Burger, 1996; Becker; Sudmann, 1998; VanderWerf; Downs, 2018).

En Bahía del Tóbari, Sonora, México, entre 2010-2012, se realizaron obras de dragado para retirar un pedraplén de 4 km y sedimentos acumulados para rehabilitar la circulación hidrodinámica y la comunicación con el mar, así, e incrementar y mantener producción pesquera. Los sedimentos del material de producto de dragado obtenidos se ubicaron en zonas de tiro al interior de la misma bahía, en donde se formaron las islas artificiales (tarquinas) que actualmente cuenta con diversas especies de vegetación y hábitats importantes para la reproducción de hasta 11 especies de aves (Leyva-García et al., 2023) y varias especies migratorias (Carmona et al. 2022). Conocer las características del hábitat que requieren las poblaciones de aves acuáticas es un desafío para la investigación y la gestión racional de estos nuevos ecosistemas y sus poblaciones (Scarton et al. 2013). En este trabajo se caracterizan ambientalmente las islas artificiales (Tarquinas) en Bahía del Tóbari, Sonora, con enfoque multihábitat.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Bahía de Tóbari está situada entre los 26° 54' y 27° 10' de latitud norte y los 109° 50' y 110° 24' de longitud oeste, en la costa del Golfo de California, en el noroeste de México, ubicada en el Municipio de Benito Juárez, Sonora (CONAPESCA, 2008). Este ecosistema es un complejo lagunar que comprende 15 ensenadas y pequeños esteros, y en su porción central se encuentra una isla de barrera arenosa conocida como Huivulai (Hernández, 2021) (Figura 1).

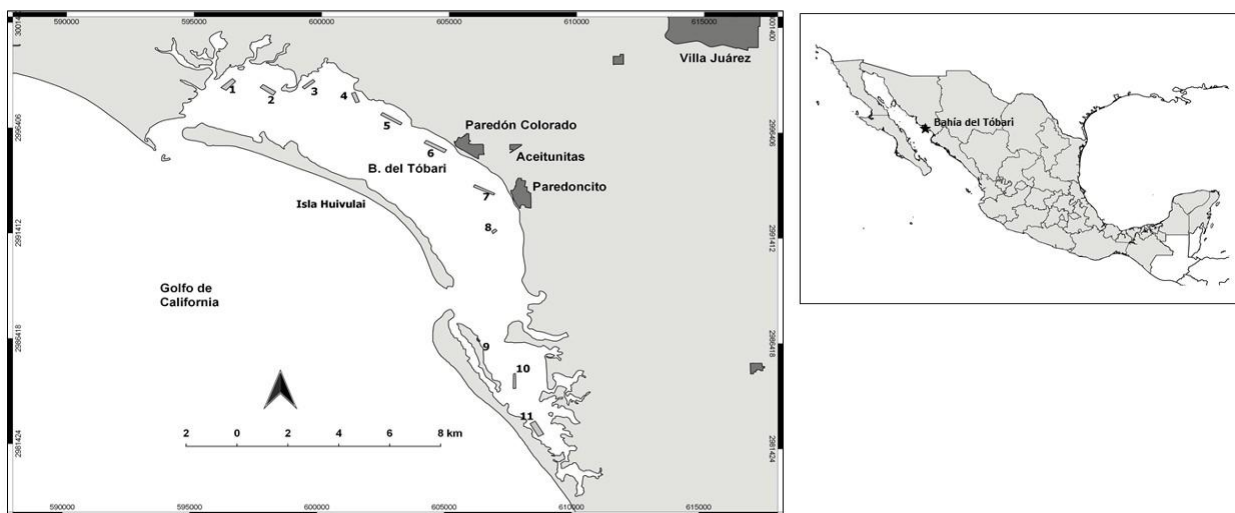


Figura 1. Sitios de estudio, ubicación de las islas artificiales (Tarquinas)

El sistema en su totalidad cubre una superficie de 56,287.15 ha, la parte establecida como humedal mide 16,700 ha, de las cuales 8,200 ha pertenecen a la superficie ocupada por los cuerpos de agua y se categorizan como humedales estuarinos submareales de sustrato no consolidado. Presenta una longitud de 14 km, con una amplitud de 300 m en su parte más estrecha. En sus partes extremas se forman dos bocas de comunicación que permiten el flujo de agua (Figura 1). La boca norte presenta una apertura de 400 m y una profundidad de 4 m, por otra parte, la boca sur presenta una apertura de 800 m y una profundidad de 8 m. El sistema está formado por una laguna principal, rodeada por 15 esteros, cuatro isletas y la isla de barrera arenosa Huivulai, que forma parte del Área Natural Protegida Islas del Golfo de California (Hernández, 2021).

Diseño de monitoreo para la caracterización de las islas artificiales

Se realizaron dos visitas de monitoreo en el mes de abril del 2023 en las 11 islas artificiales (Figura 1), donde se realizaron los perfiles microtopográficos, identificación y análisis multihábitat, físico química del sedimento y agua adyacente a la isla artificial. No se estudió la Tarquina 8, debido a que se ha degradado hasta bajo arenoso por la influencia de agua intermareal.

Perfiles microtopográficos

Se realizó la medición de cada una de las islas artificiales con la técnica de microtopografía, método adaptado de una herramienta de trabajo que se denomina manguera de nivel (Moreno-Casasola y Warner, 2009). Se utilizaron transectos vertical y perpendicular a la línea de costa, las mediciones se tomaron en horario diurno (por la mañana). Además, se identificaron, por observación, cuatro tipos de micro-hábitat presentes en las tarquinas: (1) *Batis marítima*, (2) marismas, (3) manglar y (4) sustratos arenosos sin vegetación con restos de moluscos. En estos hábitats se colectaron sedimentos para las

determinaciones de fisicoquímica del sedimento, además, parámetros fisicoquímicos del agua intermareal adyacente a la isla artificial.

Físico-químicos en sedimento

Se colectaron cuatro muestras de sedimento en cada hábitat identificado en las islas artificiales, en los primeros 20 cm de suelo (160 muestras), por medio de un nucleador (0.0033 m^2) para determinar textura de acuerdo al método de Bouyucos (Klute, 1986), el pH por electrometría en proporciones 1:2 con agua y el contenido de materia orgánica por ignición de acuerdo a Heiri et al. (2001). Además, se colectaron dos muestras de sedimento con volumen conocido (80 muestras) para determinar la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo de acuerdo con Moreno-Casasola y Warner (2009), el contenido de humedad del suelo es el porcentaje de agua que es capaz de almacenar un gramo de suelo, si el valor fuera del 100% significaría que 1 g de suelo almacena 1 g de agua.

Físico-químicos en agua superficial

Las muestras de agua superficial (80 muestras) se obtuvieron de la columna del agua (primeros 20 cm) en zona intermareal con influencia en las zonas adyacentes de las islas artificiales, donde se registró la salinidad (UPS), potencial redox (mV), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), conductividad (mS/cm) y Sólidos totales disueltos (mg/L) con un medidor multiparamétrico Hanna HI9828.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los grupos de datos fueron analizados por medio del test de normalidad Kolmogorov-Smirnov y homogeneidad de varianzas de Levene. Para identificar diferencias significativas con un nivel de significancia al 5%, se desarrolló un ANDEVA de una vía de Tukey (Steel; Torrie, 1996). Se utilizó el software IBM SPSS Statistics 20 para el procesamiento de datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Microtopografía de los sitios

En los perfiles microtopográficos en los 11 sitios se registraron diversos hábitats y vegetación; Saladilla (*Batis marítima*), Salicornia (*Salicornia sp.*), Mangle negro (*Avicennia germinans*), Mangle rojo (*Rhizophora mangle*), además se registró el hábitat de marismas interiores, y la zona de uso cotidiano para la anidación de varias especies de aves marinas y playeras, identificado por contener gran cantidad de sustrato arenoso y conchas de moluscos.

Tarquina 1: El perfil microtopográfico se midió a 470 metros. En este sitio se observó el predominio de vegetación halófitas (*Batis marítima*, *Salicornia sp.*, y *Avicennia germinans*), ubicado mayormente en sustrato arenoso cubierto por conchas de bivalvos y gasterópodos ubicado desde los 5

m hasta los 200 m. con dominancia de sustrato arenoso cubierto por conchas. La altura mayor fue por parte de la vegetación iniciando desde los 10 m hasta los 110 m (Figura 2).

Tarquina 2: El perfil microtopográfico se midió a 165 metros. Se observó el predominio del suelo de sustrato arenoso, cubierto gran parte por conchas de bivalvos ubicado desde los 5 m hasta los 165 m. El perfil microtopográfico fue de un ancho máximo de 180 metros. Se observó mayormente zona de inundación y fango, desde los 5 m hasta los 12 m, la cual fue la parte con menor altitud. En esta tarquina se determinó la presencia de Pino salado (*Tamarix ramosissima*) ubicado en los 135 m. Además, se logró observar presencia de Gaviotas reidoras (*Leucophaeus atricilla*) en los 145 m, la parte con mayor altura (Figura 3).

Tarquina 3: El perfil microtopográfico se midió a 450 m. En este sitio se registró la presencia de Pino salado (*Tamarix ramosissima*), ubicado en los 330 m. El perfil microtopográfico indico ancho de 60 m, con predominio de sustrato arenoso, muy poca vegetación y conchas de bivalvos. Además, en los 10 m se registró la presencia de manglar rojo (*Rhizophora mangle*) (Figura 4).

Tarquina 4: El perfil microtopográfico se midió a 450 m, se observó un poco de manglar rojo (*Rhizophora mangle*), también se registraron dunas de arena. La zona que presentó una mayor altitud fue en los 370 m en donde se estableció diversa vegetación herbácea, conchas de bivalvos y se registraron residuos sólidos. El perfil microtopográfico indicó ancho total de 120 m. La zona con mayor cobertura fue por marisma interior seca, con presencia de residuos sólidos en los 60 m (Figura 5).

Tarquina 5: El perfil microtopográfico se midió a 470 m. Se observó en mayor parte sustrato arenoso con vegetación de (*Batis maritima*) y (*Salicornia sp.*) y poco manglar rojo (*Rhizophora mangle*). Se registró presencia de Gaviotas (*Leucophaeus atricilla*), Ostrero americano (*Haematopus palliatus*), y Rayador americano (*Rynchops niger*) en los 455 m. En ese sitio también se observó contaminación por basura de plásticos (Figura 6).

Tarquina 6: El perfil microtopográfico registró un largo de 730 m. Se registraron Gaviotas reidoras (*Leucophaeus atricilla*), en donde además había presencia de vegetación de Salidilla (*Batis maritima*), Salicornia (*Salicornia sp.*) y dunas de arena. La zona con mayor altitud se registró en la parte del sustrato arenoso y vegetación de Saladilla (*Batis maritima*) en los 80 m, mientras que la zona con menor altura fue en los 120 m en la zona de inundación y fango (Figura 7).

Tarquina 7: El perfil microtopográfico se midió a 605 m. En este sitio se registró inicialmente la zona fangosa por inundación en los primeros 50 m. Asimismo en el sitio se registraron dunas en los 70 m, las cuales alcanzaron la mayor altura. Además, se registraron diversa vegetación, predominantemente de Saladilla (*Batis maritima*) y Salicornia (*Salicornia sp.*) también se registró la presencia de manglar rojo (*Rhizophora mangle*) en los 400 m (Figura 8).

Tarquina 9: El perfil microtopográfico se midió a 200 m. En este sitio se registró inicialmente la zona fangosa por inundación en los primeros 10 m. Asimismo, desde los 20 m se registró manglar rojo (*Rhizophora mangle*), Saladilla (*Batis maritima*) y conchas en sustrato de fango, lo que represento su

predominancia en el sitio. Además, en este sitio se registraron dunas a partir de los 150 m, las cuales alcanzaron la mayor altura. En este se observaron residuos sólidos, en este caso de botellas de plástico (Figura 9).

Tarquina 10: El perfil microtopográfico se midió a 690 m. El predominio en el sitio se representó por sustrato arenoso y conchas, además de vegetación de manglar rojo (*Rhizophora mangle*), Saladilla (*Batis maritima*) y Salicornia (*Salicornia sp.*). En este sitio se observó la presencia de un Playero diminuto (*Calidris minutilla*) en la zona de manglar en los 360 m (Figura 10).

Tarquina 11: El perfil microtopográfico indico una latitud máxima de 780 m. En este sitio se registró inicialmente en los 30 m la zona de inundación y fango con presencia de vegetación de manglar rojo (*Rhizophora mangle*), Saladilla (*Batis maritima*) y Salicornia (*Salicornia sp.*). A partir de los 35 m hasta los 100 m se registraron las primeras dunas, vegetación y conchas. Asimismo, 15 m después, se registró el sustrato arenoso de conchas. En los 200 y 300 m se registró la zona de inundación y fango. Además, en los 400 m nuevamente se registraron dunas de menor tamaño. A partir de los 500 m se registró en gran medida el sustrato arenoso y vegetación de Saladilla (*Batis maritima*) y Salicornia (*Salicornia sp.*) (Figura 11).

Los factores como la pendiente y vegetación fueron aspectos importantes para la selección del sitio por parte de las diferentes especies de aves. Asimismo, en los sitios se observó vegetación baja dispersa, lo cual concuerda con lo encontrado sobre sitios predilectos para la anidación de charrán mínimo (Kotliar y Burger, 1986).

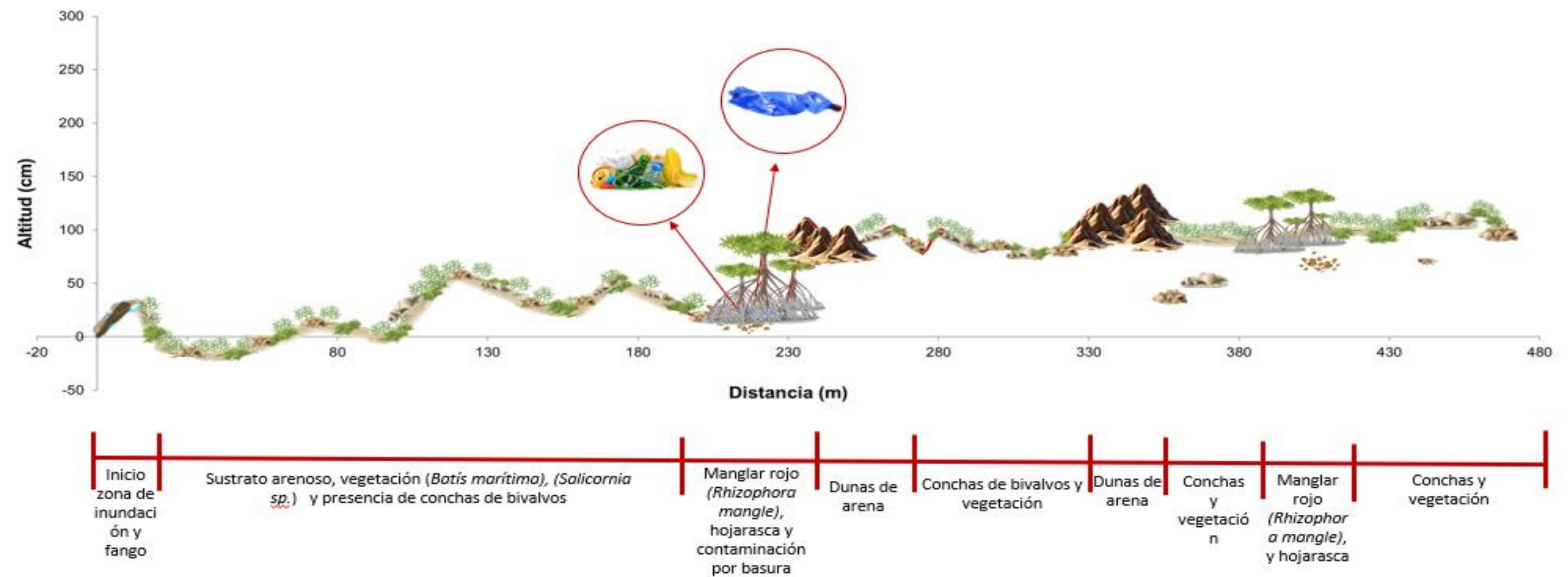


Figura 2 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 1.

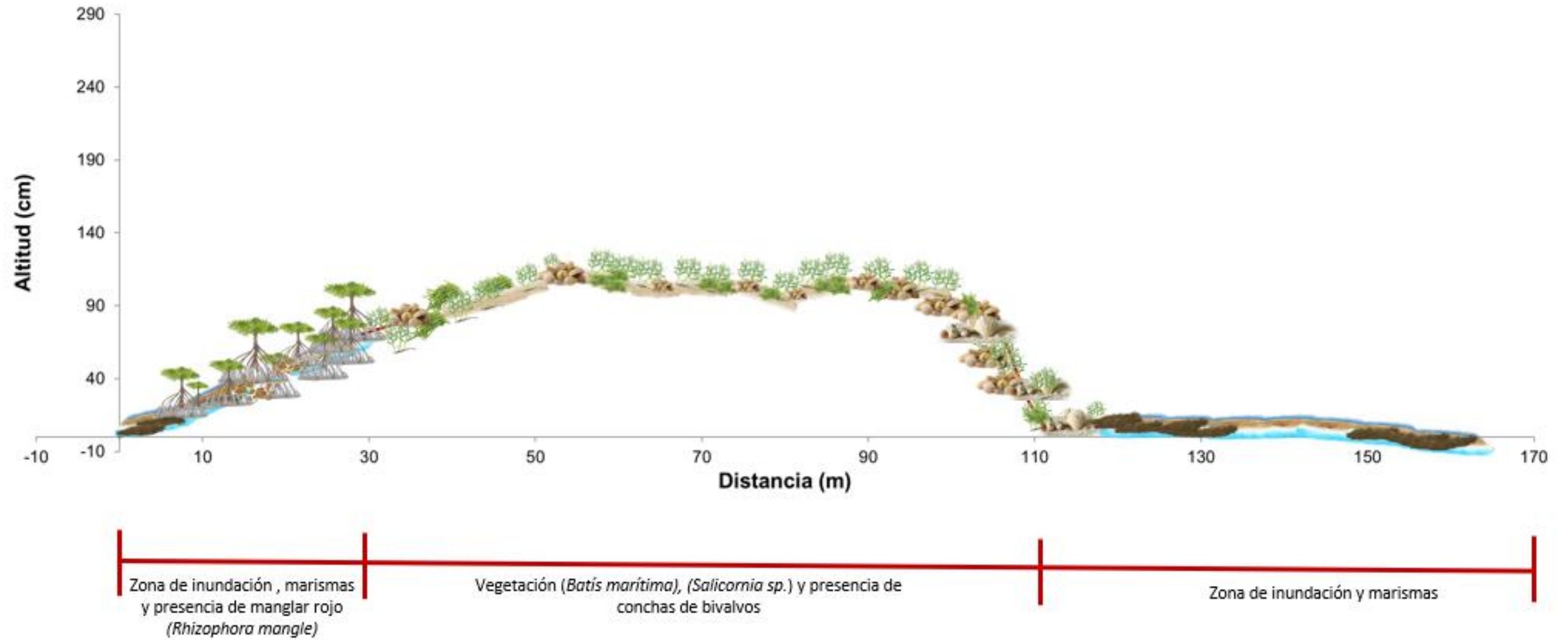


Figura 2 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 1.

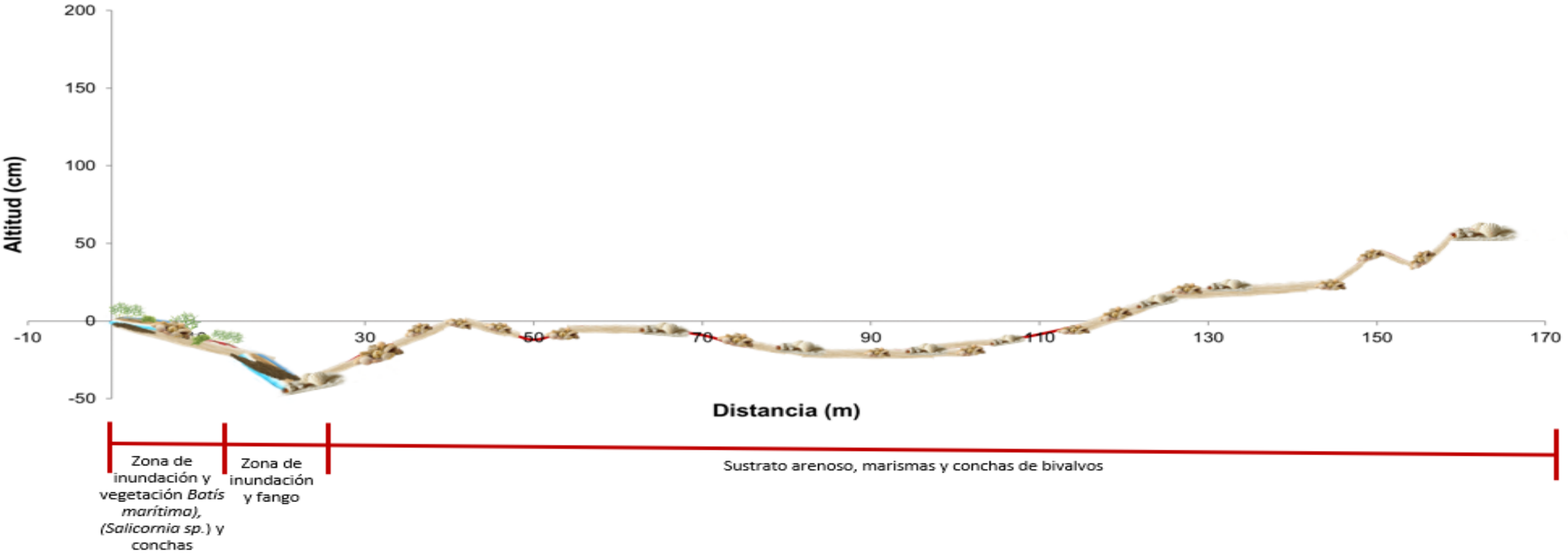


Figura 3 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 2.

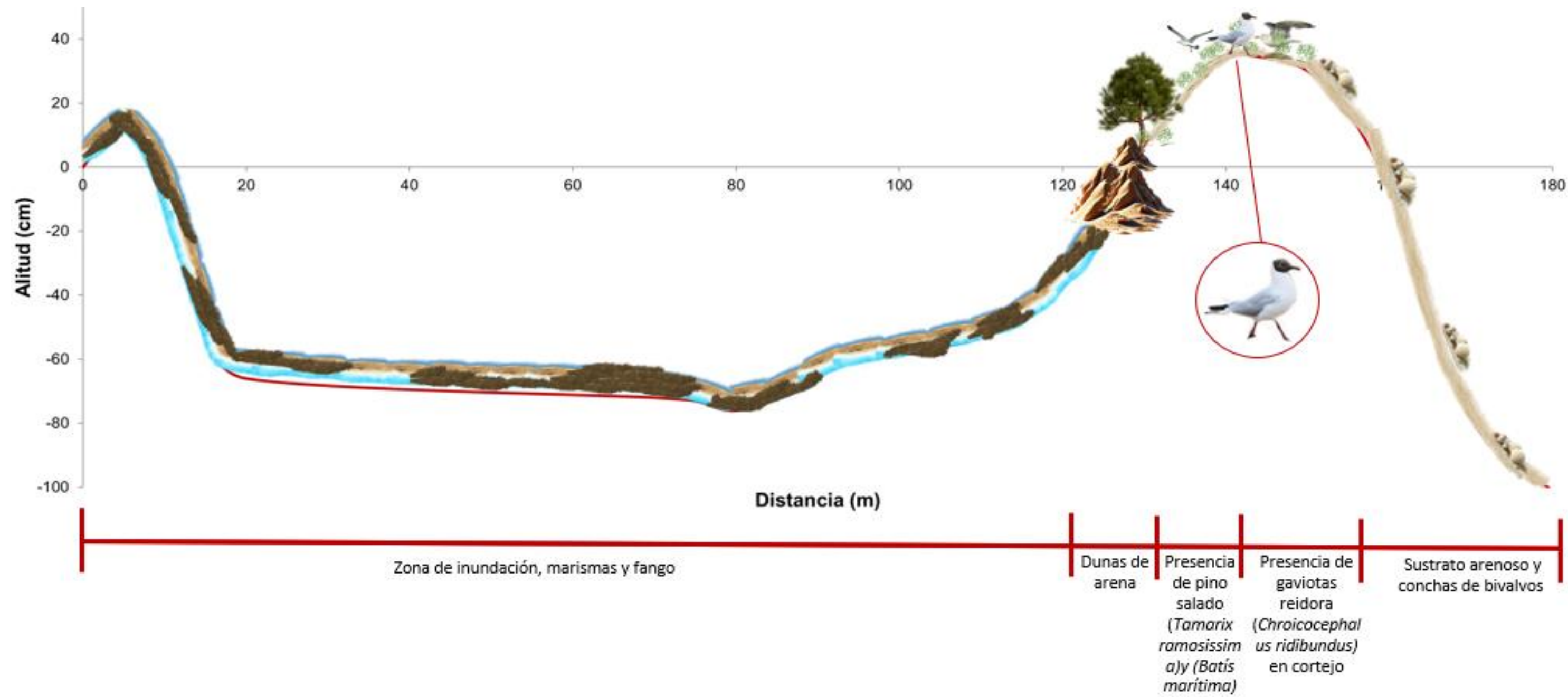


Figura 3 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 2.

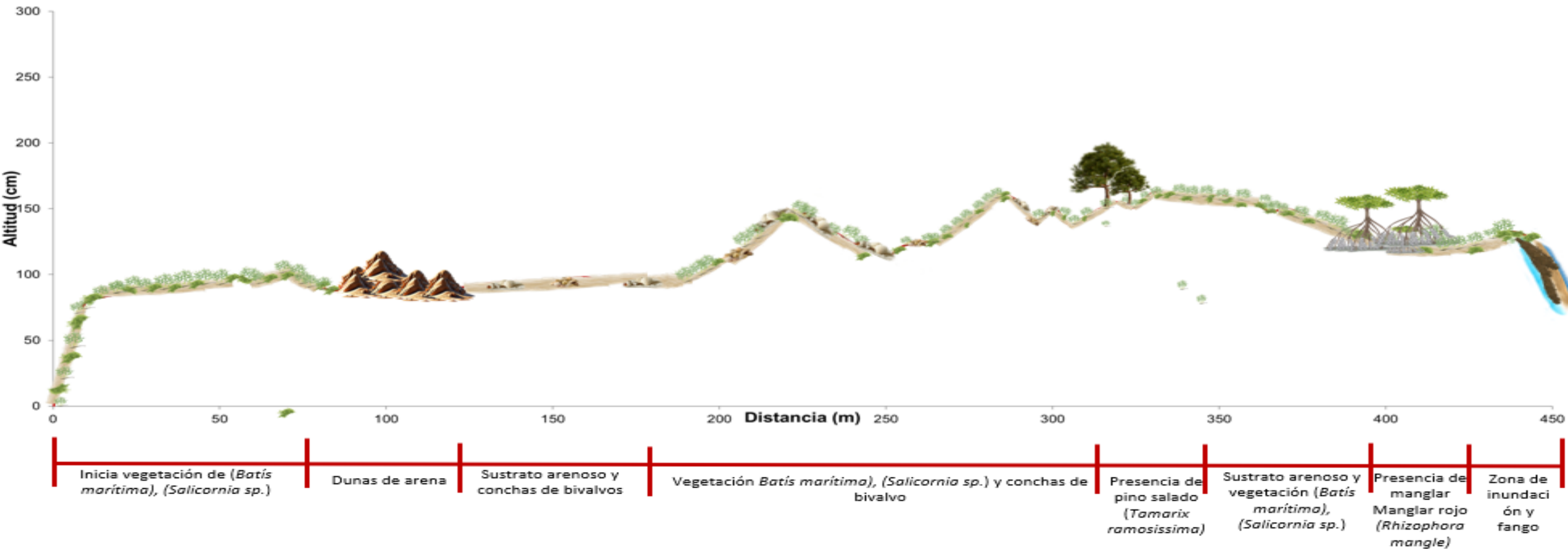


Figura 4 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 3.

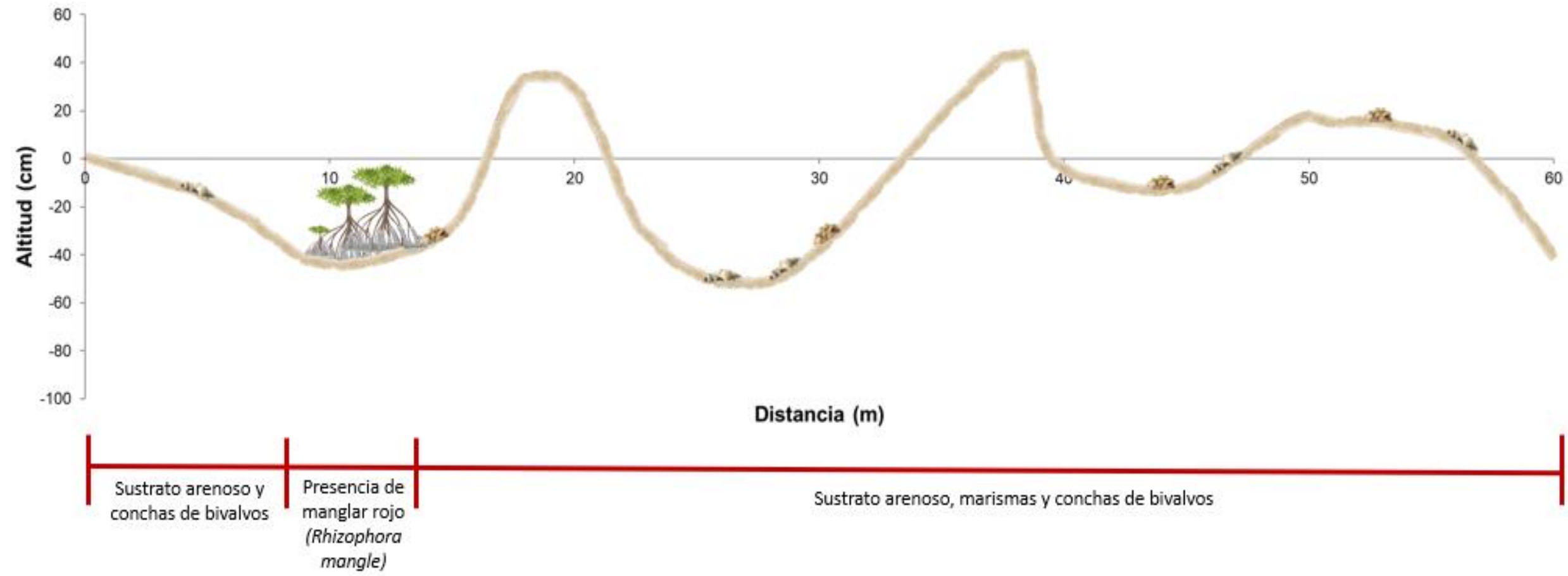


Figura 4 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 3.



Figura 5 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 4.

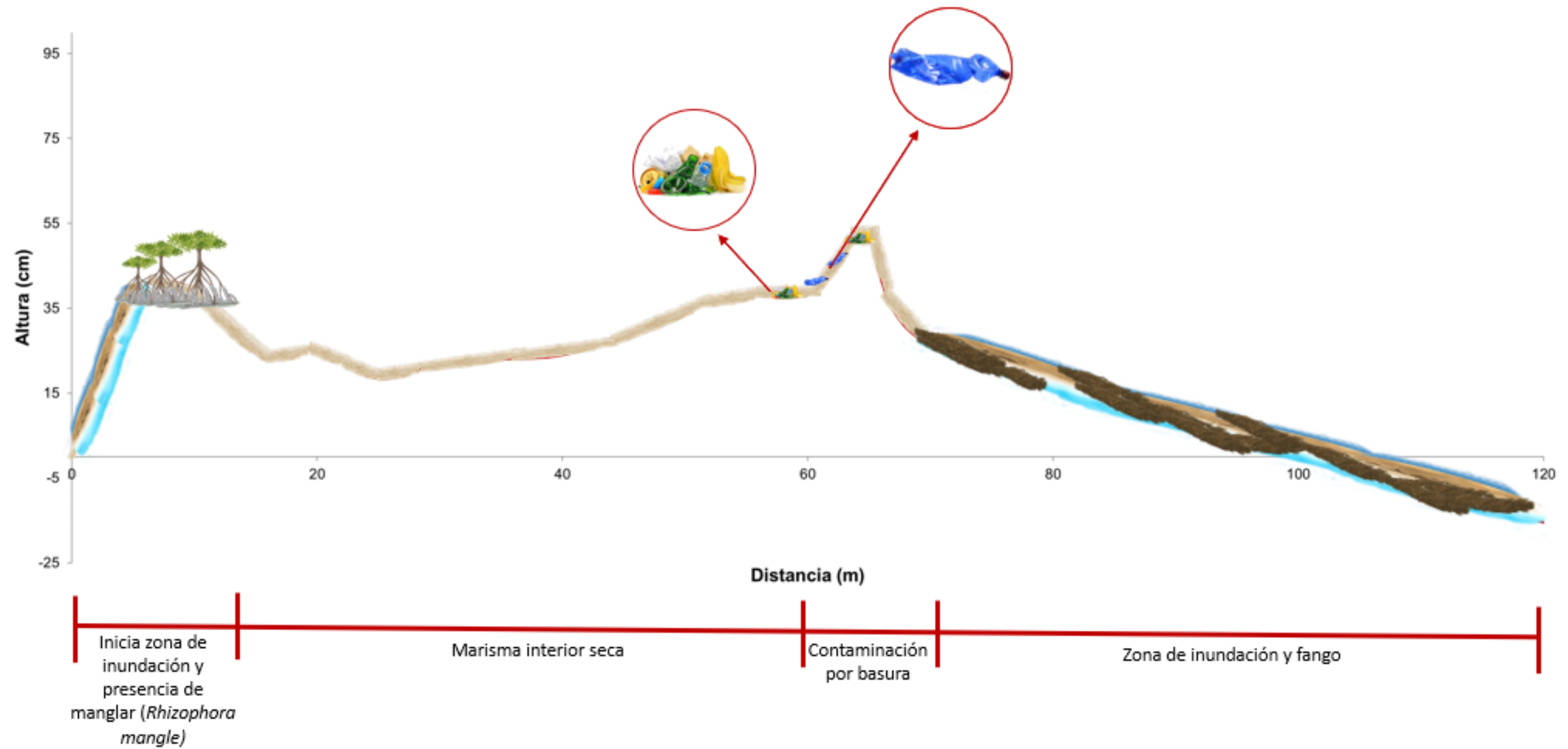


Figura 5 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 4.

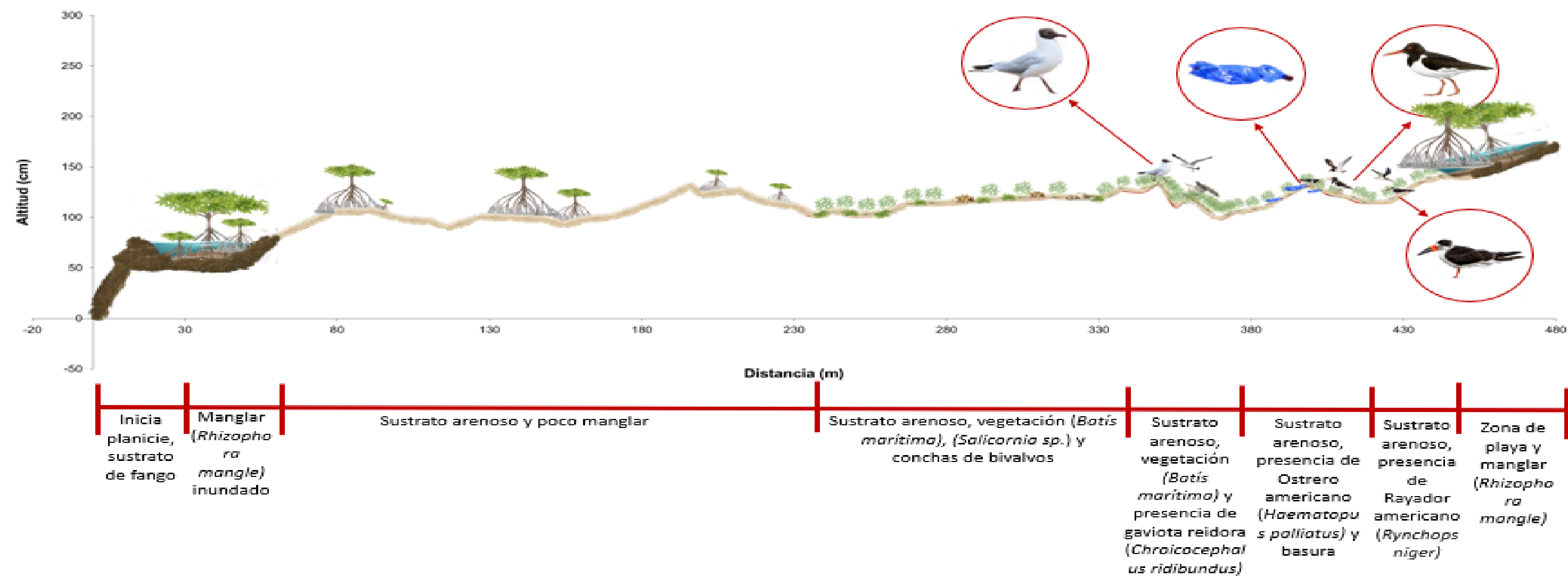


Figura 6 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 5.

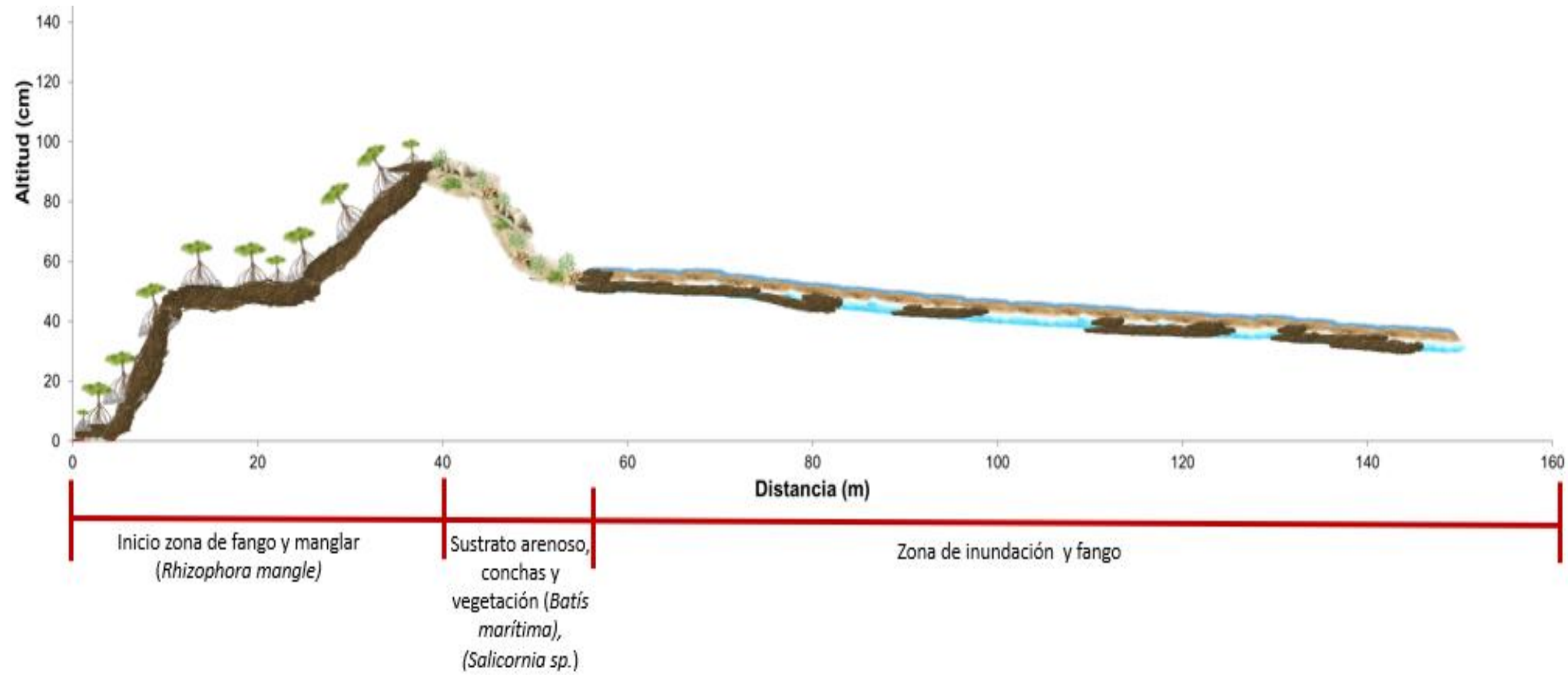


Figura 6 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 5.

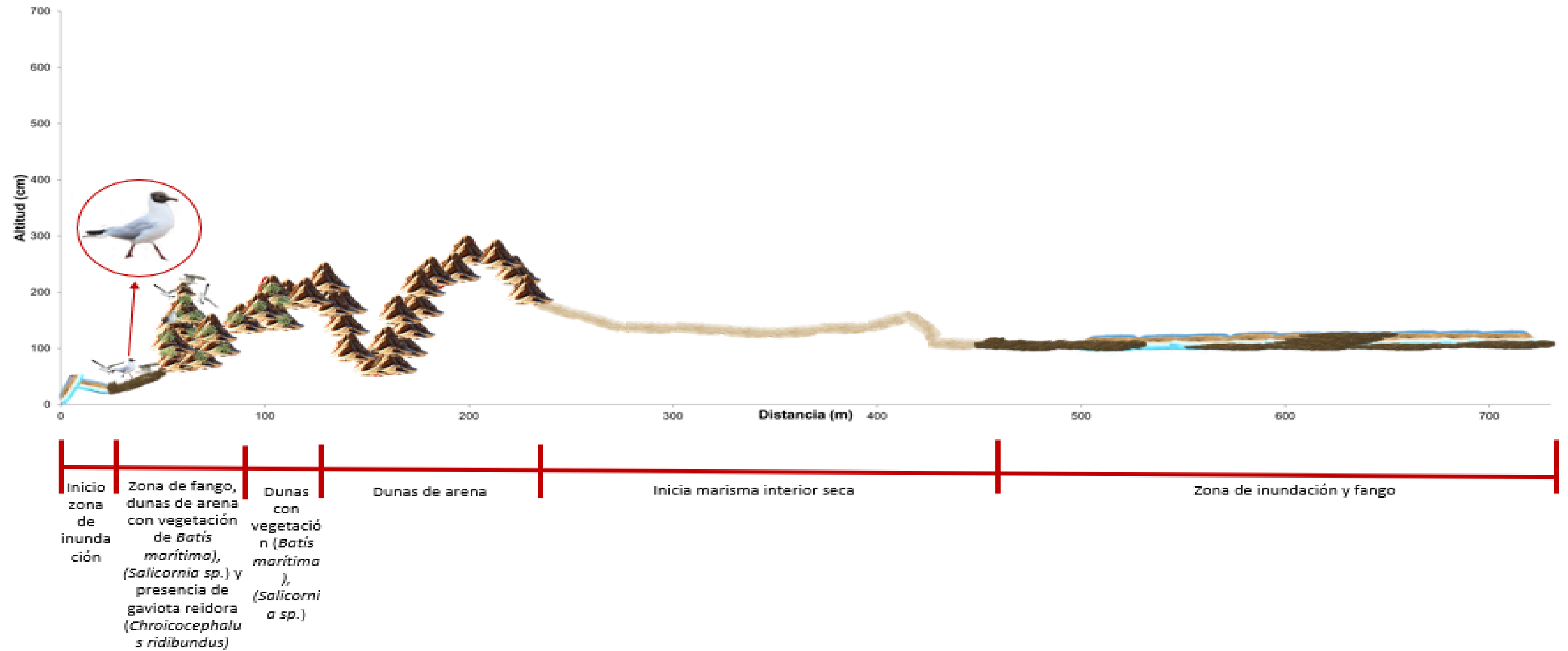


Figura 7 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 6.

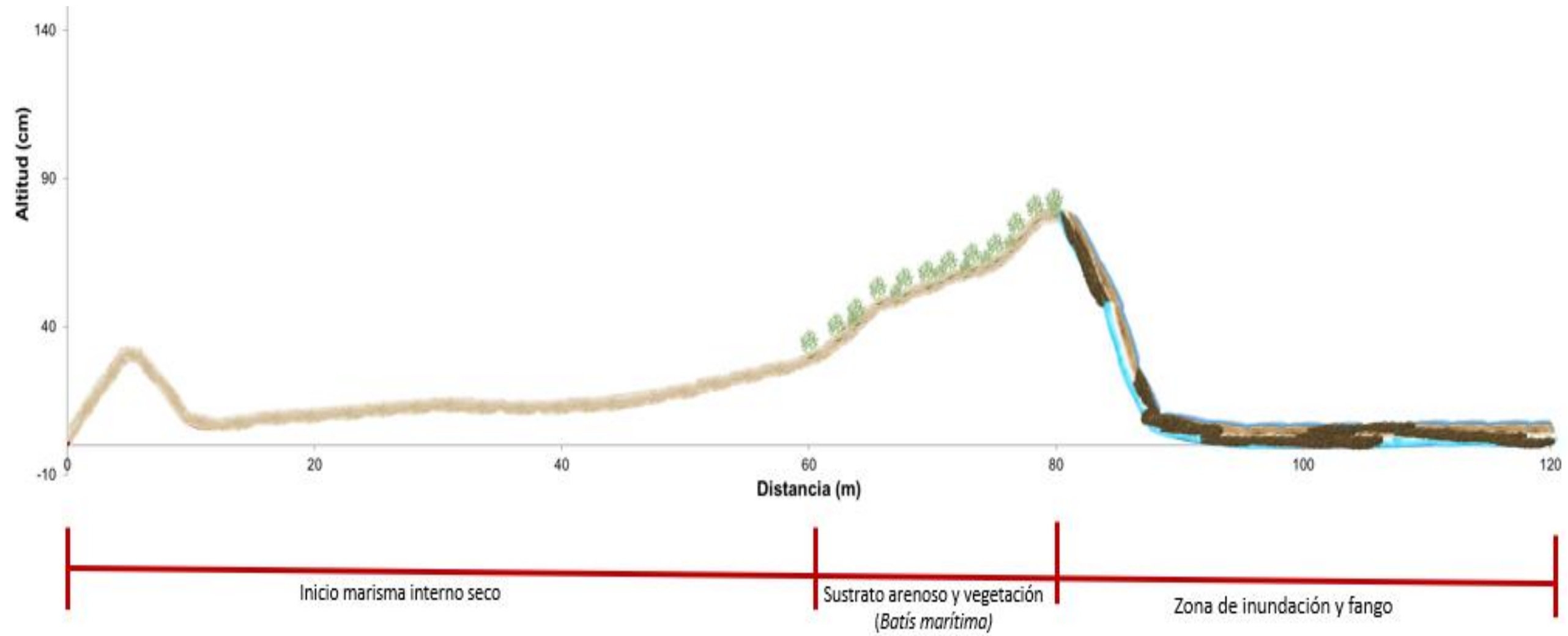


Figura 7 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 6.

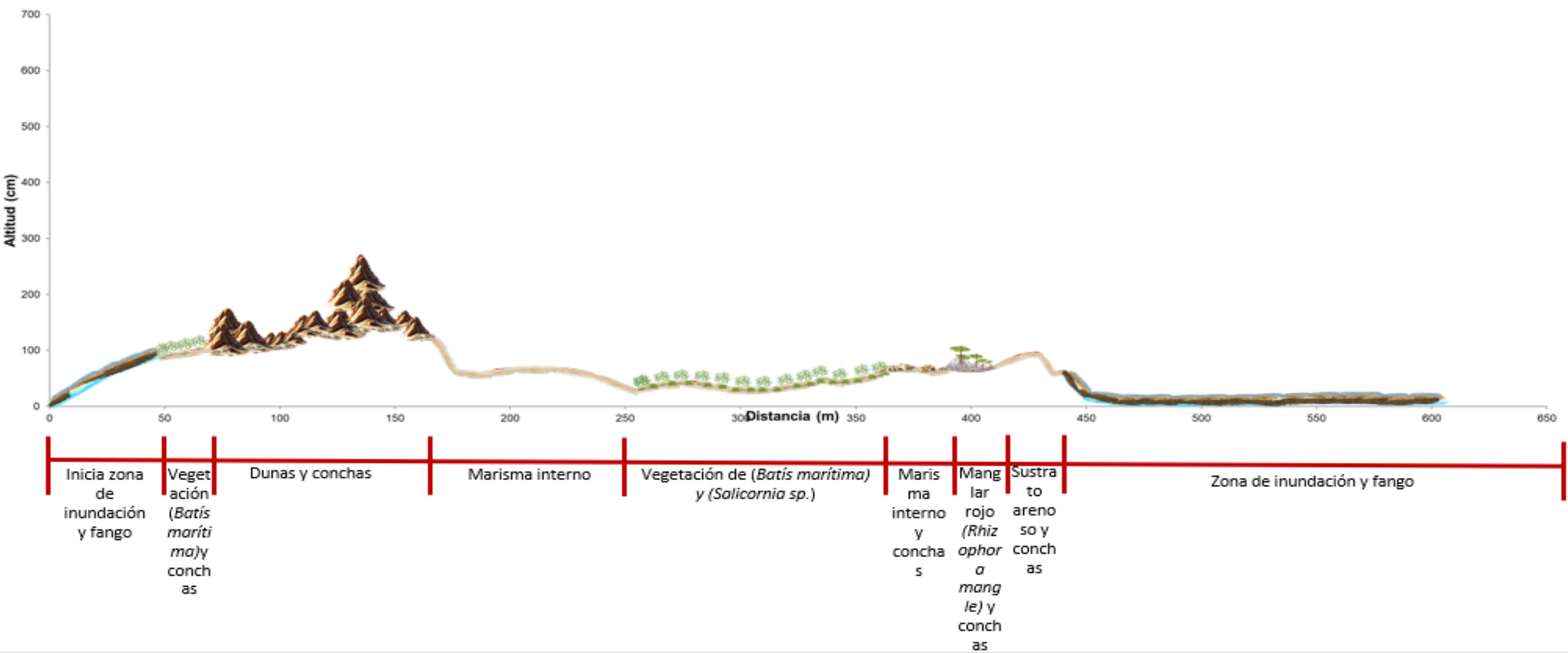


Figura 8 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 7.

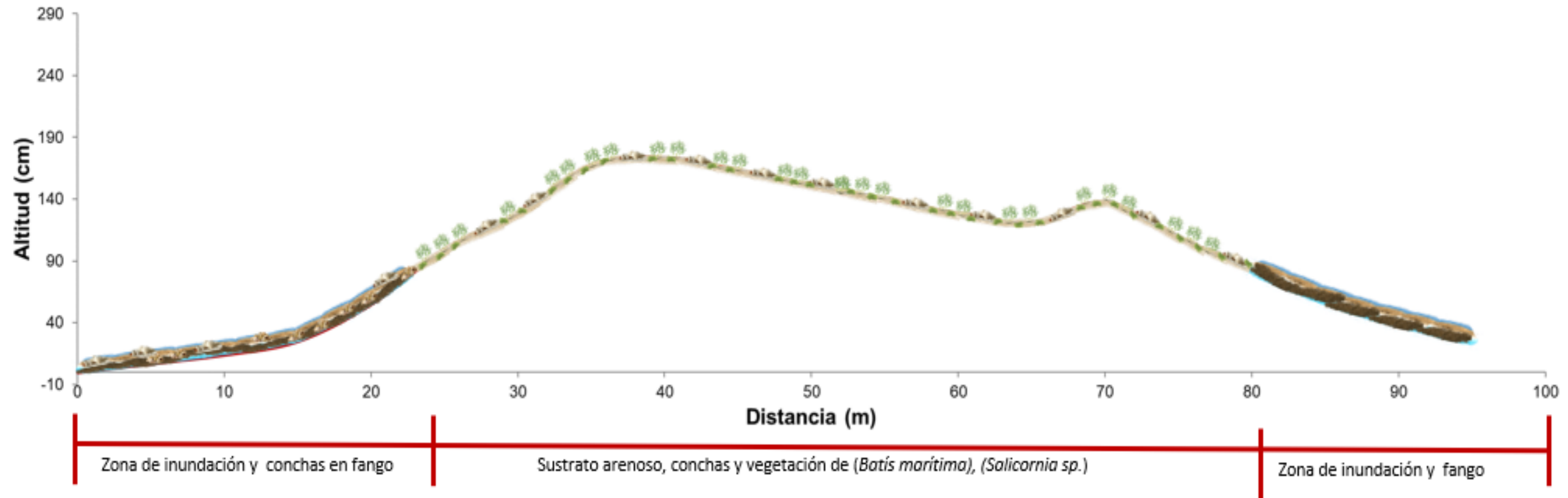


Figura 8 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 7.

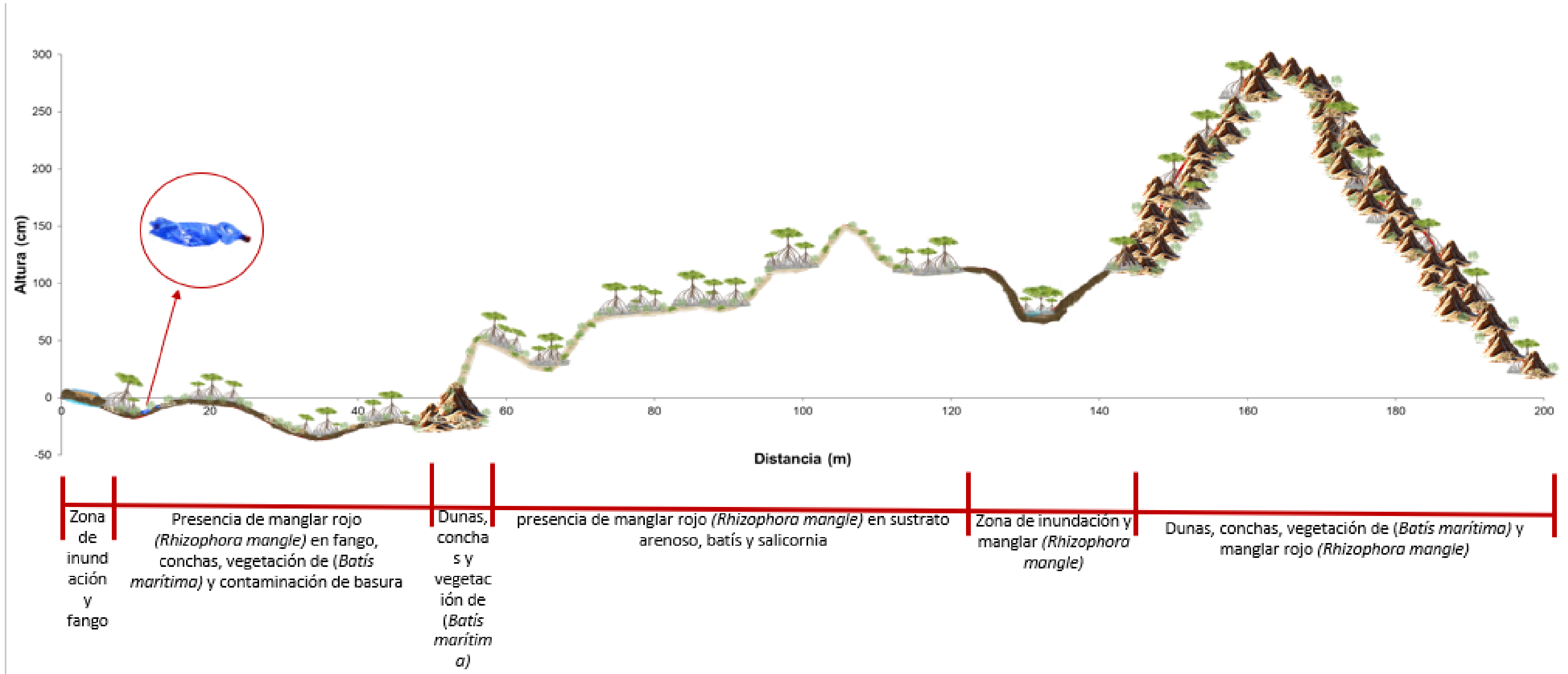


Figura 9 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquina) número 9.

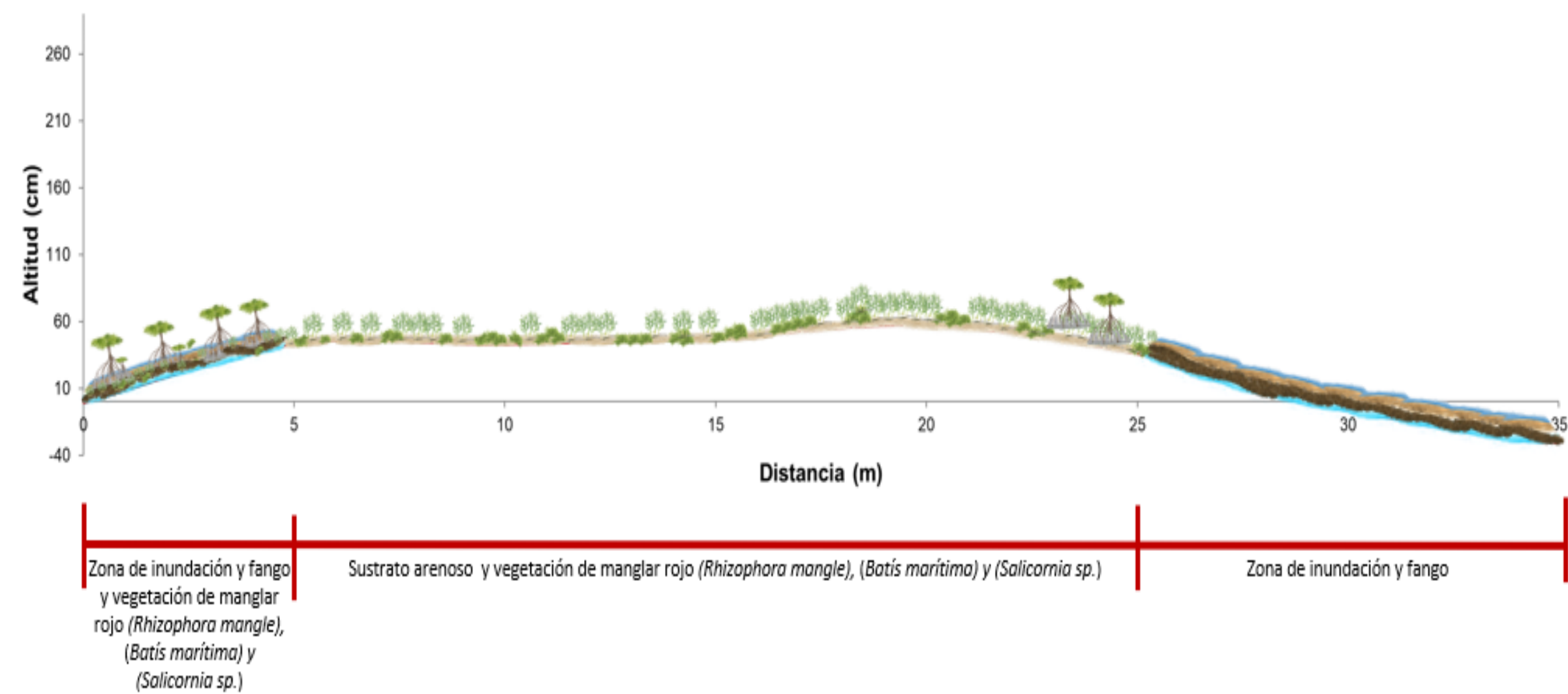


Figura 9 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 9.

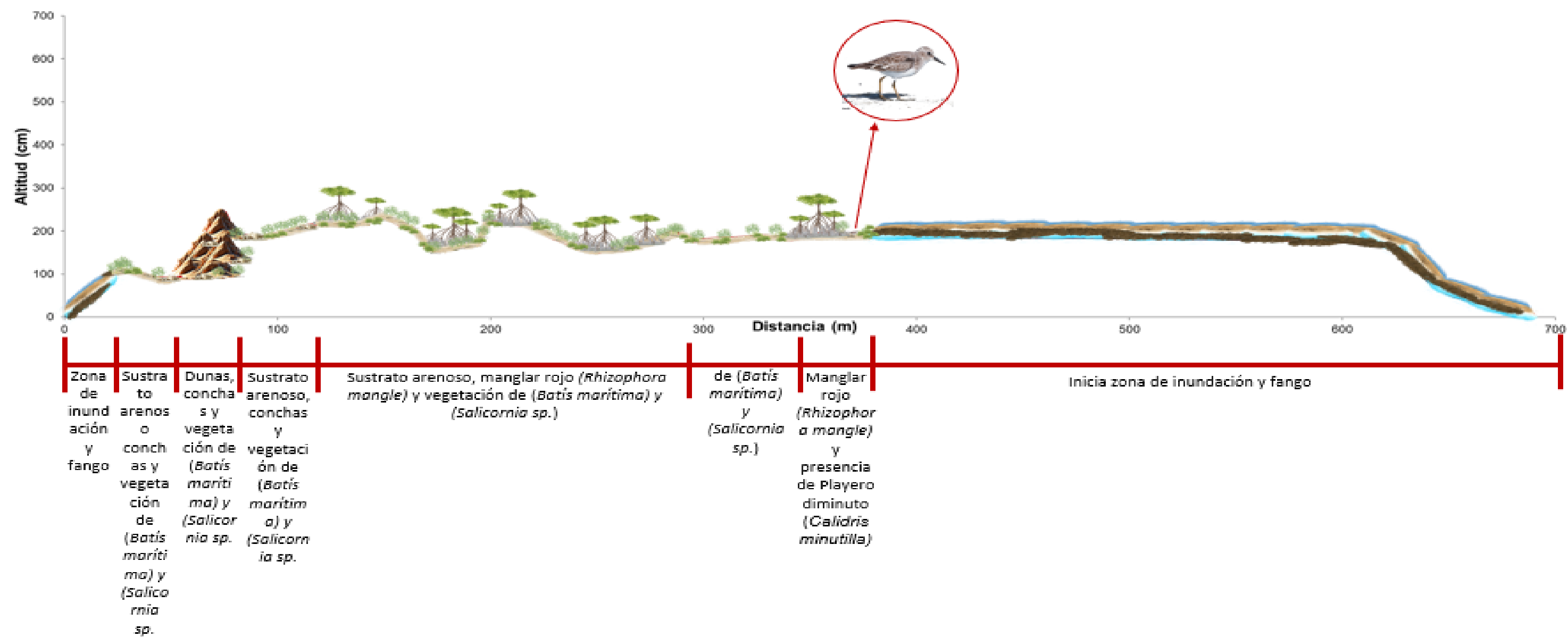


Figura 10 A. Perfil microtopográfico horizontal Isla artificial (Tarquín) número 10.

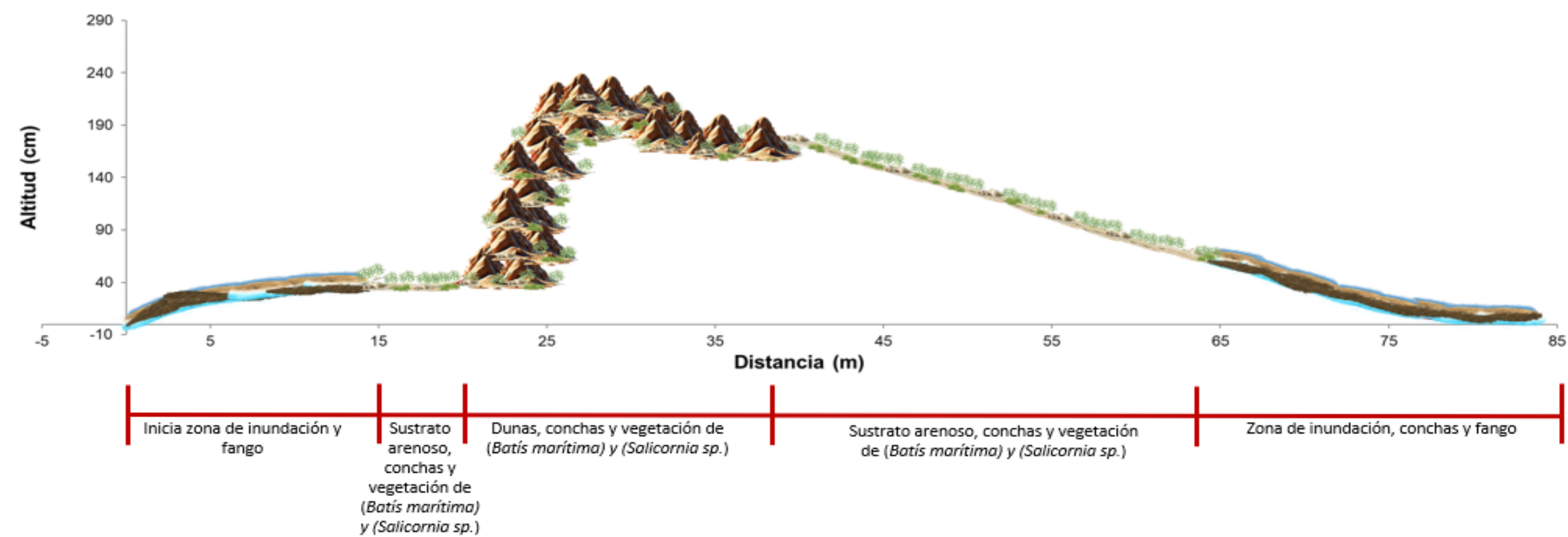


Figura 10 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 10.

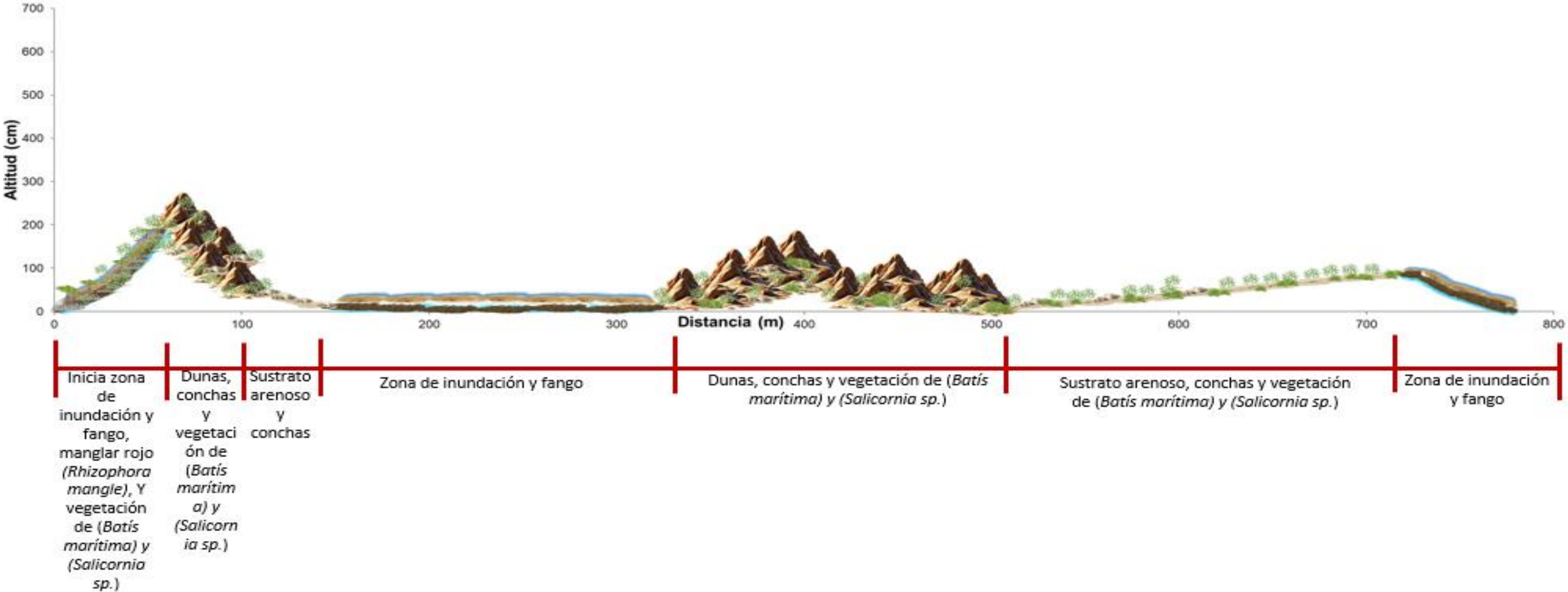


Figura 11 A. Perfil microtopográfico vertical Isla artificial (Tarquina) número 11.

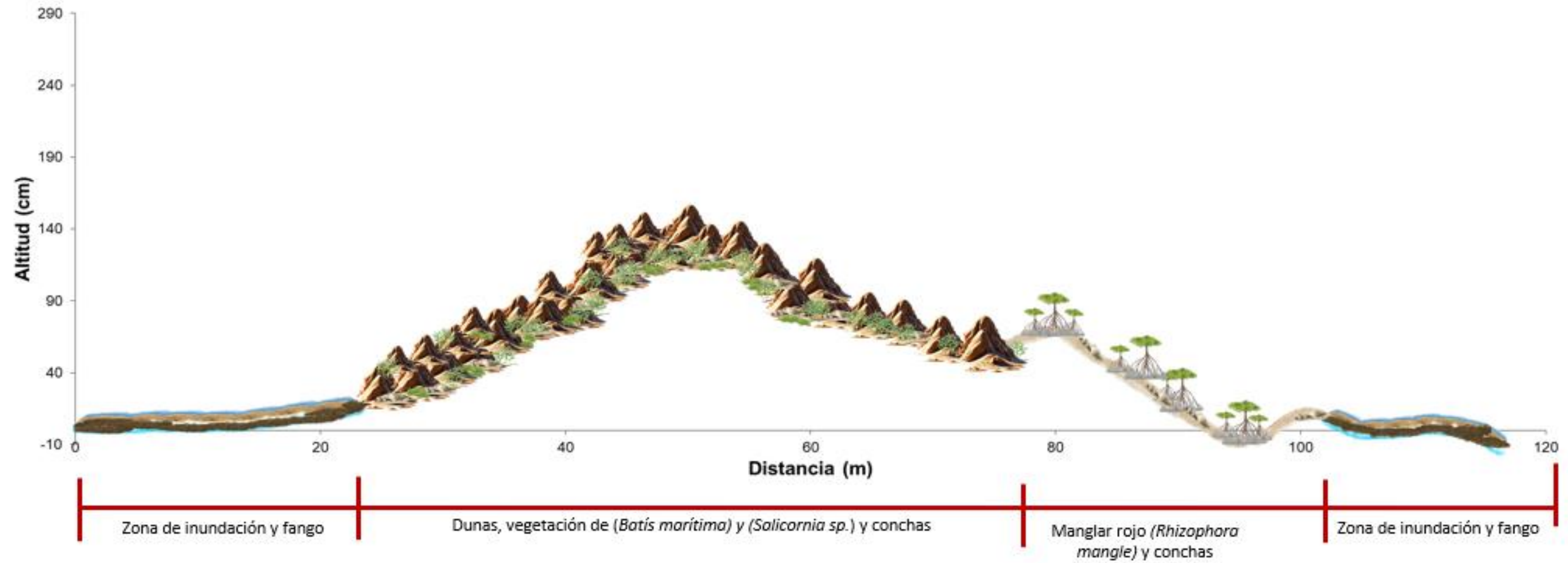


Figura 11 B. Perfil microtopográfico perpendicular Isla artificial (Tarquina) número 11.

*Atributos físico químicos en el sedimento**Textura del sustrato*

Los valores obtenidos de textura, indican la proporción de las partículas presentes de diferentes tamaños en el sedimento, la cual modifica la biodisponibilidad de algunos contaminantes e indican como quedan retenidos en las mismas partículas (Vanloon; Duffy, 2017), en este caso de los cuatro diferentes hábitats dentro de las islas artificiales, se identificó que los porcentajes de textura presentaron diferencias según el hábitat ($F=5.5$ $p<0.05$ $N=137$).

Se registró el contenido con mayor contenido de arena en los cuatro hábitats; con el porcentaje más alto en el hábitat de anidación con 78%, seguido del hábitat de *B. marítima* con 71%, posteriormente por el hábitat de manglar con 64%, y finalmente por el hábitat de marisma con 61%, en contenido de limo el hábitat con mayor porcentaje fue el de marisma con 16%, seguido el de manglar con 12%, sin embargo, los que tuvieron el porcentaje más bajo de arena en sedimentos fueron, el hábitat de *B. marítima* con 9% y la zona de anidación con 4% (Figura 12). En arcilla se encontraron resultados similares entre los hábitats y el mayor contenido se registró en el hábitat de manglar con 24%, seguido por marisma con 23%, mientras que los porcentajes más bajos fueron en el hábitat de *B. marítima* con 20% y en el hábitat de anidación con 18%.

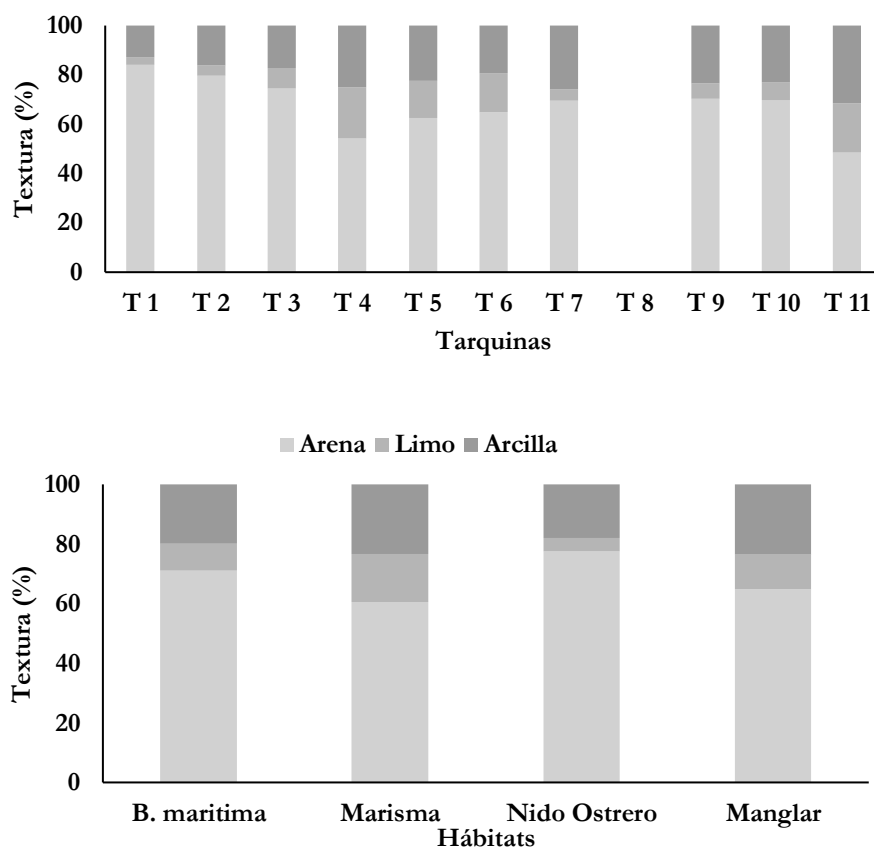


Figura 12. Tipos texturales (arena, limo y arcilla) en islas artificiales y hábitat.

Las variaciones de textura en sedimento en la zona de la Bahía del Tóbari y sus localidades cercanas a la costa, muestran resultados similares con los resultados obtenidos por Moreno (2019), donde encontró, en el sitio de Huivulai, un porcentaje de arena de 68.92%, limo 13% y un 26.58% de arcilla; lo que representa valores muy cercanos a los obtenidos en los hábitats registrados en las tarquinas. Por otro lado, Torres et al. (2023), en su estudio en el Tóbari, en tres sitios; Siari, Huivulai y Atanasia, encontró mayor contenido de arena en los tres sitios en sedimento de manglar, en el sitio de Huivulai con 68.9% y con menor porcentaje en Siari, 21.2% (Figura 12). El contenido en limo, el mayor porcentaje se registró en Siari con 35.4% y el más bajo en Huivulai con 7.6%. Por último, en arcilla el mayor porcentaje se encontró en Siari con 43.4%, seguido por Atanasia con 33.6%.

En general, los promedios de textura en todas las tarquinas fueron muy similares a los obtenidos por Moreno (2019) y Torres et al. (2023), en su estudio realizado en tres lagunas costeras del Golfo de California, por lo que se tuvo similitud de tipo de textura que predomina en la zona, debido a que en ambos estudios la textura dominante fue la arena. El establecimiento de la vegetación registrada en las tarquinas coincide con lo mencionado por Benítez (2007) y Moreno-Casasola et al. (2002), acerca de los sitios con mayor contenido de lodos, arenas, arcillas, los cuales promueven el crecimiento de especies de vegetación halófila, que brinda servicios ecosistémicos a gran diversidad de fauna, principalmente aves, que pasan su etapa reproductiva en el verano o invierno en la zona.

Materia orgánica

En el análisis de materia orgánica se encontró el mayor contenido en la T4 con 44%, seguido por la T6 y T5 con 34%. Los sitios T7, T9, T10, T11 presentaron valores intermedios desde 18% a 24% de porcentaje de materia orgánica. Sin embargo, los sitios con menores porcentajes se encontraron en el sitio T1 con 11% y el sitio T2 con 10% (Figura 13). Analizando los cuatro diferentes hábitats registrados en las tarquinas, se encontró que en el hábitat de marisma se registró el mayor porcentaje de materia orgánica con 32%, seguido ligeramente por el hábitat de manglar con 30%, posteriormente de Saladilla (*B. marítima*) con 22%. El hábitat con menor porcentaje fue la zona de anidación con 15%.

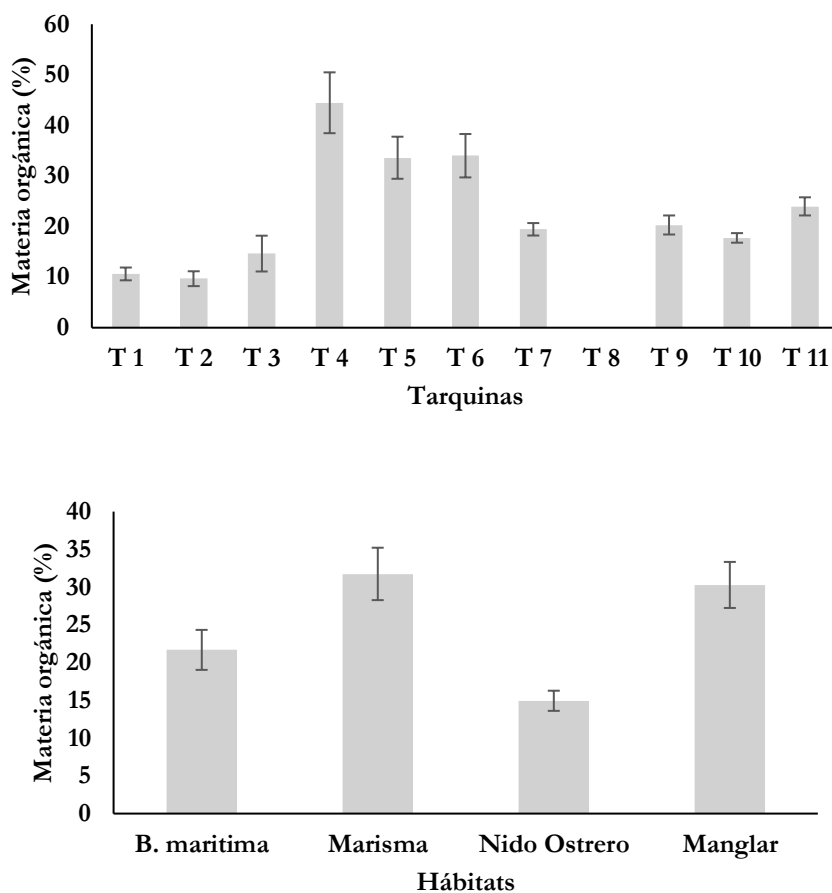


Figura 13. Contenido de materia orgánica en sedimento en islas artificiales y hábitat.

La materia orgánica corresponde a la fracción de los sedimentos que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, esta puede provenir desde la productividad primaria y secundaria. Sin embargo, también puede ser de origen terrestre mediante ríos y actividades antrópicas (Chaves et al., 2012) o de origen marino (Saavedra-Hortua et al., 2020).

Los resultados de materia orgánica presentaron fueron menores en relación a otros estudios en el Sur de Sonora, Moreno (2019) indica que en sus resultados registró en promedio entre los 4 y 6% de materia orgánica. Por otra parte, Torres et al. (2023), registro en promedio entre los 4.5 y 5.9%. Sin embargo, en este estudio los registros oscilaron desde 10% hasta 44%.

pH en sustrato de las islas artificiales

El pH en el sedimento no presentó diferencias significativas ($F = p < 0.05$ $N = 146$), debido a que los resultados fueron muy similares, donde el valor máximo se presentó en el sitio T3 con 8.4 pH, seguido por los sitios T1, T2, T9, T10 y T11 con 8.3 pH. Los valores más bajos se presentaron en los sitios T7 con 8.2 pH, así como T4, T5 y T6 con 8.1 pH (Figura 14). En general en los sitios de estudio, en el rango de pH no se registró mucha variación. Asimismo, en relación con el pH de cada hábitat se encontraron

resultados muy similares, en donde *B. marítima* presento el máximo valor con 8.3, seguido por zona de anidación con 8.2, y con los mismos valores mínimos el hábitat de Manglar y Marisma con 8.1 pH.

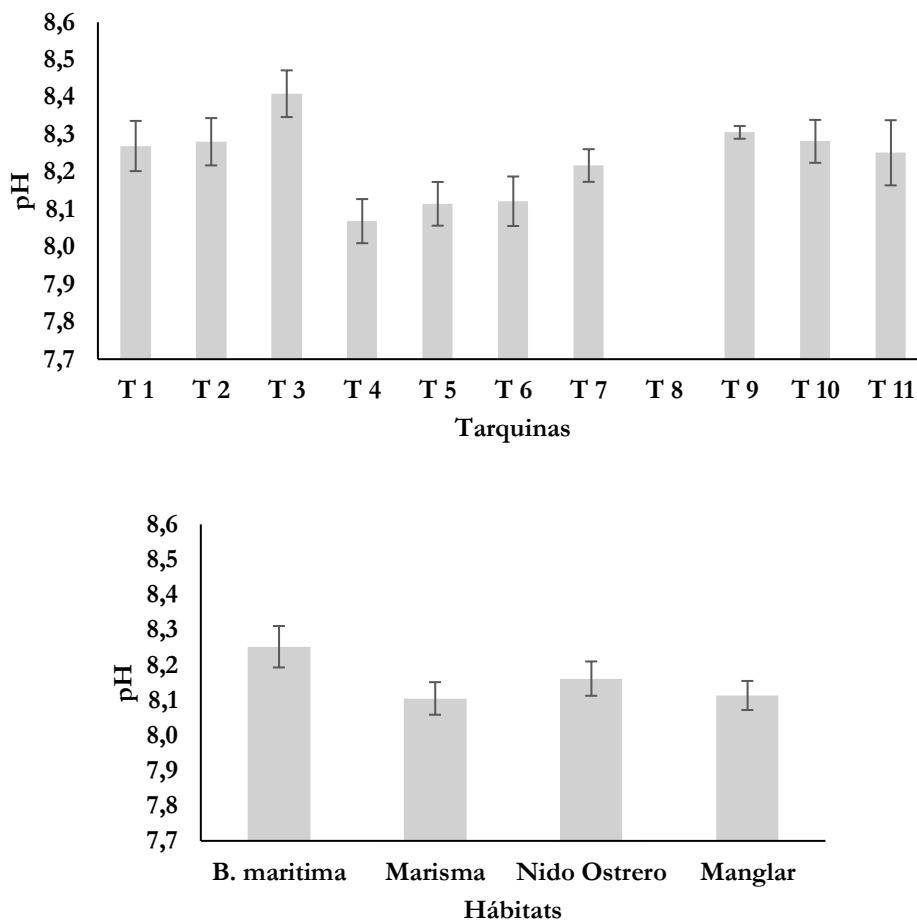


Figura 14. Niveles de pH en sedimento de islas artificiales y hábitat.

Los valores de pH en el sedimento registrados se consideran dentro del rango normal de acuerdo con Moreno-Casasola y Warner (2009). Estos valores son relativamente altos principalmente a la influencia del agua de mar (Bourgeois et al., 2019). Moreno (2019), identifico valores similares en su estudio realizado en el Sur de Sonora, donde registro un pH de (5.8 a 7.44), en la misma zona de Bahía del Tóbari, Torres et al. (2023) reportó valores de pH de (5.9 a 6.6).

Variables fisicoquímicas en agua superficial

Temperatura

Los valores de temperatura registrados en las aguas superficiales en las cercanías de los sitios de estudio en la Bahía del Tóbari, registraron baja variación. El valor mayor se registró en el sitio T5 con 27°C y valor menor fue de 18°C en el sitio T11. No obstante, los sitios restantes oscilaron con valores desde los 26°C hasta los 21°C. Moreno (2019) encontró valores muy similares de aguas superficiales en su estudio realizado en la Bahía del Tóbari, reportó valores que oscilaron desde entre los 22.44°C hasta

los 30.75°C. En el estudio realizado por Torres et al. (2023) en la Bahía del Tóbari, se obtuvieron temperaturas similares, donde los registros oscilaron desde 26°C a 30°C (Tabla 1).

Las variaciones de temperatura de un cuerpo de agua son influenciadas por diversos factores climáticos, entre ellos son; la temperatura atmosférica, radiación solar y la precipitación pluvial, las cuales son determinados por las épocas o temporadas de lluvias o secas (Castillo-Domínguez et al., 2011).

Tabla 1. Variación físico química del agua adyacente a las islas artificiales.

Tarquina	Temp °C	Cond mS cm ⁻¹	STD mg L ⁻¹	Sal (UPS)	ORP (mV)
T1	24±0.1	56±1.1	36±0.7	37±0.9	-168±13.2
T2	25±0.51	40±0.3	26±0.2	26±0.2	-134±7.3
T3	24±0.03	32±2	21±1.3	20±1.4	-159±6.2
T4	26±0.04	43±0.7	28±0.5	28±0.6	-140±5.6
T5	27±1.82	33±2.9	19±3	20±2.1	-182±18.1
T6	25±0.91	37±1.5	20±1.5	24±1.1	-156±9.4
T7	22±0.01	42±0.1	21±0.1	27±0.1	-129±0.6
T8	±	±	±	±	±
T9	24±1.3	44±3	22±1.5	28±2.1	-132±3.9
T10	21±0.13	42±0.2	21±0.1	27±0.1	-65±65.1
T11	18±0.02	27±0.2	14±0.1	17±0.1	-158±1.1

Conductividad

Los valores de conductividad registraron baja variación en aguas superficiales. El sitio con mayor valor en la conductividad superficial se registró en la T1 con (56 mS cm⁻¹), mientras que el sitio con el valor mínimo se presentó en la T11 con (27 mS cm⁻¹). En el resto de los sitios la conductividad varía desde valores de (32 a 43 mS cm⁻¹) (Tabla 1).

Se encontró relación similar con estudios de Torres et al. (2023), en donde, sus valores de conductividad, valor mínimo de 51.1 mS cm⁻¹ y valor máximo de 57.8 mS cm⁻¹. Moreno (2019), también concuerda con los resultados, valores que oscilaron entre los 57.74 y los 66.30 mS cm⁻¹. Las variaciones en este parámetro se deben principalmente a las distintas profundidades que se realiza el estudio.

Salinidad

Se observó poca variación en la salinidad en las aguas superficiales en las cercanías de los sitios de estudio. El valor mayor de salinidad se presentó en el sitio en T1 con 37 UPS, mientras que el menor valor se registró en el sitio T11 con 17 UPS. Los sitios restantes oscilaron en valores desde los 20 a 28 UPS (Tabla 1). Los valores de salinidad obtenidos fueron similares con los registrados por Torres et al. (2023), en donde se obtuvo valores desde 33.8 a 38.4 USP, dichos resultados muestran similitud con los

de Moreno (2019) en un estudio realizado en laguna de Moroncárit, donde encontró valores desde 31.34 a 44.93 UPS.

Las variaciones de salinidad en los ambientes costeros, según Foyn (1969), se asocian a factores como la influencia por los aportes de mareas, ríos, fluctuaciones del nivel freático y aportes pluviales de la zona que alteran el contenido de sales disueltas. Asimismo, Moreno (2019), indica que las variaciones se pueden deber al bajo aporte de agua dulce de origen continental (escurrimientos superficiales), los tipos de entrada de agua, a los arrastres que se encuentran en el lugar, entre otras. Por lo anterior, se puede decir que, en la mayor parte de los sitios de estudio, el agua es de tipo salobre debido a que sus valores registrados son por debajo de los 35 UPS.

Potencial Oxido Reducción

Los valores registrados de (ORP) en aguas superficiales en las cercanías de los sitios de estudio muestran que los valores más altos de ORP en agua superficial se presentaron en los sitios T5 con -182 mV, seguido por el sitio T1 con -168 mV, posteriormente con poca diferente el sitio T3 con -159 mV. Los sitios restantes mostraron valores intermedios desde -158 a -65mV (Tabla 1). Moreno (2019) reportó valores en aguas superficiales, que oscilaron entre los -210.38 y los -336.04 mV. Por otra parte, Torres et al. (2023) encontró valores muy similares a los de este estudio, ya que reportó valores de ORP desde -140.6 mV hasta -164.3 mV.

Las variaciones que se presentan en los estudios de ORP se deben a factores bioquímicos, Moreno-Casasola y Warner (2009) mencionan que, este parámetro tiene alta variación (entre +400 y +700 mV); sin embargo, cuando el oxígeno desaparece en los suelos inundados, dicha variación en el potencial redox disminuye de +400 a -400 mV. Por lo que, en este estudio se determina que el ORP en agua superficial se presentó tendencia oxidativa.

Sólidos totales

Se observó que la mayor concentración de sólidos totales disueltos (STD) se presentó en el sitio T1 con 36 mg L⁻¹, mientras que el valor más bajo fue el sitio T11 con un valor de 14 mg L⁻¹ de STD (Tabla 1).

Afinidades de sitios de anidación con las características del hábitat y sus implicaciones de manejo

Se encontró que en las tarquinas las características físicas fueron predominantemente de sustrato arenoso compuesto por conchas de bivalvos, con presencia de vegetación baja dispersa de Saladilla (*Batis marítima*), Salicornia (*Salicornia sp.*), Manglar negro (*Avicennia germinans*) y Manglar rojo (*Rhizophora mangle*).

Jernigan et al. (1978) reporta en su estudio que encontró aproximadamente el 72% de todos los nidos en un sitio donde anida el charrán mínimo (*Sternula antillarum*) en Carolina del Norte (EUA), los

cuales estaban en islas de material de dragado. De modo que la especie selecciona un hábitat específico dependiendo de la calidad de este, en donde las características como la heterogeneidad y estructura de la vegetación es de las más importantes (Wiens, 1992; Winter et al., 2006).

Los charranes mínimo (*S. antillarum*), pico grueso (*Gelochelidon nilótica*), elegante (*Thalasseus elegans*) y real (*Thalasseus maximus*) y el rayador americano (*Rynchops niger*) prefieren hábitats de sucesión temprana que consisten en arena desnuda, sustrato de arena/concha o arena/grava, o vegetación dispersa (<15% de cobertura) (Golder et al. 2008). Para aves playeras los requerimientos son parecidos, principalmente se ha documentado el uso de estos sitios creados, en EUA y Europa) por especies de chorlitos como chorlo pico grueso (*Anarhynchus wilsonia*) (Parnell et al. 1986), chorlo niveo (*Anarhynchus alexandrinus*) (Scarton et al., 2013), chorlo nevado y chorlo tildío (Landin, 1990). Es importante indicar en el caso de las tarquinas de B. del Tóbari una de las especies playeras de mayor importancia es el ostrero americano (*Haematopus palliatus spp frazari*) subespecie con bajo número a nivel mundial (Leyva-García, 2023a). Las especies de garzas, ibis, espátulas rosadas y similares, se relacionan con el desarrollo del estrato arbóreo, tal es el caso del crecimiento de las especies de mangle que están aumentando la altura (Frederick, 2001).

Se identificó por observación que las amenazas que enfrentan las poblaciones de aves en las islas artificiales son principalmente por una alta actividad de depredación de especies ferales como perros domésticos, también se puede atribuir a la depredación por coyotes debido a registros de huellas y por la presencia de cuervos comunes (*Corvus corax*). Leyva-García et al. (2023a) y Leyva-García et al. (2023b) encontraron evidencias de estos mismos depredadores.

El manejo adecuado de los recursos naturales en las zonas costeras debe ser prioritario en la gestión ambiental, y merecen especial atención aquellos relacionados con la conservación de las aves. La identificación del disturbio natural y antropogénico en el sitio aparece como un paso previo adecuado para implementar las acciones de manejo y solventar los impactos en los sitios de anidación, lo cual contribuirá en una mayor productividad biológica de las poblaciones presentes en las islas artificiales, además, incluir la delimitación y protección de las islas, la prohibición del asentamiento humano, el ordenamiento pesquero y uso de islas (Vega et al., 2008).

CONCLUSIONES

Las islas artificiales presentan desarrollo de hábitats estructurados característicos de vegetación que estabiliza las islas, tales como manglares y herbáceas, que propician refugio para diferentes especies de aves acuáticas que anidan en el suelo o árboles.

Los sitios utilizados preferentemente por aves marinas y playeras se conformaron por sustrato arenoso, grandes cantidades de conchas y con poca vegetación cercana a los nidos, lo cual conformaron el hábitat de anidación óptimo.

El desarrollo del manglar ha representado la oportunidad de que especies garzas, ibis y espátulas empiecen a anidar.

Las características físico-químicas en el agua y sedimento ejercen influencia en la estructura de la vegetación presente en las tarquinas.

Las tarquinas son un hábitat que excluye de acceso a algunos depredadores, sin embargo, en mareas bajas se genera conectividad terrestre y los depredadores se pueden mover hacia algunas de las islas, y pueden generar problemas a las poblaciones de aves que descansan y anidan en las islas artificiales.

RECOMENDACIONES

En virtud de los resultados obtenidos en el presente trabajo y con la finalidad que los sitios en la Bahía del Tóbari continúen manteniendo poblaciones de aves acuáticas, migratorias y reproductivas, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Mantener el monitoreo sistemático y de largo plazo de las tarquinas como sitios importantes de diferentes grupos biológicos.
- Para incrementar el éxito de anidación en las tarquinas se requieren manejo de vegetación y depredadores.
- Disminuir en la medida de lo posible el impacto antropogénico en las colonias de anidación.
- Realizar mantenimiento como limpieza de residuos sólidos y labores de restauración para establecimiento exitoso de especies vegetales que estabilicen las islas artificiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AICA (1999). Área de importancia para la Conservación de Aves, Bahía del Tóbari, número 129. https://avesmx.conabio.gob.mx/FichaRegion.html#AICA_129
- Becker, P., Sudmann, S. (1998). Quo vadis *Sterna hirundo*? Implicaciones para la conservación del charrán común en Garmenningún. *Vo-gelwelt* 119: 293–304.
- Benítez, D. (2007). Forestación artificial con mangles en isletas de dragados en una región semiárida de México. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Tesis. La Paz, B.C.S.
- Boulinier, T., Lemel, J. (1996). Spatial and temporal variations of factors affecting breeding habitat quality in colonial birds: Some consequences for dispersal and habitat selection. *Acta Ecologica* 17:531–552.
- Bourgeois, C., Alfaro, A.C., Leopold, A., Andréoli, R., Bisson, E., Desnues, A., Duprey, J.L., Marchand, C. (2019). Sedimentary and elemental dynamics as a function of the elevation profile in a semi-arid mangrove toposequence. *Catena*, 173, 289–301.
- Burger, J., Gochfeld, M. (1994). Depredación y efectos de los humanos en las aves marinas que anidan en islas. En: Nettleship DN, Burger J, Gochfeld M ed. *Aves marinas en Islas: amenazas, estudios*

- de casos y planes de acción. Cambridge, Reino Unido: BirdLife International (BirdLife Conservation Series no 1), 39–67.
- Carmona, R., G. Danemann, V. Ayala y N. Arce. 2022. Estado de las aves acuáticas en la Bahía de Tóbari, Sonora (2022). Pronatura Noroeste y Universidad Autónoma de Baja California Sur. Ensenada, Baja California. 9 pp.
- Castillo-Domínguez, A., Barba-Macías, E., Navarrete, A., Rodiles-Hernández, R., Jiménez Badillo, M. (2011). Ictiofauna de los humedales del río San Pedro, Balancán, Tabasco, México. *Rev. biol. trop* vol.59 n.2
- Ceballos-Lascuráin, H., Howell, S. N. G., Ramos, M. A., Swift, B. (2000). Aves comunes de México. Guía de campo para identificar las aves comunes en México. Editorial DIANA. México. 103 p
- Chaves, F.M., Marín, G.P., Castro, L. (2012). Evaluación físico-química de los sedimentos en el estero tamarindo y sus tributarios, Guanacaste, Costa Rica. *Uniciencia*, 26(1-2), 41-50.
- CONAGUA. (2023). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Costa de Hermosillo (2619), estado de sonora. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Ciudad de México.
- CONAPESCA, (2008). Manifestacion de impacto ambiental, modalidad particular, para la obra de dragado en la Bahía del Tóbari, municipio de Benito Juárez, Sonora.
- Foy, E. (1969). Waste disposal and pollution in coastal lagoons. In: UNAMUNESCO. (Eds.). *Memorias del Simposio Internacional Lagunas Costeras*. Nov. 28-30, 1967. México, D.F. 281-290 pp.
- Frederick, P. C. (2001). Wading birds in the marine environment. In *Biology of marine birds* (pp. 635-674). CRC Press.
- Gochfeld, M., Burger, J. (1996). Family Sternidae (terns). In: del Hoyo J, Elliot A, Sargatal J ed. *Handbook of the Birds of the World*. Vol. 3. Barcelona: Lynx Editions, 624–643. Guicking D, Mickstein S, Becker PH, Schlatter R, 2001. Nest site selection by brown-hooded gull *Larus maculipennis*, Trudeau's tern *Sterna trudeaui* and white-faced ibis *Plegadis chihi* in a south Chilean tule marsh. *Ornitol. Neotrop.* 12: 285–296.
- Goghfeld, M. (1983). Colony site selection by least terns: physical attributes of sites. *Colonial Waterbirds* 6:205-213.
- Golder, W., D. Allen, S. Cameron, and T. Wilder. 2008. Dredged material as a tool for management of tern and skimmer nesting habitats. DOER Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-E24), Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. <http://el.erdc.usace.army.mil/dots/doer/doer.html> Arizmendi,
- Heiri O. Lotter A. Lemcke G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101–110

- Hernández, M. (2021). Los percardores ribereños de la Bahía del Tóbari, Sonora, frente al riesgo y la crisis socioambiental. Problemática y construcción de alternativas desde la perspectiva de los actores sociales. Centro de estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la soberanía Alimentaria.
- ICES. 2003. Seabirds as Monitors of the Marine Environment. Edited by Mark L. Tasker and Robert W. Furness. ICES Cooperative Research Report No. 258. 73 pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.5394>
- Jernigan, L. S., Soots, R. F., Parnell, J. F., Quay, T. L. (1978). Nesting habitats and breeding populations of the Least Tern (*Sterna albifrons antillarum*) in North Carolina. Univ. N.C. Contrib. Mar. Sci. 814. vii and 39 pp
- Klute, A., Dinauer, R. (1986). Physical and Mineralogical Methods. Planning, V. 8, P. 79.
- Kotliar, N.B., Burger, J. (1986). Colony site selection and abandonment by least terns *Sterna antillarum* in New Jersey, USA. Biological Conservation 37:1-21.
- Landin, M. C. (1990). Use of Dredged Material Islands by Colonial Nesting Waterbirds in the Northern Gulf Coast. TIC ILE mr'ENVIRONMENTAL EFFECTS, 160.
- Leyva-García, G., Gallo-Reynoso, J. P., Barba-Acuña, I. D. (2023b). Exploring new sites: the neotropical otter (*Lontra longicaudis annectens*) in Bahía del Tóbari, Sonora, México. Therya Notes, 4, 68-73.
- Leyva-García, G., García-Hernández, J., Castillo-Guerrero, J. A., Palacios, E. (2023a). Colonial and Non-Colonial Birds Breeding on Dredge-Spoil Islands in a Tropical Wetland in Mexico. Waterbirds, 46(1), 57-66.
- M. C., L. Márquez-Valdelamar, H., Berlanga. (2005). Priority setting for bird conservation in Mexico: The Role of the Important Bird Areas Program. Pp. 1256– 1262 in Ralph, C. J. Rich, T. D. (Eds). Bird Conservation Implementation and Integration in the Americas: Proceedings of the Third International Partners in Flight Conference. Asilomar, California, General Technical Report. 191. Albany, California: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, USA
- Martínez, J. (2008). Dragado en Puertos Marítimos. Tesis de Ingeniería. México D.F. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y arquitectura Unidad Profesional Zacatecano.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T., Pérez-Veja, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. Intern. J. Appl. Earth Observ. Geoinf. 5, 249-261
- Moreno, C. (2019). Gradiente de variación fisicoquímica en agua y sedimento de tres estuarios del Sur de Sonora. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui. AV. Tecnológico, Block 611, valle del Yaqui. Bacum, Sonora.
- Moreno-Casasola, P., Rojas-Galavíz, J.L., Zárate-Lomeli, D., Ortiz-Pérez, M.A., Lara-Domínguez, A.L., Saavedra-Vázquez, T. (2002). Diagnóstico de los manglares de veracruz: distribución, vínculo con

los recursos pesqueros y su problemática. Madera y bosques, Numero especial:61-88, ISSN 1405-0471.

- Moreno-Casasola, P., Warner, B. (2009). Breviario para describir, observar y manejar humedales. En: Serie Costa Sustentable No. 1. Xalapa Ver. México: RAMSAR Instituto de Ecología A.C., CONANP, US Fish and Wildlife Service US State Department.
- Parnell, J. F., Ainley, D. G., Blokpoel, H., Cain, B., Custer, T. W., Dusi, J. L., Kress, S., Kushlan, J. A., Southern, W. E., Stenzel, L. E., & Thompson, B. C. (1988). Colonial Waterbird Management in North America. *Colonial Waterbirds*, 11(2), 129–169. <https://doi.org/10.2307/1520996>
- Parnell, J. F., Needham, R. N., Soots Jr, R. F., Fussel III, J. O., Dumond, D. M., McCrimmon Jr, D. A., ... & Shields, M. A. (1986). Use of dredged-material deposition sites by birds in coastal North Carolina, USA. *Colonial Waterbirds*, 210-217.
- Saavedra-Hortua, D.A., D.A. Friess, M. Zimmer y L.G. Gillis. 2020. Sources of particulate organic matter across mangrove forests and adjacent ecosystems in different geomorphic settings. *Wetlands*, 1-13.
- SAGARPA. (2008). Manifestacion de impacto ambiental, modalidad particular, para la obra de dragado en la Bahía del Tóbari, municipio de Benito Juárez, Sonora. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/son/estudios/2009/26SO2009H0010.pdf>
- Scarton, F., Cecconi, G., & Valle, R. (2013). Use of dredge islands by a declining European shorebird, the Kentish Plover *Charadrius alexandrinus*. *Wetlands ecology and management*, 21(1), 15-27.
- Steel, A., Torrie, M. (1996). Bioestadística: Principios y procedimientos. México D. F. México: Edit. McGrawHill.
- Sydeman, W. J., Schoeman, D. S., Thompson, S. A., Hoover, B. A., García-Reyes, M., Daunt, F., Agnew, P., Anker-Nilssen, T., Barbraud, C., Barrett, R., Becker, P. H., Bell, E., Boersma, P. D., Bouwhuis, S., Cannell, B., Crawford, R. J. M., Dann, P., Delord, K., Elliott, G., Erikstad, K. E., Flint, E., Furness, R. W., Harris, M. P., Hatch, S., Hilwig, K., Hinke, J. T., Jahncke, J., Mills, J. A., Reiertsen, T. K., Renner, H., Sherley, R. B., Surman, C., Taylor, G., Thayer, J. A., Trathan, P. N., Velarde, E., Walker, K., Wanless, S., Warzybok, P., Watanuki, Y. (2021). Hemispheric asymmetry in ocean change and the productivity of ecosystem sentinels. *Science*, 372, 980-983.
- Torres, J.R., Sánchez-Mejía, Z.M., Choix, F.J., Lorenzo-Márquez, H., Alcudia-Aguilar, A., Barrios Calderón, R. J. (2023). Variación fisico-química en agua y sedimento del manglar en tres lagunas costeras del Golfo de California. *Áreas Naturales Protegidas SCRIPTA*, 2023. Vol. 9 (3):61-83. <https://doi.org/10.18242/anpscripta.2023.09.09.03.0005>
- VanderWerf, E.A., Downs, R. E. (2018). Current distribution, abundance, and breeding biology of White Terns (*Gygis alba*) on Oahu, Hawaii. *The Wilson Journal of Ornithology* (2018) 130 (1): 297–304. <https://doi.org/10.1676/17-058.1>

- Vanloon, G. W., Duffy, S. J. (2017). Environmental Chemistry: A Global Perspective. Oxford University Press, ISBN 019874997X.
- Vega, X., Cruz, N. M. A. y Morales, L. M. 2008. Conservación de tierras privadas: un nuevo y práctico mecanismo para la protección de las aves playeras en México. *Ornitología Neotropical* 19 (suplemento).
- Velarde, E., Anderson, D., Ezcurra, E. (2019). Seabird clues to ecosystem health. *Science*, 365, 116-117.
- WHSRN. 2014. Red Hemisférica de Reservas para las Aves Playeras, Bahía del Tóbari. Manoment. https://whsrn.org/es/whsrn_sites/bahia-de-tobari/
- Wiens, J. A. (1992). The ecology of bird communities. Vol. 1. Foundations and patterns. Cambridge University Press. Cambridge, U. K.
- Winter, M., Johnson, D. H., Shaffer, J. A., Donovan, T. M., Svedarsky, W. D. (2006). Patch size and landscape effects on density and nesting success of grasslands birds. *Journal of Wildlife Management* 70(1): 158-172.

Importancia del aislamiento de hongos en suelos contaminados con metales pesados para biorremediación y biotecnología ambiental

Recibido em: 29/04/2025

Aprobado em: 01/05/2025

 10.46420/9786585756563cap17

Oscar Abraham Flores-Amaro 

Francisco Javier Avelar-González 

Pamela Romo-Rodríguez* 

INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados es un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia en México y en muchas partes del mundo (Osuna-Martínez et al., 2021). Estos elementos, debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente, representan un desafío considerable para la gestión de residuos generados por actividades industriales, mineras y agrícolas (Gamba; Rojas, 2024). Entre los metales pesados más preocupantes en el contexto mexicano se encuentran el plomo (Pb), el arsénico (As) y el cromo (Cr), que están estrechamente relacionados con actividades humanas que han contribuido a su acumulación en suelos, cuerpos de agua y organismos vivos (Covarrubias; Cabriales, 2017).

Los metales pesados son elementos químicos de alta densidad y toxicidad que pueden bioacumularse en organismos vivos y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica (Sonone et al., 2020). Su liberación en el ambiente se debe principalmente a actividades antropogénicas que han contribuido a su dispersión y acumulación en distintos ecosistemas (Häder et al., 2020). En México, una de las fuentes más relevantes de contaminación por Pb es la actividad minera, particularmente en estados como Zacatecas y Chihuahua, donde se han reportado altos niveles de Pb en suelos y cuerpos de agua cercanos a minas activas y abandonadas (Briseño-Bugarín et al., 2024). En el caso del As, su presencia en el ambiente está relacionada con la minería y con la disolución de minerales arsenicales en fuentes de agua subterránea (Taneja et al., 2023). Estados como Durango y Guanajuato han registrado niveles preocupantes de As en agua potable, superando los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Talamantes, 2024). Por su parte, el Cr es un contaminante frecuente en zonas industriales dedicadas al curtido de pieles y a la galvanoplastia, como es el caso de Guanajuato, donde se han reportado

* Autor correspondiente: pamela.rr@pabellon.tecnm.mx

descargas de efluentes con alto contenido de cromo hexavalente (Cr^{6+}), una de las formas más tóxicas de este metal, con impactos negativos en la calidad del agua y los suelos agrícolas (Jee et al., 2024).

La persistencia de los metales pesados en el ambiente se debe a que no pueden degradarse, sino que se acumulan en suelos, sedimentos y cuerpos de agua (Singh y Steinnes, 2020). Su toxicidad varía según la concentración, la forma química y el tiempo de exposición, afectando tanto a los ecosistemas como a la salud humana (Mitra et al., 2022). El Pb tiende a unirse a partículas del suelo, lo que limita su movilidad, aunque puede ser absorbido por las plantas e ingresar en la cadena alimenticia (Bouida et al., 2022). El As, por su parte, puede presentarse en formas orgánicas e inorgánicas, siendo estas últimas más tóxicas y móviles en el agua subterránea, dependiendo del pH y de la presencia de otros compuestos (Raju, 2022). El cromo trivalente (Cr^{3+}) es menos tóxico, mientras que el Cr^{6+} es altamente soluble y carcinógeno (Hussain et al., 2025).

Los efectos de estos metales en la salud humana son preocupantes. La exposición al Pb afecta el sistema nervioso central, especialmente en niños, causando retraso en el desarrollo cognitivo y daño neurológico irreversible (Shvachiy et al., 2020). En el caso del As, su exposición prolongada puede provocar arsenicismo, que se manifiesta con lesiones cutáneas, daño hepático y cáncer de piel y vejiga (Gupta, 2022). Se han registrado casos de intoxicación crónica por As debido al consumo de agua contaminada (Kumar et al., 2021). El Cr^{6+} es un potente carcinógeno que afecta principalmente el sistema respiratorio cuando se inhala, provocando mutaciones genéticas y cáncer de pulmón (Álvarez et al., 2021).

Dado el impacto negativo de los metales pesados en los ecosistemas y en la salud humana, es necesario implementar estrategias de remediación que permitan reducir su toxicidad y mitigar su presencia en el ambiente. Existen métodos fisicoquímicos ampliamente utilizados para este propósito, como la precipitación química, la adsorción con materiales sintéticos, el intercambio iónico y la filtración por membranas (Pathak et al., 2024). Aunque estas técnicas pueden ser efectivas, a menudo presentan altos costos operativos y generan residuos secundarios que requieren un manejo adecuado (Rafique et al., 2022).

Frente a estas limitaciones, la biorremediación ha surgido como una alternativa biotecnológica para la descontaminación de suelos y cuerpos de agua impactados por metales pesados (Rahman y Singh, 2020). Este enfoque se basa en el uso de microorganismos y plantas para inmovilizar, transformar o reducir la toxicidad de los contaminantes (Xia et al., 2020; Li et al., 2022). Una de las principales ventajas de la biorremediación es que puede aplicarse *in situ*, evitando el transporte de suelos contaminados y reduciendo los costos asociados a los procesos de remediación tradicionales (Sales da Silva et al., 2020). Además, los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser autóctonos del sitio contaminado, lo que les confiere una mayor resistencia a las condiciones ambientales adversas (Bala et al., 2022).

Sin embargo, la biorremediación también presenta ciertas limitaciones. A diferencia de otros compuestos orgánicos, los metales pesados no pueden ser degradados, por lo que las estrategias

biológicas se centran en su inmovilización, bioadsorción o transformación en formas menos tóxicas (Priya et al., 2022; Flores-Amaro et al., 2024). La eficiencia del proceso depende de múltiples factores, como el pH, la temperatura y la concentración de los contaminantes (Schlögl et al., 2023). No obstante, investigaciones recientes han demostrado que ciertos hongos y bacterias poseen una gran capacidad para adsorber y reducir metales pesados, transformándolos en compuestos menos dañinos (Priya et al., 2022). Por ejemplo, el hongo *Aspergillus niger* ha mostrado una notable capacidad de bioadsorción de Pb y Cr en efluentes industriales, lo que sugiere su potencial aplicación en la biorremediación de sitios contaminados (Qadir et al., 2022).

El aislamiento de microorganismos autóctonos de suelos contaminados es una estrategia clave para la mejora de los procesos de biorremediación. Los microorganismos que han evolucionado en ambientes con alta concentración de metales pesados han desarrollado mecanismos de resistencia que les permiten sobrevivir y adaptarse a estas condiciones extremas (Wani et al., 2022). La identificación y selección de estas cepas es fundamental para optimizar su aplicación en la biorremediación de suelos y aguas contaminadas.

Entre los microorganismos con potencial biotecnológico se encuentran bacterias del género *Pseudomonas*, capaces de reducir Cr^{6+} a su forma menos tóxica, y hongos como *Penicillium*, que inmovilizan arsénico mediante procesos de biomineralización (Chandra; Banik, 2021; Shi et al., 2023). El estudio de estas especies no solo es relevante para la biorremediación, sino también para el desarrollo de aplicaciones en la producción de enzimas resistentes a metales, la generación de nanopartículas y la recuperación de metales valiosos a partir de desechos industriales mediante bio-minería.

En México, diversas investigaciones han identificado cepas bacterianas altamente resistentes a Pb y Cr en suelos contaminados, lo que abre nuevas posibilidades para la implementación de tecnologías de biorremediación adaptadas a las condiciones locales (Guzmán-Moreno et al., 2022; Martínez-Aldape et al., 2024). Estos avances destacan la importancia del aislamiento y caracterización de microorganismos como un paso esencial en el diseño de estrategias efectivas para la recuperación de ambientes impactados por metales pesados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Revisión bibliográfica

Para la fundamentación teórica del presente capítulo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica enfocada en la identificación de investigaciones relevantes sobre el aislamiento de hongos en ambientes contaminados con metales pesados y su potencial biotecnológico en procesos de biorremediación. La búsqueda de información se realizó entre los meses de enero y marzo de 2025, utilizando la base de datos de Google Scholar.

Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español, tales como: “fungal bioremediation”, “heavy metal-resistant fungi”, “mycoremediation of arsenic”, “lead detoxification by

fungi”, “chromium tolerance in *Aspergillus*”, “hongos resistentes a metales pesados” y “biorremediación microbiana de suelos contaminados”. Se establecieron como criterios de inclusión artículos originales, revisiones sistemáticas y capítulos de libro publicados entre 2010 y 2025, con especial atención en estudios que reportaran casos de aislamiento fúngico en suelos contaminados con Pb, As y Cr.

Los documentos seleccionados fueron evaluados con base en su pertinencia temática, rigor metodológico y relevancia para el contexto de aplicación en México y América Latina. Además, se priorizó la inclusión de investigaciones que abordaran tanto los mecanismos fisiológicos de resistencia como las aplicaciones tecnológicas de los hongos en procesos de remediación ambiental. Esta revisión bibliográfica permitió establecer el estado del arte y justificar la importancia de realizar aislamientos dirigidos desde entornos contaminados para su posterior aplicación biotecnológica.

Aislamiento de hongos en suelos contaminados

Con el fin de ejemplificar la factibilidad del aislamiento de hongos con potencial biotecnológico desde ambientes contaminados, se desarrolló un estudio de caso en suelos impactados por minería en el municipio de Concepción del Oro, Zacatecas, México. Esta región presenta antecedentes de contaminación por As y Pb derivados de actividades extractivas intensivas, lo que la convierte en un sitio representativo para el muestreo de microorganismos adaptados a condiciones extremas.

El muestreo se realizó en puntos con presencia visible de residuos mineros, recolectando suelo superficial (hasta 10 cm de profundidad) en condiciones estériles, utilizando guantes, espátulas de acero inoxidable y bolsas tipo Whirl-Pak®. Las muestras fueron transportadas en frío (4 °C) al laboratorio para su procesamiento en un plazo no mayor a 24 horas, a fin de preservar la viabilidad microbiana.

Para el aislamiento de hongos, se emplearon dos enfoques complementarios: siembra directa de suelo sobre medio PDA (Potato Dextrose Agar) suplementado con antibióticos (ampicilina y estreptomycin), y siembra por dilución (hasta 10^{-3}) para favorecer el crecimiento de cepas dispersas o minoritarias. Las placas fueron incubadas a 28 °C durante 5 a 7 días en condiciones de oscuridad parcial. Las colonias fúngicas con morfologías diferenciables fueron seleccionadas y purificadas mediante repique sucesivo en medio PDA estéril.

Las cepas aisladas fueron posteriormente cultivadas en placas para la obtención de estructuras reproductivas (conidias) y su posterior preservación a corto plazo en refrigeración. La identificación preliminar se basó en características macroscópicas (color, textura, velocidad de crecimiento) y microscópicas (forma de esporas, hifas, conidióforos), observadas mediante microscopía óptica a 40x y 100x.

Esta metodología permitió obtener un conjunto representativo de cepas fúngicas autóctonas de suelos contaminados, con potencial de ser evaluadas en estudios posteriores para su aplicación en la biorremediación de metales pesados.

RESULTADOS

Estrategias de aislamiento de hongos en ambientes contaminados con metales pesados

La recuperación de suelos contaminados con metales pesados mediante biorremediación requiere un enfoque basado en la selección de microorganismos con alta tolerancia y capacidad de transformación de estos contaminantes (Rahman; Singh, 2020). Para ello, el uso de técnicas microbiológicas básicas es un paso esencial que permite el aislamiento, la caracterización y la evaluación de cepas fúngicas resistentes a metales como Pb, As y Cr (Haripersad, 2022; Maqsood et al., 2022). Métodos como el cultivo en medios selectivos, la observación morfológica y la identificación bioquímica y molecular son fundamentales para determinar la viabilidad y adaptabilidad de los hongos en entornos contaminados (Senanayake et al., 2020). Estas técnicas proporcionan información clave sobre su crecimiento, metabolismo y mecanismos de resistencia, aspectos imprescindibles antes de su aplicación en estrategias de biorremediación a gran escala (Sarker et al., 2023).

Los hongos desempeñan un papel crucial en la degradación de compuestos tóxicos y la estabilización de contaminantes en el suelo (Tomer et al., 2021). En ambientes contaminados, la diversidad fúngica puede verse reducida debido a la toxicidad de los metales pesados; sin embargo, ciertas especies han desarrollado estrategias de resistencia que incluyen la bioadsorción, biomineralización y transformación en compuestos menos tóxicos (Abd et al., 2023) (Figura. 1).

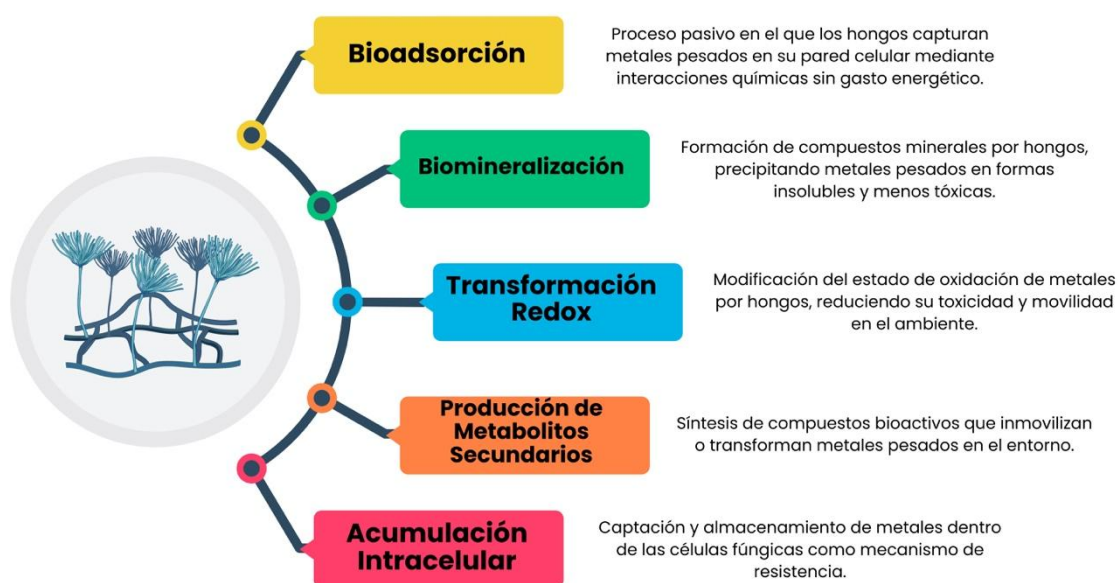


Figura 1. Mecanismos de resistencia de los hongos a metales pesados. Esquema ilustrativo que muestra los principales mecanismos de resistencia utilizados por los hongos para enfrentar la contaminación por metales pesados. Fuente: los autores.

En estudios realizados se ha identificado la presencia de hongos del género *Aspergillus*, *Penicillium* y *Trichoderma* en suelos contaminados con metales pesados (El-Mahdy et al., 2021; Maldaner et al., 2021). Estos microorganismos han mostrado una notable capacidad para acumular y transformar cationes

metálicos a través de la producción de metabolitos secundarios y la modificación de la química del suelo (Elhamouly et al., 2022). Investigaciones en otras partes del mundo han confirmado que *A. niger* puede inmovilizar Pb y Cr mediante la secreción de ácidos orgánicos que precipitan los metales en formas menos solubles, lo que contribuye a la reducción de su movilidad en el suelo (Shan et al., 2021; He et al., 2022). El As, debido a su elevada toxicidad y movilidad en ambientes acuáticos y terrestres, representa un reto mayor para la biorremediación (Kumar et al., 2020a). Sin embargo, se ha observado que algunos hongos poseen mecanismos específicos para reducir la biodisponibilidad de este elemento, formando complejos con compuestos orgánicos del suelo o promoviendo su transformación mediante reacciones redox (Zhang et al., 2024). En regiones mineras de Guanajuato y Durango, estudios han reportado la presencia de hongos resistentes al As, lo que sugiere su potencial en la remediación de sitios contaminados (Pérez, 2020).

Tabla 1. Comparación de métodos de aislamiento de hongos resistentes a metales pesados. Fuente: los autores.

Método de aislamiento	Principio del método	Ventajas	Limitaciones
Siembra en medios selectivos con metales	Uso de medios con concentraciones controladas de metales pesados.	Permite seleccionar hongos con resistencia específica.	Puede excluir especies sensibles que también podrían ser útiles en biorremediación.
Cultivo en medios enriquecidos con sales metálicas	Crecimiento en presencia de concentraciones graduales de metales pesados.	Evalúa la tolerancia progresiva de los hongos.	Requiere tiempos de incubación prolongados.
Técnica de enriquecimiento en cultivos líquidos	Adaptación de hongos a ambientes con metales en solución.	Simula condiciones reales de exposición a metales en agua.	Difícil recuperación de colonias puras para identificación.
Aislamiento a partir de biofilms fúngicos	Selección de hongos que forman estructuras multicelulares resistentes a metales.	Útil para hongos con alta tolerancia a contaminación severa.	Puede no ser efectivo para hongos unicelulares.

Para el aislamiento de hongos en suelos contaminados con metales pesados, es fundamental establecer una estrategia de muestreo que permita obtener una representación adecuada de la diversidad microbiana presente en el sitio de estudio. La selección de sitios de muestreo debe considerar factores como la proximidad a fuentes de contaminación, la variabilidad en la concentración de metales y las

características fisicoquímicas del suelo (NOM-021, 2000). En regiones con actividad minera intensiva, han sido objeto de estudios que buscan caracterizar la microbiota del suelo en función de la concentración de metales pesados. Para la recolección de muestras, se recomienda la obtención de suelos superficiales y a diferentes profundidades, evitando la contaminación cruzada entre las muestras. El transporte y almacenamiento de las muestras deben realizarse en condiciones estériles y a temperaturas controladas para preservar la viabilidad de los microorganismos (NOM-021, 2000).

El aislamiento de hongos resistentes a metales pesados requiere el uso de medios selectivos que contengan concentraciones controladas de Pb, As o Cr (Ceci et al., 2020; Firincã et al., 2023). Estos medios permiten favorecer el crecimiento de cepas resistentes, excluyendo aquellas que no poseen mecanismos de tolerancia (Jeyakumar et al., 2023). Uno de los enfoques más utilizados es la siembra en medios de cultivo enriquecidos con sales metálicas en concentraciones graduales. Por ejemplo, el medio de Sabouraud Dextrose Agar suplementado con acetato de plomo o dicromato de potasio ha sido empleado en estudios de aislamiento de hongos en suelos contaminados (Patra et al., 2020). La incubación se realiza bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, promoviendo la selección de cepas capaces de tolerar concentraciones elevadas de metales pesados (Kumar; Dwivedi, 2021). El enriquecimiento de cultivos en presencia de metales pesados también permite evaluar la adaptabilidad de los hongos a condiciones de estrés químico (Liu et al., 2024). En investigaciones previas, se ha demostrado que cepas del género *Fusarium* pueden crecer en presencia de hasta 500 ppm de plomo, lo que indica un alto potencial de estas especies para aplicaciones en biorremediación (De Wet; Brink, 2021) (Tabla. 1).

Una vez aisladas, las cepas fúngicas deben ser caracterizadas para determinar sus propiedades morfológicas, bioquímicas y genéticas. La caracterización morfológica se realiza mediante la observación de estructuras reproductivas, textura y coloración de colonias en medios de cultivo (Quisbert, 2017). El análisis microscópico permite diferenciar especies en función de la morfología de sus conidios y esporangios (Estrada et al., 2025). El análisis bioquímico implica la evaluación de la capacidad de los hongos para metabolizar compuestos específicos y resistir la presencia de metales pesados (Singh et al., 2021). Se han utilizado pruebas de crecimiento en presencia de distintos iones metálicos para determinar los límites de tolerancia de cada cepa (Liaquat et al., 2020). Para la identificación molecular, se emplea la secuenciación de regiones específicas del ADN ribosomal, como los genes ITS (Internal Transcribed Spacer) (Aljanabi; Martinez, 1997; Antil et al., 2023). Esta técnica permite una identificación precisa de los hongos aislados y su clasificación filogenética. En estudios recientes el análisis molecular ha permitido identificar nuevas cepas fúngicas resistentes a cromo hexavalente en suelos impactados por la industria, lo que resalta la importancia de estas metodologías en la biotecnología ambiental (Zha et al., 2024).

Aislamiento de hongos de suelos contaminados con As y Pb

El aislamiento de hongos microscópicos en suelos contaminados con metales pesados en Concepción del Oro, Zacatecas, permitió evaluar la efectividad de las técnicas microbiológicas utilizadas y generar una colección de cepas con potencial biotecnológico. El proceso experimental incluyó la aplicación de técnicas de aislamiento, la identificación de los hongos obtenidos, el análisis de su distribución espacial y la caracterización de su diversidad.

Para establecer una metodología eficiente de aislamiento, se emplearon técnicas de cultivo en medios selectivos, lo que permitió la obtención de colonias fúngicas puras a partir de suelos contaminados. La incubación de las muestras en medios PDA condujo a un crecimiento significativo de hongos, evidenciando la presencia de una microbiota activa en ambientes impactados por metales pesados. El uso de diferentes concentraciones de antibióticos y la optimización de las condiciones de incubación permitieron reducir la presencia de bacterias contaminantes, favoreciendo la proliferación de hongos filamentosos. Se observó que el tiempo de incubación influía en la diversidad de colonias recuperadas, con un aumento en la riqueza fúngica entre los 5 y 7 días de incubación (Figura 2). Lo anterior permitió la recuperación de un número considerable de hongos en suelos contaminados, proporcionando una base sólida para su posterior identificación y análisis taxonómico.

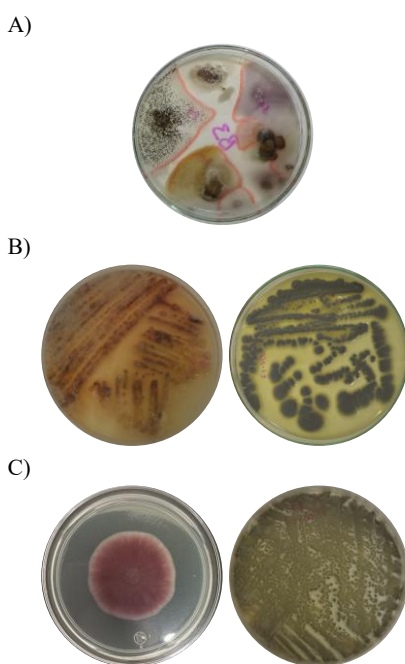


Figura 2. Proceso de aislamiento y mantenimiento de hongos a partir de suelos contaminados. La secuencia de imágenes ilustra las etapas clave en el aislamiento de hongos resistentes a metales pesados. (A) Siembra directa de suelo contaminado en medio selectivo PDA suplementado con antibióticos para favorecer el crecimiento fúngico y reducir la proliferación bacteriana. (B) Cepas fúngicas aisladas a partir de la siembra directa, cultivada mediante diluciones para su purificación. (C) Cultivos de las cepas para la obtención de conidias destinadas al mantenimiento y preservación del aislado. Fuente: los autores.

Con base en el aislamiento exitoso de hongos, se procedió a su identificación preliminar utilizando criterios morfológicos. Se registraron 57 cepas pertenecientes a 16 géneros distintos, predominando *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*. La caracterización macroscópica reveló variaciones en la textura, color y crecimiento de las colonias, lo que permitió diferenciar los aislamientos en función de sus rasgos fenotípicos. La microscopía óptica confirmó la presencia de estructuras reproductivas características de los géneros predominantes. En particular, se observaron esporangios en *Mucor*, conidióforos ramificados en *Aspergillus* y cadenas de conidios en *Penicillium*.

El análisis de la distribución de los aislamientos fúngicos en los distintos puntos de muestreo permitió identificar patrones que sugieren una relación entre la composición microbiana y el nivel de contaminación del suelo. *Aspergillus* y *Penicillium* fueron los géneros más frecuentemente aislados en varios puntos, lo que indica una alta capacidad de estos hongos para tolerar la presencia de metales pesados. En contraste, algunos géneros como *Fusarium* y *Paecilomyces* solo fueron encontrados en puntos específicos, lo que podría indicar que ciertas especies requieren condiciones ambientales particulares o poseen una tolerancia diferencial a los metales. Lo anterior dio pie a la caracterización de la diversidad microbiana, permitiendo analizar qué grupos fúngicos dominan en suelos contaminados con As y Pb.

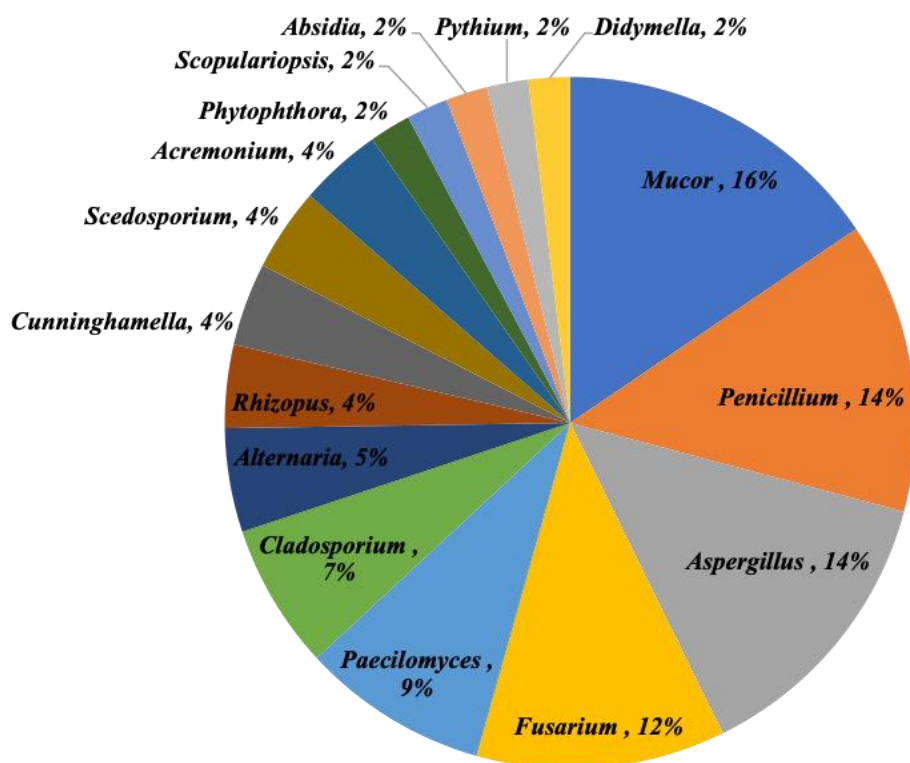


Figura 3. Porcentaje de los géneros identificados en la caracterización morfológica macro y microscópica. Fuente: los autores.

El análisis de la diversidad fúngica en suelos contaminados mostró que los géneros predominantes fueron *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* y *Fusarium*, todos ellos ampliamente reportados en la literatura por su capacidad de resistir y transformar metales pesados (Figura. 3). La abundancia relativa de estos hongos

sugiere que han desarrollado mecanismos de adaptación a la presencia de As y Pb en el suelo, lo que los convierte en candidatos prometedores para futuros estudios de biorremediación. La riqueza fúngica en los sitios muestreados indica que la microbiota del suelo puede estar desempeñando un papel clave en la mitigación de la toxicidad de los metales. Especies de *Penicillium* y *Aspergillus* han sido ampliamente reportadas como bioadsorbentes de Pb y Cr, mientras que algunos estudios han demostrado que *Mucor* puede bioacumular As en su biomasa, reduciendo así su biodisponibilidad. Con esta información, se confirma la relevancia de los hongos aislados en este estudio para futuras aplicaciones biotecnológicas en biorremediación.

Potencial biotecnológico de los hongos aislados en biorremediación

Los hongos resistentes a metales pesados han cobrado gran relevancia debido a sus múltiples funciones en sectores como la biorremediación, la síntesis de nanopartículas, la producción de enzimas industriales y la bioingeniería. Esta versatilidad los posiciona como una herramienta clave en el desarrollo de soluciones sostenibles frente a la contaminación ambiental (Figura. 4).

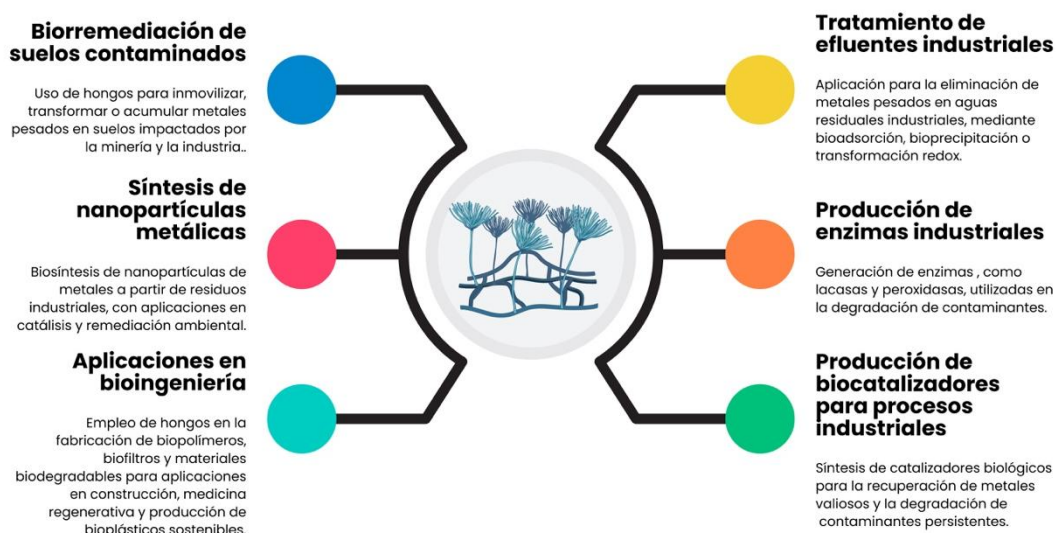


Figura 4. Aplicaciones biotecnológicas de los hongos en la industria y el medio ambiente. Esquema ilustrativo que muestra las principales aplicaciones de los hongos resistentes a metales pesados en diversos sectores. Fuente: los autores.

Los hongos tienen un papel destacado en la biorremediación de suelos y aguas contaminadas con Pb, As y Cr, gracias a su capacidad de tolerar y transformar estos metales en formas menos tóxicas (Goutam et al., 2020; Ray et al., 2023; Akimbekov et al., 2022). Este potencial se debe a mecanismos como la bioadsorción, biomineralización y transformación redox (Abd et al., 2023). La bioadsorción permite que los metales se adhieran pasivamente a la pared celular fúngica mediante interacciones físico-químicas (Sultan; Hag, 2022). Por ejemplo, *A. niger* y *Penicillium chrysogenum* han mostrado capacidad para retener Pb y Cr en concentraciones elevadas (Rigoletto et al., 2020; Xu et al., 2022; Cyriac et al., 2022). En la biomineralización, hongos como *Fusarium* transforman metales en estructuras insolubles como el

arseniato de calcio, reduciendo su toxicidad (Gadd, 2021; Chaurasia et al., 2023). Algunos hongos también ejecutan procesos redox, como la reducción del Cr^{6+} a Cr^{3+} , menos tóxico. *Trichoderma harzianum* ha demostrado esta capacidad al producir metabolitos reductores (Dwivedi, 2023; Lizardi-Jiménez et al., 2023; Hussain; Mutlag, 2021). Los estudios demuestran que especies como *Aspergillus flavus* y *Penicillium* pueden inmovilizar Pb en suelos mineros contaminados, reduciendo su movilidad mediante la formación de complejos orgánicos (El-Mahdy et al., 2021; Shan et al., 2023; Canonica et al., 2024). Además, el uso combinado de hongos y bacterias, como *Pseudomonas*, ha demostrado mayor eficiencia en la remediación de Cr (Zhang; Zhang, 2022; Kuanar et al., 2022). Más allá de la remediación, estos hongos se aplican en la síntesis de nanopartículas metálicas, como las producidas por *Aspergillus terreus* a partir de residuos industriales (Salem; Fouda, 2021; Rai et al., 2022; Nakhjiri et al., 2022). También se emplean en la producción de enzimas industriales, como las sintetizadas por *Trichoderma*, útiles en el tratamiento de efluentes y fabricación de biopolímeros (Ghosh et al., 2023; Kidwai et al., 2022).

El desarrollo de estas tecnologías requiere enfoques multidisciplinarios y el fortalecimiento de capacidades analíticas. La identificación de cepas con alta resistencia a metales y la aplicación de herramientas como la bioinformática y la ingeniería ambiental son fundamentales para escalar estas soluciones (Chen et al., 2022). Finalmente, aunque la eficacia de los hongos en biorremediación ha sido probada, su implementación enfrenta retos técnicos, regulatorios y económicos, especialmente en zonas mineras donde la contaminación por metales pesados es crítica. Superar estas barreras es clave para impulsar su adopción a nivel industrial (Medfu et al., 2020; Warhurst, 2024; Saravanan et al., 2022).

Limitaciones y avances en el aislamiento de microorganismos para biorremediación

El aislamiento y caracterización de hongos con potencial para la biorremediación es una estrategia clave en el manejo de suelos y aguas contaminadas con metales pesados. Sin embargo, este proceso enfrenta desafíos importantes tanto en condiciones de laboratorio como en la implementación a escala industrial (Tabla 2).

Uno de los principales retos en la biorremediación es la dificultad para mantener el crecimiento de microorganismos tolerantes a metales pesados bajo condiciones controladas. Aunque especies como *Fusarium* y *Aspergillus* han demostrado alta capacidad de acumulación de arsénico, su rendimiento puede verse comprometido fuera del entorno natural debido a la pérdida de presión selectiva, lo que reduce su eficiencia de bioadsorción (Chaurasia et al., 2023). Esto resalta la necesidad de optimizar medios de cultivo y protocolos de preservación para mantener la funcionalidad de los microorganismos aislados.

La identificación de especies con potencial biorremediador también representa un desafío. Las técnicas convencionales, basadas en morfología o pruebas bioquímicas, no siempre permiten distinguir entre especies relacionadas o detectar adaptaciones específicas. Herramientas moleculares como la secuenciación de regiones ITS del ADN ribosomal han mejorado la precisión taxonómica, aunque su alto

costo y los requerimientos técnicos limitan su uso en muchos laboratorios (Kashyap et al., 2020). Invertir en infraestructura analítica resulta fundamental para avanzar en biotecnología ambiental.

Tabla 2. Principales barreras en la implementación de la biorremediación y posibles soluciones. Fuente: los autores.

Barrera	Descripción	Soluciones Propuestas
Dificultad en el aislamiento y cultivo de microorganismos resistentes.	Los hongos pierden eficiencia en laboratorio por falta de presión selectiva.	Optimización de medios de cultivo y simulación de condiciones ambientales.
Alto costo de identificación molecular.	Técnicas como secuenciación de ADN son costosas y requieren infraestructura especializada.	Desarrollo de métodos de detección más accesibles y financiamiento para laboratorios ambientales.
Escalabilidad limitada de la biorremediación in situ.	Difícil aplicación a gran escala por falta de estabilidad de los microorganismos.	Desarrollo de formulaciones microbianas estables y consorcios microbianos.
Restricciones regulatorias sobre OGMs en biorremediación.	Limitaciones legales para el uso de microorganismos genéticamente modificados.	Regulaciones flexibles basadas en estudios de impacto ambiental y seguridad.
Percepción pública negativa sobre el uso de microorganismos.	Desconfianza en el uso de biotecnología para la recuperación ambiental.	Educación y divulgación científica sobre los beneficios de la biorremediación.

En cuanto a la implementación de biorremediación en campo, los principales obstáculos incluyen los costos de producción de biomasa microbiana, la necesidad de formulaciones estables y las limitaciones regulatorias. Aunque la biorremediación *in situ* ofrece ventajas sostenibles (Perez-Vazquez et al., 2024), aún se requiere desarrollo tecnológico para garantizar la viabilidad de los microorganismos bajo condiciones ambientales cambiantes. La preferencia por métodos fisicoquímicos más inmediatos también limita la adopción de estrategias microbianas.

Otro aspecto crítico es la regulación ambiental respecto al uso de organismos genéticamente modificados (OGMs). Si bien se han desarrollado cepas fúngicas con capacidad mejorada para transformar metales (Kumar et al., 2020b), su uso sigue restringido por marcos normativos (Wesseler et al., 2023). A esto se suma la percepción negativa de la sociedad hacia el empleo de microorganismos en procesos de descontaminación (Derman, 2025). Por ello, es necesario fomentar estudios de impacto y campañas de divulgación científica para aumentar la aceptación pública.

El avance de las tecnologías ómicas ha permitido una caracterización más profunda de los microorganismos presentes en suelos contaminados. La metagenómica, transcriptómica y proteómica ofrecen información sobre las capacidades genéticas y funcionales de comunidades microbianas (Singh et al., 2020), lo que facilita la selección de cepas con alto potencial biorremediador. Por ejemplo, se ha identificado mediante metagenómica la presencia de genes asociados a la reducción de cromo hexavalente (Singh et al., 2022), mientras que estudios transcriptómicos han revelado la expresión de genes implicados en la bioadsorción de plomo en cepas de *Aspergillus* (El-Mahdy et al., 2021).

Además, el desarrollo de biofilms microbianos representa una estrategia prometedora para aumentar la eficacia de la biorremediación. Estas estructuras ofrecen mayor resistencia a condiciones adversas y una capacidad mejorada de inmovilización de metales. Ensayos con biofilms de *Trichoderma* y *Bacillus* han demostrado buenos resultados en la estabilización de As en suelos contaminados (Santoyo et al., 2024).

Por último, los sistemas bioelectroquímicos emergen como una innovación atractiva para tratar aguas contaminadas con metales. Estos sistemas utilizan microorganismos electrogénicos para inducir reacciones redox que convierten metales en formas menos tóxicas, abriendo nuevas vías para una biorremediación más eficiente y adaptable (Wang et al., 2022).

CONCLUSIONES

Las evidencias presentadas en este trabajo sugieren que los ambientes contaminados con metales pesados representan nichos ecológicos relevantes para la identificación de hongos con adaptaciones fisiológicas de interés biotecnológico. A partir de la revisión teórica y del estudio de caso, se destaca que el aislamiento de cepas fúngicas autóctonas no solo es viable, sino estratégico para el desarrollo de tecnologías de biorremediación ajustadas a condiciones locales. La diversidad de géneros identificados (incluyendo *Mucor*, *Penicillium*, *Aspergillus* y *Fusarium*) sugiere que la presión selectiva ejercida por los contaminantes puede favorecer la presencia de microorganismos con mecanismos específicos de tolerancia y transformación de metales. Asimismo, la integración de metodologías tradicionales de cultivo con herramientas moleculares y enfoques ómicos abre nuevas perspectivas para mejorar la caracterización funcional de estos organismos. El aprovechamiento de este potencial requiere consolidar capacidades técnicas en laboratorios locales, establecer vínculos entre la investigación y su aplicación práctica, y fomentar una visión crítica y contextualizada sobre el papel de los hongos en la biotecnología ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd, E. M. K., et al. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7), 580.
- Akimbekov, N. S., et al. (2022). Biotechnology of microorganisms from coal environments: From environmental remediation to energy production. *Biology*, 11(9), 1306.

- Aljanabi, S. M., & Martinez, I. (1997). Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques. *Nucleic Acids Research*, 25(22), 4692–4693.
- Alvarez, C. C., et al. (2021). Hexavalent chromium: Regulation and health effects. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 65, 126729.
- Antil, S., et al. (2023). DNA barcoding, an effective tool for species identification: A review. *Molecular Biology Reports*, 50(1), 761–775.
- Bala, S., et al. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: A review for a green and sustainable environment. *Toxics*, 10(8), 484.
- Bouida, L., et al. (2022). A review on cadmium and lead contamination: Sources, fate, mechanism, health effects and remediation methods. *Water*, 14(21), 3432.
- Briseño-Bugarín, J., et al. (2024). Lead (Pb) pollution in soil: A systematic review and meta-analysis of contamination grade and health risk in Mexico. *Environments*, 11(3), 43.
- Canonica, L., et al. (2024). Fungal arsenic tolerance and bioaccumulation: Local strains from polluted water vs. allochthonous strains. *Environments*, 11(1), 23.
- Ceci, A., et al. (2020). Fungi and arsenic: Tolerance and bioaccumulation by soil saprotrophic species. *Applied Sciences*, 10(9), 3218.
- Chandra, R., & Banik, A. (2021). Detoxification and bioconversion of arsenic and chromium. In *Nanobiotechnology* (pp. 253–270). Elsevier.
- Chaurasia, P. K., et al. (2023). Fungal assisted bio-treatment of environmental pollutants with comprehensive emphasis on noxious heavy metals: Recent updates. *Biotechnology and Bioengineering*, 120(1), 57–81.
- Chen, L., et al. (2022). Removal of heavy-metal pollutants by white rot fungi: Mechanisms, achievements, and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 354, 131681.
- Covarrubias, S. A., & Cabriaes, J. J. P. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7–21.
- Cyriac, S., et al. (2022). Biosorption of hexavalent chromium using fungal strains isolated from soil. *Kristu Jayanti Journal of Core and Applied Biology (KJCAB)*, 1–9.
- De Wet, M. M. M., & Brink, H. G. (2021). Fungi in the bioremediation of toxic effluents. In *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-Technology* (pp. 407–431). Academic Press.
- Derman, M. (2025). Isolation of yeasts from different fruits and students' opinion about microorganisms: Inquiry-based learning. *Research in Science and Technological Education*, 43(1), 230–250.
- Dwivedi, S. K. (2023). Fungi mediated detoxification of heavy metals: Insights on mechanisms, influencing factors and recent developments. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103800.

- Elhamouly, N. A., et al. (2022). The hidden power of secondary metabolites in plant-fungi interactions and sustainable phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1044896.
- El-Mahdy, O. M., et al. (2021). Biosorption effect of *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysosporium* for Cd- and Pb-contaminated soil and their physiological effects on *Vicia faba* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(47), 67608–67631.
- Estrada, M., et al. (2025). Aislamiento e identificación de la micobiota de suelos dedicados al cultivo de tomate en Azuero. *Ciencia Agropecuaria*, (40), 100–124.
- Firincă, C., et al. (2023). Microbial removal of heavy metals from contaminated environments using metal-resistant indigenous strains. *Journal of Xenobiotics*, 14(1), 51–78.
- Flores-Amaro, O. A., et al. (2024). Characterization and evaluation of the bioremediation potential of *Rhizopus microsporus* Os4 isolated from arsenic-contaminated soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(8), 529.
- Gadd, G. M. (2021). Fungal biomineralization. *Current Biology*, 31(24), R1557–R1563.
- Gamba, L. D. F., & Rojas, M. N. (2024). Alternativas para la puesta en marcha de una planta de tratamiento de aguas residuales en una empresa de galvanotecnia. Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
- Ghosh, S., et al. (2023). Filamentous fungi for sustainable remediation of pharmaceutical compounds, heavy metal and oil hydrocarbons. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1106973.
- Goutam, J., et al. (2021). Fungal-mediated bioremediation of heavy metal-polluted environment. In *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment: Volume 2* (pp. 51–76).
- Gupta, S. (2022). Effect of arsenic on human health and possible prevention. Index/AZwH \$ _oUH \$ m. [Nota: Verificar fonte e formatação]
- Guzmán-Moreno, J., et al. (2022). *Bacillus megaterium* HgT21: A promising metal multiresistant plant growth-promoting bacteria for soil bioremediation. *Microbiology Spectrum*, 10(5), e00656-22.
- Häder, D. P., et al. (2020). Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications. *Science of the Total Environment*, 713, 136586.
- Haripersad, K. (2022). Isolation, identification, and characterisation of fungi from a platinum mine. Master's thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg (South Africa).
- He, N., et al. (2022). Remediation of chromium, zinc, arsenic, lead and antimony contaminated acidic mine soil based on *Phanerochaete chrysosporium*-induced phosphate precipitation. *Science of the Total Environment*, 850, 157995.
- Hussain, D. F., & Mutlag, N. H. (2021). Assessment the ability of *Trichoderma harzianum* fungi in bioremediation of some of heavy metals in waste water. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 790, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.
- Hussain, K., et al. (2025). Subject: Trophic transfer and bioaccumulation of Cr (VI) in soil–*Vicia faba* L.–aphid (*Acyrtosiphon pisum*)–ladybird (*Harmonia axyridis*) food chain: Ecotoxicological implications

- for agricultural ecosystems. Available at SSRN 5155775. Jee HK et al. (2024). Immobilization of manganese in solution and soil contaminated with trivalent chromium using biochars. *Applied Biological Chemistry*, 67(1), 118.
- Jeyakumar, P., et al. (2023). Trends in bioremediation of heavy metal contaminations. *Environmental Engineering Research*, 28(4).
- Kashyap, S. K., et al. (2020). Ribotyping: A tool for molecular taxonomy. In *Animal Biotechnology* (pp. 373–394). Academic Press.
- Kidwai, M. K., et al. (2022). Bioremediation potential of *Trichoderma* species for metal(loid)s. In *Bioremediation of toxic metal(loid)s* (pp. 137–152). CRC Press.
- Kuanar, A., et al. (2022). A comparative review on bioremediation of chromium by bacterial, fungal, algal and microbial consortia. *Geomicrobiology Journal*, 39(6), 515–530.
- Kumar, A., et al. (2021). Arsenic exposure in Indo Gangetic plains of Bihar causing increased cancer risk. *Scientific Reports*, 11(1), 2376.
- Kumar, M., et al. (2020a). Arsenic contamination in environment, ecotoxicological and health effects, and bioremediation strategies for its detoxification. In *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety: Volume I: Industrial Waste and Its Management* (pp. 245–264).
- Kumar, R. S., et al. (2020b). Biodegradation of environmental pollutant through pathways engineering and genetically modified organisms approaches. In *Microorganisms for Sustainable Environment and Health* (pp. 137–165). Elsevier.
- Kumar, V., & Dwivedi, S. K. (2021). Mycoremediation of heavy metals: Processes, mechanisms, and affecting factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 10375–10412.
- Li, R., et al. (2022). Application of biochar immobilized microorganisms for pollutants removal from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*, 837, 155563.
- Liaquat, F., et al. (2020). Evaluation of metal tolerance of fungal strains isolated from contaminated mining soil of Nanjing, China. *Biology*, 9(12), 469.
- Liu, Q., et al. (2024). Enrichment characteristics of Cd and Hg and regulation of heavy metal transporter signaling in *Pleurotus ostreatus*. *Science of The Total Environment*, 955, 176909.
- Lizardi-Jiménez, M. A., et al. (2023). The degradation of an aromatic organic compound by *Aspergillus niger* var. *tubingensis* Ed8 produces metabolites that reduce Cr(VI). *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 21(4), 473–480.
- Maldaner, J., et al. (2021). Tolerance of *Trichoderma* isolates to increasing concentrations of heavy metals. *International Journal of Environmental Studies*, 78(2), 185–197.
- Maqsood, Q., et al. (2022). Novel strategies and advancement in reducing heavy metals from the contaminated environment. *Archives of Microbiology*, 204(8), 478.
- Martínez-Aldape, P. A., et al. (2024). Bioprospection of bacterial strains from chromite process industry residues from Mexico for potential remediation. *Applied Microbiology*, 4(2), 665–681.

- Medfu, T. M., et al. (2020). Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 1783174.
- Mitra, S., et al. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*, 34(3), 101865.
- Nakhjiri, A. T., et al. (2022). Recovery of precious metals from industrial wastewater towards resource recovery and environmental sustainability: A critical review. *Desalination*, 527, 115510.
- NOM-021-RECNAT-2000. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación: México.
- Osuna-Martínez, C. C., et al. (2021). Arsenic in waters, soils, sediments, and biota from Mexico: An environmental review. *Science of The Total Environment*, 752, 142062.
- Pathak, S., et al. (2024). An overview of physical and chemical methods of heavy metal removal from wastewater. In *Heavy Metal Contamination in the Environment* (pp. 203–216).
- Patra, J. K., et al. (2020). Isolation, culture, and biochemical characterization of microbes. In *A Practical Guide to Environmental Biotechnology* (pp. 83–133).
- Pérez, M. E. L. (2020). Estudio de microorganismos resistentes a arsénico obtenidos del metagenoma de suelos del Estado de Guanajuato.
- Perez-Vazquez, A., et al. (2024). In situ and ex situ bioremediation of different persistent soil pollutants as agroecology tool. *Processes*, 12(10), 2223.
- Priya, A. K., et al. (2022). Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. *Chemosphere*, 307, 135957.
- Qadir, M., et al. (2022). Comparative assessment of chromate bioremediation potential of *Pantoea conspiciua* and *Aspergillus niger*. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127314.
- Quisbert, F. P. (2017). Micología en Bolivia: un tema latente. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 8(1), 1.
- Rafique, M., et al. (2022). A review on sources of heavy metals, their toxicity and removal technique using physico-chemical processes from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 16772–16781.
- Rahman, Z., & Singh, V. P. (2020). Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: Concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 27563–27581.
- Rai, M., et al. (2022). Industrial applications of nanomaterials produced from *Aspergillus* species. In *The Genus Aspergillus – Pathogenicity, Mycotoxin Production and Industrial Applications*. IntechOpen.
- Raju, N. J. (2022). Arsenic in the geo-environment: A review of sources, geochemical processes, toxicity and removal technologies. *Environmental Research*, 203, 111782.

- Ray, M. K., et al. (2023). Mycoremediation of heavy metals and/or metalloids in soil. In *Land Remediation and Management: Bioengineering Strategies* (pp. 161–190). Springer Nature Singapore.
- Rigoletto, M., et al. (2020). Bioremediation methods for the recovery of lead-contaminated soils: A review. *Applied Sciences*, 10(10), 3528.
- Salem, S. S., & Fouda, A. (2021). Green synthesis of metallic nanoparticles and their prospective biotechnological applications: An overview. *Biological Trace Element Research*, 199(1), 344–370.
- Sales da Silva, I. G., et al. (2020). Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*, 13(18), 4664.
- Santoyo, G., et al. (2024). Trichoderma and Bacillus multifunctional allies for plant growth and health in saline soils: Recent advances and future challenges. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1423980.
- Saravanan, A., et al. (2022). Removal of toxic heavy metals using genetically engineered microbes: Molecular tools, risk assessment and management strategies. *Chemosphere*, 298, 134341.
- Sarker, A., et al. (2023). Biological and green remediation of heavy metal contaminated water and soils: A state-of-the-art review. *Chemosphere*, 332, 138861.
- Schlögl, S., et al. (2023). Use of industrial residues for heavy metals immobilization in contaminated site remediation: A brief review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 2313–2326.
- Senanayake, I. C., et al. (2020). Morphological approaches in studying fungi: Collection, examination, isolation, sporulation and preservation. *Mycosphere*, 11(1), 2678–2754.
- Shan, B., et al. (2021). A review on mechanism of biomineralization using microbial-induced precipitation for immobilizing lead ions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(24), 30486–30498.
- Shan, B., et al. (2023). Microbial remediation mechanisms and applications for lead-contaminated environments. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(2), 38.
- Shi, Y., et al. (2023). Resistance mechanisms and remediation potential of hexavalent chromium in *Pseudomonas* sp. strain AN-B15. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 250, 114498.
- Shvachiy, L., et al. (2020). Persistent effects on cardiorespiratory and nervous systems induced by long-term lead exposure: Results from a longitudinal study. *Neurotoxicity Research*, 37, 857–870.
- Singh, A., et al. (2021). Fungal secondary metabolites for bioremediation of hazardous heavy metals. In *Recent Trends in Mycological Research: Volume 2: Environmental and Industrial Perspective* (pp. 65–98).
- Singh, B. R., & Steinnes, E. (2020). Soil and water contamination by heavy metals. In *Soil Processes and Water Quality* (pp. 233–271). CRC Press.
- Singh, D., et al. (2020). Omics (genomics, proteomics, metabolomics, etc.) tools to study the environmental microbiome and bioremediation. In *Waste to Energy: Prospects and Applications* (pp. 235–260).

- Singh, N., et al. (2022). Metagenomic analysis of garden soil-derived microbial consortia and unveiling their metabolic potential in mitigating toxic hexavalent chromium. *Life*, 12(12), 2094.
- Sonone, S. S., et al. (2020). Water contamination by heavy metals and their toxic effect on aquaculture and human health through food chain. *Letters in Applied NanoBioScience*, 10(2), 2148–2166.
- Sultan, I., & Hag, Q. M. R. (2022). Bacterial mechanisms for remediation. In *Bioremediation of Toxic Metal(loid)s* (pp. 115–136). CRC Press.
- Talamantes, G. K. A. (2024). Desarrollo de metodologías analíticas para detectar la presencia de compuestos orgánicos y metales pesados en el agua de una zona agrícola semiárida (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Chihuahua).
- Taneja, S., et al. (2023). Soil–water interactions and arsenic enrichment in groundwater. In *Hydrogeochemistry of Aquatic Ecosystems* (pp. 97–120).
- Tomer, A., et al. (2021). Role of fungi in bioremediation and environmental sustainability. In *Mycoremediation and Environmental Sustainability: Volume 3* (pp. 187–200).
- Wang, S., et al. (2022). Bioelectrochemical systems-based metal removal and recovery from wastewater and polluted soil: Key factors, development, and perspective. *Journal of Environmental Management*, 317, 115333.
- Wani, A. K., et al. (2022). Microbial adaptation to different environmental conditions: Molecular perspective of evolved genetic and cellular systems. *Archives of Microbiology*, 204(2), 144.
- Warhurst, A. (2024). *Environmental policy in mining: Corporate strategy and planning*. Taylor & Francis.
- Wesseler, J., et al. (2023). EU regulation of genetically modified microorganisms in light of new policy developments: Possible implications for EU bioeconomy investments. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 45(2), 839–859.
- Xia, Y., et al. (2020). Inmovilización eficiente de metales pesados tóxicos en suelos agrícolas multicontaminados mediante hidrocarbón aminofuncionalizado: Rendimiento, respuesta de las plantas y mecanismos de inmovilización. *Environmental Pollution*, 261, 114217.
- Xu, J., et al. (2022). Adsorption characteristics of indigenous chromium-resistant *Aspergillus niger* strain isolated from red soil for remediation of toxic chromium in red soil environments. *Toxics*, 11(1), 31.
- Zha, S., et al. (2024). Microbial strategies for effective hexavalent chromium removal: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 489, 151457.
- Zhang, T., & Zhang, H. (2022). Microbial consortia are needed to degrade soil pollutants. *Microorganisms*, 10(2), 261.
- Zhang, X., et al. (2024). Migration, transformation of arsenic, and pollution controlling strategies in paddy soil-rice system: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 175500.

Políticas desarticuladas sobre cuencas, manglares y pesca: impactos regionales y respuestas comunitarias desde El Topón, Pijijiapan, Chiapas

Recibido em: 18/05/2025

Aprobado em: 22/05/2025

 10.46420/9786585756563cap18

Cristian Tovilla Hernández 

Emilio Ismael Romero Berny 

Víctor Manuel Velázquez Durán* 

María Raimunda Araújo Santana 

INTRODUCCIÓN

Los manglares son ecosistemas singulares, distribuidos en las regiones tropicales del mundo. Albergan comunidades notables de flora y fauna, con un valor medioambiental, económico y social fundamental para las sociedades humanas a nivel global (Field, 1999). Además de la relevancia ecológica, los manglares ofrecen múltiples bienes y servicios ecosistémicos que benefician directamente a las poblaciones humanas. Como la estabilización de la línea costera, el funcionamiento como criaderos de recursos pesqueros de alto valor económico y el suministro de productos como madera, leña y carbón (Yañez y Lara, 1999). Se estima que hasta el 75% de todas las especies de peces comerciales tropicales utilizan los manglares en alguna etapa de su ciclo de vida (Kauffman y Donato, 2012). El carbono almacenado en los diferentes reservorios de los manglares ha captado la atención de la comunidad científica internacional (Leal y Spalding, 2024). Existe un consenso entre científicos, autoridades gubernamentales, instituciones diversas y las comunidades locales sobre la necesidad de conservar estos ecosistemas, su desaparición continua a un ritmo alarmante de entre dos y cinco veces más rápido que otros tipos de ecosistemas (Vargas y Brenner, 2024). En el caso de México, por ejemplo, de una superficie original cercana al millón de hectáreas, más del 30% ha sido deforestada como resultado de la expansión del cambio de uso del suelo (Valderrama et al., 2017).

El estado de Chiapas durante varias décadas ha experimentado la falta políticas públicas sólidas para la gestión de los humedales costeros, debido a que el diseño y forma de implementación de estas políticas, en aras de acelerar el desarrollo económico y asistencialismo social, han generado una serie de efectos negativos sobre los humedales costeros, siendo los manglares y los sistemas lagunares, los más afectados (Brenner, 2018). Los manglares y lagunas costeras, ubicados en la porción baja de las cuencas

* Autor correspondiente: victor.velazquez@guest.ecosur.mx

de drenaje, son ecosistemas sensibles a desequilibrios provocados por el aporte de sedimentos y nutrientes, haciéndolos vulnerables a impactos antropogénicos y fenómenos naturales (Gómez et al., 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio de caso se realizó en la Ranchería El Topón, situada a 12.1 kilómetros al noroeste de Pijijiapan, con coordenadas geográficas de $15^{\circ} 35' 16.946''$ de latitud norte y $-93^{\circ} 15' 35.524''$ de longitud oeste, a una altitud de 5 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). Según el Censo de Población y Vivienda 2020, la población total de esta localidad es de 405 habitantes, 206 mujeres (50.87%) y 199 hombres (49.13%), es la comunidad costera más poblada del municipio. El promedio de escolaridad es de 5.8 años, siendo el 10% de la población analfabeta. La población de esta comunidad depende de la pesca, agricultura y ganadería. El 56.05 % de la población mayor de 12 años se encuentra ocupada laboralmente, con una distribución por género de 69.85% en hombres y 42.72% mujeres (INEGI, 2020). La comunidad cuenta con una Sociedad Cooperativa denominada “Los Agostaderos de Topón”, constituida por más de 100 socios y seis son mujeres.

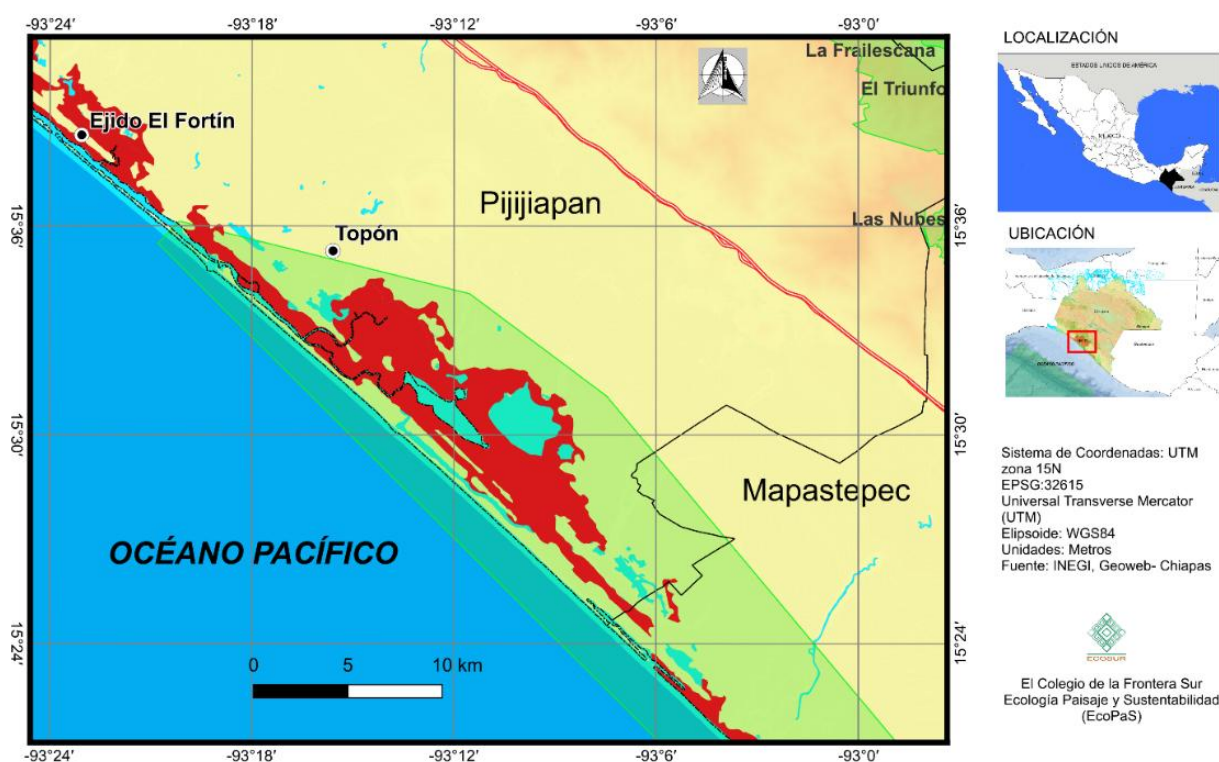


Figura 1. Ubicación de Ranchería Topón, municipio de Pijijiapan, Chiapas (CEIEG, 2020).

Procedimiento metodológico

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica en los repositorios gubernamentales y académicos, para conocer el estado actual de los manglares en el estado de Chiapas, con énfasis en la historia de los cambios en la vegetación, medidas de protección e impactos. Esta revisión permitió identificar las principales directrices, sectores involucrados (ambiental, socioeconómico y territorial) e instrumentos legales que definieron las acciones relevantes e impactos sobre los manglares y la sustentabilidad pesquera. Los hallazgos fueron sistematizados en una matriz de análisis, considerando cinco periodos históricos: 1950s–1970s, 1980s, 1990s, 2000s y 2010s–2020s, lo que permitió conocer las diferencias en cada etapa. Se estimó las dinámicas de impacto en manglares y recursos pesqueros a través de indicadores específicos. Para el caso de los manglares, se revisó la información disponible en el Portal de Geoinformación del SNIB–Monitoreo de Manglares (CONABIO, 2025), correspondiente a las ganancias y pérdidas de cobertura de manglar (hectáreas) en los Sitios de Manglar con Relevancia Biológica y Necesidades de Rehabilitación Ecológica del estado de Chiapas: PS24–La Encrucijada, PS25–La Joya, PS27–Cabildo–Amatal–Gancho Murillo, y PS28–Los Patos–Sólo Dios. Se analizaron las tendencias entre 1972–2020.

Para el caso de los recursos pesqueros, se utilizó como indicador proxy a los camarones Peneidos, considerando su importancia comercial y ecológica en el área. Las tendencias de captura entre 1996 y 2023 se analizaron a partir de los volúmenes de captura total (toneladas) reportados para Chiapas en los Anuarios Estadísticos de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA, 2025a). Los volúmenes correspondientes a los sistemas lagunares se estimaron aplicando un factor de conversión de 0.65 a las capturas totales, el cual fue calculado con base en reportes de avisos de arribo de las flotas de altamar y ribereña para el periodo 1995–2002 (Orozco, 2004).

Entre abril-junio de 2024 se aplicaron 41 encuestas a pescadores de la comunidad de Topón, para identificar los impactos de las políticas sobre las cuencas hidrográficas, conservación y pesca en el desarrollo de las actividades productivas en el sistema lagunar. Esta recolección de datos permitió identificar las principales problemáticas y necesidades de los pescadores, así como caracterizar la organización del sistema productivo pesquero de la comunidad. También se recopilaron datos sobre aspectos de gobernanza, salud y seguridad alimentaria. A partir del panorama regional de las directrices políticas de manejo y los impactos, se analizaron las estrategias comunitarias para la conservación del entorno socio-ecosistémico cuenca-manglar-pesca desarrolladas por la Sociedad Cooperativa de Bienes y Servicios Agostaderos de Topón, en el municipio de Pijijiapan, Chiapas. Estas estrategias fueron caracterizadas a partir de tres instrumentos de vinculación:

Asimismo, se aplicó de métodos participativos (Banerjee et al., 2024), mediante la realización del taller sobre “Sistemas de Manglares frente al Cambio climático: estrategias comunitarias para la conservación”, durante los días 11 y 12 de octubre de 2024, en la Cooperativa Pesquera de Topón. En el taller participaron 33 personas, entre pescadores, representantes del Ayuntamiento de Pijijiapan, personal de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada (REBIEN) y académicos. Finalmente, se realizó un

diagnóstico de los parámetros fisicoquímicos y la batimetría del suelo y agua dentro del polígono de la cooperativa pesquera en febrero de 2025.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estado actual de los bosques de mangle en el estado de Chiapas

En Chiapas, existe una cantidad considerable de información acerca de las características ecológicas, e impactos sobre los manglares, aunque los datos referentes a la dinámica socioeconómica son aún escasos, lo que es una limitante para el desarrollo de estrategias que promuevan el manejo integral de las cuencas, los humedales, la zona costera y sus recursos, bajo la premisa de la conservación, manejo y restauración (Machuca 2014; Tovilla et al., 2007).

Los manglares de Chiapas se caracterizan por estar sometidos a una marcada estacionalidad ambiental, la cual determina dos subregiones: Istmo-Costa (IC) desde el límite con el estado de Oaxaca hasta la costa de los municipios de Arriaga, Tonalá y Pijijiapan y el Soconusco (S), con los municipios de Mapastepec, Acapetahua, Villa Comaltitlán, Huixtla, Mazatán, Tapachula y Suchiate, esta última con precipitaciones de 2250 a 3100 mm/año, y con mayor aporte fluvial. La especie dominante en la mayor parte de la subregión S es *Rhizophora mangle*, mientras que al norte de esta los rodales de *Laguncularia racemosa* son dominantes y están asociados a precipitaciones de 1400-1600 mm/año. En la subregión IC, los rodales de *Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus* son extensos, en donde ocurren precipitaciones de 800-1300 (Tovilla et al., 2007; 2018; Santamaría 2014).

Los inventarios del manglar realizados por Tovilla et al. (2007); Tovilla et al. (2018) en la costa de Chiapas, revelan que el mayor desarrollo estructural se encuentra en la subregión S, con los mayores valores de altura y área basal en los sistemas de El Castaño-Chantuto, Hueyate-Panzacola y en las Barras de San José y San Simón en la REBIEN (altura media >20 m, área basal 38.6-61.6 m²/ha). Por otro lado, un menor desarrollo estructural se ha estimado en sistemas de la subregión IC, como lo son Mar Muerto y La Joya-Buenavista (altura media 6.8-12.4 m, área basal 21.1-25.2 m²/ha). Estudios sobre producción de hojarasca se han llevado a cabo por Salas (2021) en la REBIEN (1100.6 gr/m². año⁻¹), mientras que el carbono aéreo se ha estimado en 87.0 Mg C ha⁻¹ por Velázquez et al., (2019), mientras que Adame et al. (2015), estimó un stock total de carbono en manglares de 784.5 Mg C ha⁻¹.

Historia de los cambios de la vegetación de manglar y su protección en la costa de Chiapas

En esta entidad, actualmente existen una 46,996 has de manglar, aunque es probable que esta extensión superara las 56,000 ha entre 1950 y 1960. Esta vegetación ha tenido cambios significativos en los últimos 45 años, cubriendo 53,901 ha en 1972 y reduciéndose a 44,598 ha en 2005, aunque incrementándose a 46, 876 ha en 2010 (Valderrama et al., 2017). Del total de manglares en la entidad, solo 32,652 has, se encuentran protegidas. Existen tres Áreas Naturales Protegidas (ANP), la ANP más grande es la REBIEN, con 144, 868 has., en los municipios de Mazatán, Huehuetán, Huixtla, Villa

Comaltilán, Acapetahua, Mapastepec y Pijijiapan. En la parte sur en los municipios de Suchiate y Tapachula, existen dos ANP estatales: “El Gancho-Murillo” con 4,466 hectáreas y “Cabildo Amatal” con 3,269, para un total de 7,735 (Pulido y Tovilla, 2003).

Principales impactos sobre los manglares de Chiapas

Los impactos más notables en manglares son los de origen antrópico y son generados principalmente por el mal manejo de las cuencas y el cambio de uso del suelo, a partir de políticas públicas equivocadas. Se han originado impactos notables a partir de la “rectificación” de los ríos, el azolvamiento de las lagunas costeras, los dragados, la desecación y modificación de los flujos de agua, así como por los incendios, la deforestación y la contaminación por plaguicidas, entre otros.

Rectificación de los ríos. Posterior al paso de los Huracanes Mitch y Stan en 1998 y 2005, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó la rectificación de 21 ríos en todo el litoral, como consecuencia se inicia a lo largo de la cuenca baja (6-20km) un azolvamiento del cauce y una modificación del sustrato del fondo de los ríos en los siguientes 15 años. Pasando de un sustrato de limo/arcilla a arena gruesa/arena fina (Carbajal, 2014; Gálvez, 2017). Este proceso fue un cambio drástico en el hábitat de los organismos bentónicos como moluscos, crustáceos, peces y anfibios, los cuales desaparecieron de muchos ríos, incluso en los últimos años se han observado cambios en los macroinvertebrados y el tipo de vegetación riparia (Escalona, 2021). Los impactos más notables se registraron sobre las lagunas de agua dulce y los pantanos ubicados en los últimos 10 km del cauce de los ríos hasta el límite con los manglares. En esta parte de la cuenca, debido al arrastre de grandes cantidades de arena, el cauce de muchos ríos ya está colmatados, como ha sido demostrado por Carbajal (2014) en el río Cintalapa; en Río Vado Ancho (Gálvez, 2017; Tovilla, 2022) en Madre Vieja y Río San Nicolás, todos estos ríos drenan dentro de la zona núcleo de la Encrucijada (Tovilla et al., 2018; Gómez et al., 2019).

Azolvamiento de las lagunas costeras. Las obras de canalización hicieron desaparecer los meandros de los ríos, grandes cantidades de arena rellenaron las 14 lagunas costeras de esta entidad. Este proceso se inició mucho antes, como consecuencia de la deforestación de las cuencas entre 1945-1970, con el avance de las actividades agropecuarias (SARH, 1974). A partir de la rectificación de los ríos (2005-2010) este proceso se incrementó por las obras de canalización realizadas (Galván y Márquez, 2006; Gómez et al., 2019; Tovilla, 2022). El huracán “Stan” introdujo en las Lagunas Cerritos, Teculapa, Panzacola y el Castaño 4.4, 3.7, 3.1 y 2.8 cm de arena: mientras que las obras de canalización realizadas por la CONAGUA incrementaron hasta 10 veces este azolvamiento como se ha demostrado en estas lagunas con: 36.9, 29.5, 20.6 y 19.4cm (Carbajal, 2014; Machuca, 2014; Gálvez, 2017). En los últimos 19 años todas las lagunas costeras se han colmatado de arena, casos extremos se observan en las lagunas: Cerritos (82%), Teculapa (77%), Panzacola (59%), Cabildos (71%) y Pozuelos-Murillo (77%), estos porcentajes de azolvamiento indica que ellas han dejado de ser útil para la pesquería, provocando un

grave problema a nivel socioeconómico para la población de pescadores y ecológico para la conservación de los cuerpos de agua, el manglar y la biodiversidad (Machuca 2014; Gómez et al., 2019).

Los dragados de las lagunas costeras. Como consecuencia del azolvamiento de las lagunas, además del colapso de las pesquerías, este proceso ha dificultado la navegación (Machuca 2014; Martínez 2017). Ante el reclamo de los pescadores, desde 1985 se han realizado obras de dragado, siendo especialmente extensivo en el periodo: 2000-2010. Los dragados han afectado la vegetación de manglar en las lagunas de Chantuto (89 has), Teculapa (36 has), Cerritos (17 has) y Panzacola (52 has) (De la Presa, 2005; Tovilla et al., 2018). Un dragado comprende un canal perimetral al interior de las lagunas de 20-30m de ancho y 3-4m de profundidad, la draga succiona el sedimento y agua a través de una tubería, depositándolo en la periferia sobre manglares, tulares y pantanos. Las áreas de depósito o “Tarquinas” son sitios previamente deforestados de 0.5, a 10 hectáreas de extensión, los cuales son cercados con postes de cemento, malla “Geotex” y alambre de amarre, la mala calidad del material y la deficiente construcción, han provocado que antes del término de la obra, el material de contención del sedimento se rompe, dejando escapar el material hacia la periferia, incrementando el impacto sobre la vegetación de manglar (Tovilla et al., 2014); adicionalmente al evaporarse el agua que acompaña al sedimento, los sitios quedan por tiempo muy largos como áreas salinizadas (De la Presa, 2005; Tovilla et al., 2007). Estos sitios debido a la elevada salinidad no pueden ser rehabilitados en los siguientes 10 años, hasta que la lluvia disuelve la sal. La restauración del manglar en estas áreas es difícil, costoso y muy lento (De la Presa, 2005).

Desecación y modificación de los flujos de agua. En la parte periférica a los manglares con gran frecuencia las actividades agropecuarias abren drenes para desecar amplias áreas de pantanos, desviando el agua hacia las lagunas, esto está provocando impactos drásticos sobre la economía del agua dulce, la flora y fauna de los humedales riparios, palustres y manglares en toda la costa de Chiapas (Machuca, 2014; Martínez, 2017). A partir del año 1950-2015 se canalizaron los ríos y se abrieron gran cantidad de drenes para desecar áreas inundables, con la finalidad de establecer plantaciones de caña de azúcar, banano, mango y palma africana (SARH, 1974), por esta vía se han perdido más de 28,000 hectáreas de humedales a la orilla de los ríos en los municipios de Suchiate, Tapachula, Mazatán, Huixtla, Villa Comaltitlán, Acapetahua y Mapastepec (Gómez et al., 2019).

Incendios. Todas las áreas de manglares en el límite con la zona terrestre están precedidas por extensos tulares, popales y vegetación de selva mediana. Durante la época de estiaje (febrero-mayo) al estar la vegetación seca, fácilmente se producen incendios, la mayoría de ellos son intencionales para capturar tortugas, iguanas, cocodrilos y caimanes, como sucedió en los años 2003, 2007, 2013-2015 y 2021 (Gómez et al. 2019; CONAFOR, 2021), estos incendios debido a la incidencia del viento y elevada temperatura se propagan con rapidez, arrasando todo el material seco; incluso la cama de combustibles almacenada en el suelo, ocasionalmente estos incendios también se pueden propagar como incendios subterráneos, los cuales son difíciles de apagar (Barrios, 2015). En la reserva La Encrucijada anualmente

de producen incendios, algunos de los cuales han afectado entre 250-500 hectáreas como sucedió en los años de 2007, 2013, 2014, 2021 (CONAFOR, 2021).

La deforestación. Por el cambio de uso del suelo en la periferia, al interior y frente al mar en todos los manglares existe un proceso de deforestación acelerado por las actividades agropecuarias y la urbanización, siendo los municipios de Suchiate, Tapachula, Mazatán, Huixtla, Villa de Comaltitlán, Acapetahua, Mapastepec, Pijijiapan y Tonalá donde con más frecuencia se ha perdido la vegetación; incluso a partir de 2000 esta pérdida de vegetación se incrementa sobre la franja frente al mar (Machuca 2014; Díaz et al., 2019). La extracción de madera de los manglares se destina para la construcción como varas, vigas, horcones y polines; así como leña, este último en muchas localidades es la fuente primaria de energía, desafortunadamente ha sido muy intensa en los manglares de Pozuelos-Murillo y Cabildo-Amatal en Tapachula (Pulido y Tovilla, 2003; Tovilla y Salas 2019), Barra de Zacapulco-La Palma y El Castaño (Morales, 2010) y Chantuto-Barrita de Pajón en Mapastepec, como fue demostrado en los inventarios realizados entre 2005-2006 y 2009-2028 (Tovilla et al., 2018).

La contaminación por plaguicidas. Existen algunos registros sobre la presencia de contaminantes en los sedimento, agua y organismos en los manglares de la costa del Soconusco (Linares y Tovilla, 2013; García, 2022). Hernández et al. (2004), registraron la presencia de pesticidas, microorganismos, detergentes y grasas en el agua de Barra de Cahoacán en Tapachula, se registraron siete plaguicidas cuyos valores están por arriba de la norma internacional, estos es producto del paso del río por grandes campos agrícolas, desde la parte alta hasta el mar. Linares y Tovilla (2013), reportaron hasta 19 plaguicidas organoclorados en los sedimentos del río Madre Vieja y laguna de Chantuto en Mapastepec. Los plaguicidas más notables fueron: Gamma-HCH, DDT_{4,4}, DDD_{4,4}-DDE, aldrin, dieldrin, endrin, y epóxido de heptacloro, todos ellos por arriba de la norma internacional y pueden representar un riesgo a nivel ecológico US-EPA (2006) por sobrepasar los niveles de efecto probable y pueden representan un riesgo para la salud humana al concentrarse en el tejido de moluscos, crustáceos y peces de consumo local y regional como almejas, camarones, lisas, bagres, mojarra, robalos y pargos.

Políticas públicas mexicanas relacionadas con las cuencas hidrográficas, manglares y pesca sustentable

A partir del análisis realizado para un periodo de siete décadas (1950s-2020s), las políticas públicas mexicanas han mostrado una serie de cambios en relación con los socioecosistemas costeros, con implicaciones notables a la escala regional del estado de Chiapas, en la conservación de los manglares y las prácticas sustentables en el aprovechamiento de sus recursos pesqueros. La revisión muestra avances en el desarrollo de instrumentos normativos que, al paso de los años han incorporado el enfoque ecosistémico, de participación social y gobernanza, en materia de manejo de cuencas, manglares y pesquerías. También es notable que ha persistido una desarticulación estructural entre políticas ambientales, socioeconómicas y territoriales (Sotelo y Alarcón, 2017) (Figura 2).

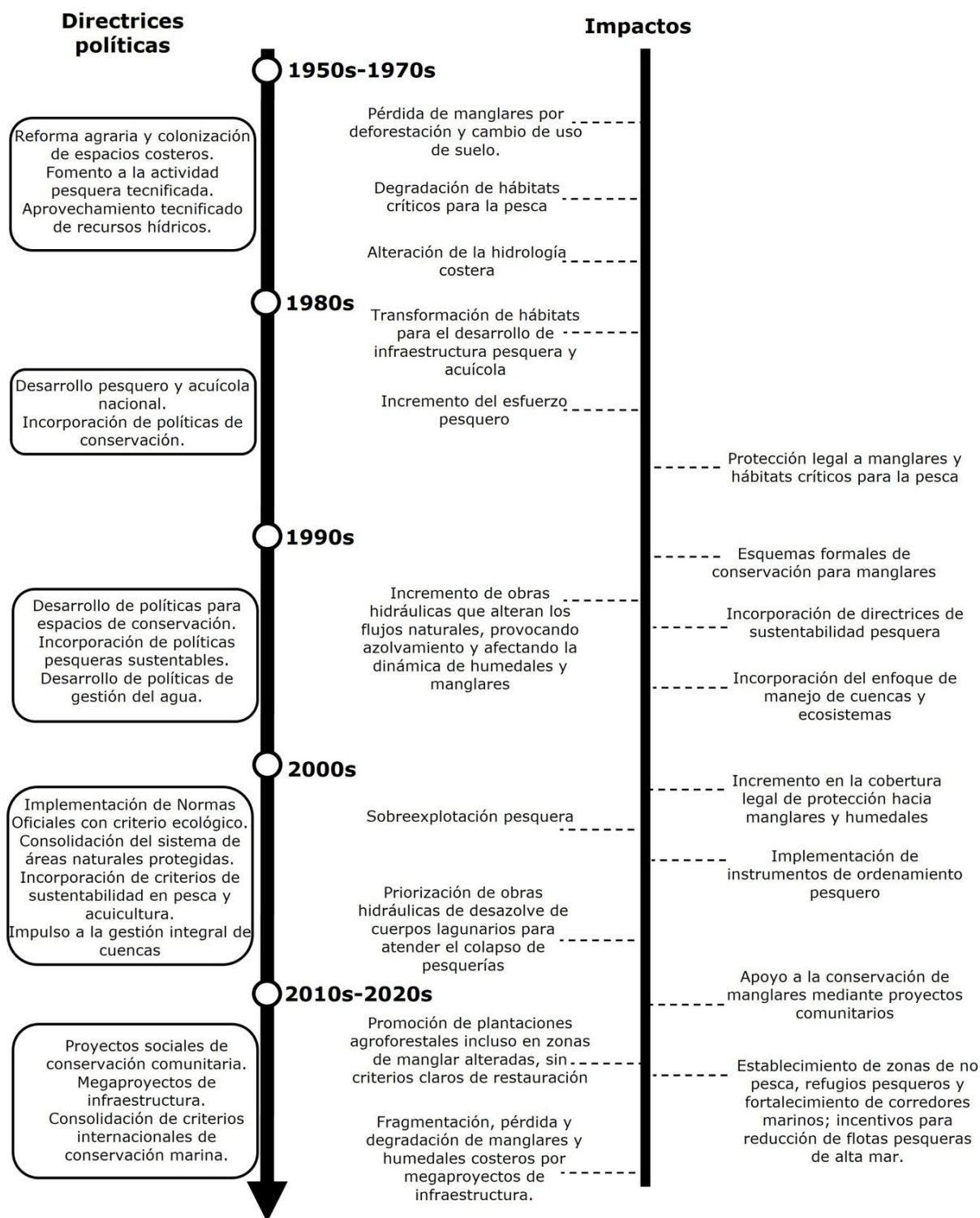


Figura 2. Cronología de las principales directrices políticas y sus impactos para la conservación de manglares, manejo de cuencas y pesquerías sustentables en México para cinco periodos históricos entre las décadas de 1950 y 2020.

Durante el periodo 1950s-1970s, es notable como la expansión de la frontera agropecuaria impulsada a través de una reforma agraria promovió una colonización de espacios costeros generando impactos directos y negativos sobre los manglares, además de obras realizadas en detrimento de los

humedales costeros, como la construcción de drenes para desecar los sistemas palustres y lacustres en favor de las plantaciones de banano, algodón, y caña, principalmente entre 1946-1975 (Vargas y Brenner, 2024). De forma simultánea, el fomento a la pesca tecnificada y el desarrollo de obras hidráulicas, se desarrollaron bajo enfoques sectoriales y productivistas prevaleciendo la falta de criterios ecológicos y de participación social comunitaria. Aunque durante esta etapa la pesca parece haberse fortalecido como actividad económica (Martínez y González, 2016), se incrementó el deterioro de hábitats críticos (manglares y sistemas lagunares) para especies de importancia pesquera, base de desarticulación institucional entre sectores (Brenner, 2018). También, en este periodo inician las obras hidráulicas para desecar los humedales aledaños a los ríos Suchiate, Coatlán, Cahoacán, Huixtla (Figura 2).

Hacia la década de 1980, se acentúa la tecnificación pesquera y acuícola, con el establecimiento de las primeras granjas camaronícolas (Martínez et al., 2009), lo que derivó en la transformación de hábitats aunado a nuevas perspectivas de producción y aprovechamiento pesquero. Sin embargo, también emergieron los primeros instrumentos legales de conservación ambiental, como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1988), lo que marca el inicio de una incipiente articulación entre desarrollo y conservación con un efecto notable que visibilizaría al espacio costero como un socioecosistema estratégico (Rosete, 2006).

En el contexto estatal, en el año de 1985-1990 se inician los primeros dragados en Chantuto, La Joya -Buenavista; y a finales de 1989-90 se construye el Canal de La Conquista-Joaquín Amaro. En la década de 1990, se introdujeron importantes instrumentos como el Programa Nacional de ANPs y el Código de Conducta para la Pesca Responsable. Aunque se avanzó en el diseño institucional y conceptual del manejo costero, la implementación práctica fue limitada. Persistió la inversión en infraestructura hidráulica y la rectificación de ríos, lo que afectó la conectividad hidrológica hacia los humedales. La integración de políticas sectoriales fue parcial, y las iniciativas de conservación continuaron operando de forma aislada de las políticas de fomento pesquero y agrícola (Tovilla, 2008). El 5 de junio de 1995 se decretó la REBIEN, y en 1999 las reservas estatales del Gancho Murillo y Cabildo Amatal.

La década de 2000 consolidó el marco normativo para la conservación costera, mediante normas oficiales mexicanas específicas y el fortalecimiento del sistema de ANPs, con la protección de importantes áreas de manglares y humedales costeros decretados como reservas (Bezaury, 2004). En el contexto estatal, partir de noviembre de 2005-2010 se realizaron la rectificación de los 21 ríos de la costa, lo cual provocó el azolvamiento de las lagunas y el colapso de las pesquerías. La Ley de Pesca y Acuicultura Sustentables (2007) introdujo directrices para el manejo responsable, aunque la aplicación efectiva de estas disposiciones fue limitada por la falta de capacidades técnicas y presupuestales. La promoción de la gestión integral en cuencas no logró contrarrestar el enfoque prevalente en grandes obras hidráulicas, mantuvo la fragmentación institucional. Por otro lado, entre 2000 y 2008 se realizaron la mayor cantidad de dragados dentro de la Encrucijada, contrario al marco normativo (Figura 2).

Durante el periodo 2010-2020, las políticas adoptaron un enfoque más participativo mediante programas de conservación comunitaria y pagos por servicios ambientales, solo que estos han resultado limitados, lo que ha promovido una tala continua del manglar. No obstante, su efectividad ha estado condicionada por la continuidad presupuestal (Perevotchikova y Ochoa, 2012). En contraste, los megaproyectos de infraestructura han generado efectos adversos sobre los ríos, lagunas, manglares y la dinámica costera, en ocasiones sin manifestaciones de impacto ambiental. Paralelamente, la consolidación de criterios internacionales de conservación marina, como las áreas de refugio pesquero, ha favorecido la resiliencia de los ecosistemas costeros, aunque con una cobertura aún limitada y con rezagos en investigación biotecnológica.

En conjunto, la Figura 2 evidencia cómo la falta de integración entre políticas de manejo de cuencas, conservación de manglares y pesca ha generado impactos acumulativos y contradictorios en los ecosistemas costeros del estado de Chiapas. La falta de una política pública sólida sobre Seguridad y Soberanía Alimenticia (SSA), la cual debe incluir el sentido de origen, la cultura, calidad de los alimentos para una alimentación saludable, hasta cambios en los hábitos alimenticios. La generación de un sistema de SSA necesita pensar en indicadores sensibles que ayuden a definir los caminos más adecuados y permitan evaluar posibles transformaciones para reformular acciones. La estabilidad para la seguridad alimenticia indica un acceso constante a cantidad y calidad de los alimentos. Puede ser mejorada reduciendo la vulnerabilidad de los sistemas alimentarios a los desastres y las fluctuaciones de los precios. Para el estado de Chiapas, se estima que más del 64% de los reportes de captura de camarón entre 1996 y 2018, provinieron de los sistemas lagunares asociados a manglar.

La tendencia general en los volúmenes de capturas de camarón en Chiapas, resultan negativas (Figura 3), con una tasa de pérdida acumulada del recurso pesquero del 86.35% en 2023, respecto a las capturas estimadas dentro de los sistemas lagunares en 1996. Así mismo, la tasa de pérdida promedio anual del recurso pesquero camarón fue estimada en -6.05% anual[†]. Es necesario considerar que un descenso notable en la producción de camarón en Chiapas puede deberse al retiro de la flota camaronera de alta mar que reportaba en los puertos del Golfo de Tehuantepec (Salina Cruz y Puerto Chiapas), hacia 2018 (CONAPESCA, 2025a).

El proyecto Estratégico de Retiro Voluntario de Embarcaciones Camaroneras, además de la reducción de subsidios federales, se implementó con el objetivo de disminuir el esfuerzo pesquero, contribuyendo a la conservación y uso sustentable del recurso, consistiendo en la compra de los barcos por parte del gobierno federal, procediendo a su posterior destrucción. Así mismo, Almendarez et al. (2016) señalaron la existencia de una crisis productiva para la flota camaronera en el Golfo de Tehuantepec, con una baja rentabilidad económica debido en parte, al agotamiento del recurso pesquero,

[†] La tasa de pérdida promedio anual se calculó considerando: $\left(Valor\ final_{2023} / Valor\ inicial_{1996}\right)^{\frac{1}{n}} - 1$; para un periodo (n) de 27 años.

falta de planes de manejo, organización y capacitación para la flota de alta mar. A pesar del esfuerzo realizado con estos programas que buscan frenar la sobreexplotación, las capturas de camarón en la plataforma continental de Chiapas siguen realizándose por las flotas que proceden del norte del país (Gómez, 2022), situación que no permite contar con estadísticas puntuales acerca del recurso extraído en el estado (Figura 3).

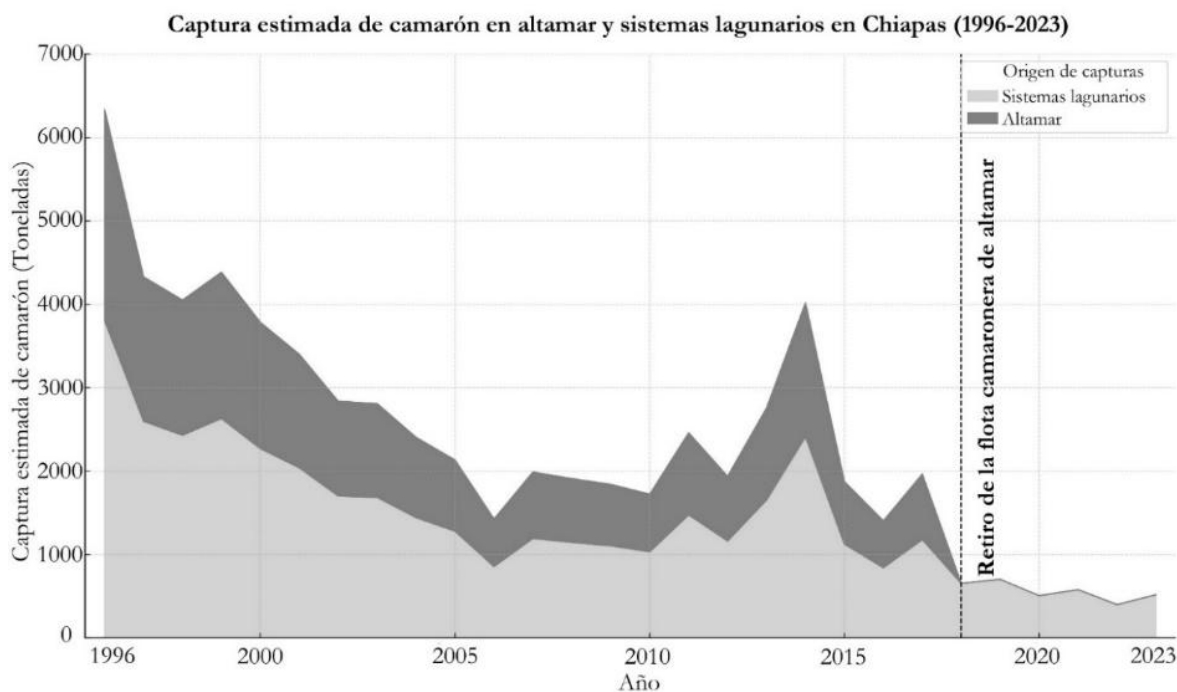


Figura 3. Tendencias en el volumen de capturas estimadas (t) de camarones Peneidos en el estado de Chiapas para el periodo 1996-2023. Área en gris oscuro indica las capturas provenientes de las flotas de altamar y el área en gris claro indica las capturas de las flotas ribereñas de los sistemas lagunares. Línea punteada indica el año de retiro de la flota de altamar en 2018.

Las tendencias negativas encontradas en la pesca de camarón dentro de los sistemas lagunares de Chiapas, obedece a factores multicausales acentuados en las últimas tres décadas. Evaluaciones sobre la pesquería de camarón hechas en los dos grandes sistemas lagunares de la REBIEN (Carretas-Pereyra y Chantuto-Panzacola), señalan que las deficiencias en los sistemas de registros en las cooperativas han dificultado enormemente desarrollar estrategias de gestión y manejo (Rivera et al. 2014; Vázquez et al. 2023). En la década de 1980 se reportaron los mayores volúmenes de captura de camarón de estuario, y desde entonces ha ocurrido la tendencia decreciente reportada aquí, con variaciones y fluctuaciones interanuales, pero con una disminución relativamente sostenida. Rivera et al. (2009) evaluaron que la pesca de camarón blanco en el sistema Carretas-Pereyra, se encuentra sobreexplotada, habiéndose superado en un 45% el esfuerzo estimado de rendimiento máximo sostenible (Figura 3).

Las tendencias negativas en la producción pesquera han promovido la organización de sectores sociales que, con apoyo de grupos políticos, buscan periódicamente financiamiento federal para dragar y desazolver los cuerpos lagunares, así como la apertura mecánica de las bocabarras. Hasta ahora, esta

medida continúa considerándose, por sectores gubernamentales, como una solución adecuada para resolver en el corto plazo la baja productividad pesquera y contener los problemas sociales que esto conlleva (CONAPESCA, 2025c). No obstante, esta visión convierte a los sistemas lagunares en sistemas de producción modificados y altamente subsidiados, que ahora buscan mantener las condiciones óptimas para el desarrollo de los organismos.

Los sistemas lagunares de la costa de Chiapas, resultan un escenario inmerso en la dinámica azolvamiento-dragado. Desde 1975, la modificación y “rectificación” de ríos de la cuenca costera de Chiapas, aunado a los intensos procesos de deforestación, han acelerado el proceso de azolvamiento de las lagunas (Gómez et al., 2019). Por ejemplo, la laguna Cerritos del sistema Chantuto-Panzacola redujo, en un periodo de tan solo 10 años, el 60% de su superficie acuática, con una marcada pérdida de profundidad por acumulación de sedimentos (Carbajal, 2014). Los efectos a mediano y largo plazo de los dragados son poco conocidos, con evidencia de disminución en la calidad del agua, cambios en la dinámica sedimentaria y alteración de ciclos de desarrollo de varias especies (Cardoso et al., 2016; Wenger et al., 2017).

De acuerdo con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2025), el estado de Chiapas presentó una de las mayores tasas de pérdida de manglares en el periodo entre 1972 y 2005, alcanzando un valor de -0.54, superando al estimado nacional de -0.42 para el mismo periodo. Cinco sitios prioritarios de manglar de relevancia biológica o necesidades de rehabilitación en el estado de Chiapas, definidos por CONABIO (Rodríguez et al., 2013), presentaron pérdidas significativas en su extensión de manglar entre 1972 y 2005, con una tendencia a la recuperación de áreas entre 2005 y 2020 (Figura 4).

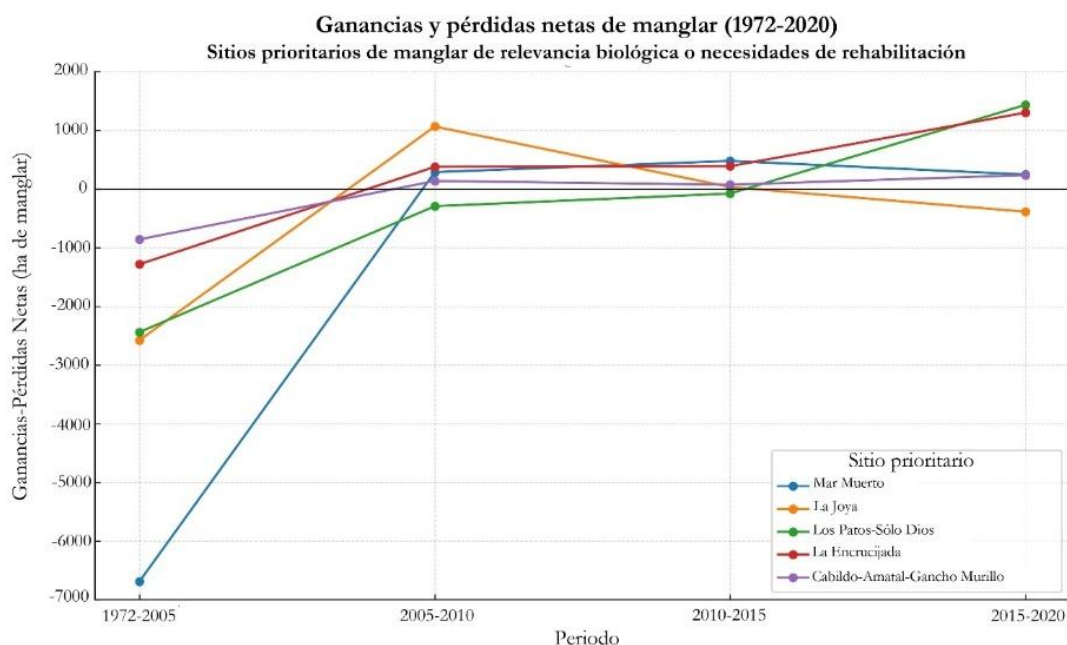


Figura 4. Tendencias de ganancias y pérdidas netas del área cubierta por manglares (ha) en cinco sitios prioritarios de manglar de relevancia biológica o necesidades de rehabilitación de la costa de Chiapas, entre 1972 y 2020.

Para el periodo 2015-2020, CONABIO (2025) reporta una recuperación de 2,814 ha de manglar en Chiapas, a una tasa anual de 1.17, sin embargo, para este mismo periodo se estima que el área de manglar perturbado aumentó de 585 a 923 ha, reflejada por zonas de manglar muertos o en regeneración, impactados por ciclones y por la construcción de infraestructura hidráulica y de caminos (Figura 4). Aunque la tendencia actual respecto a la cobertura de manglar en México y Chiapas, indica niveles de recuperación, como una posible consecuencia de las directrices impulsadas para la conservación del ecosistema, se ha recomendado cierta precaución interpretativa en las cifras de ganancia de áreas de manglar, las cuales pueden ser influidas en buena medida por el método y la definición de las coberturas usadas (Acosta et al., 2023).

Derivado del estudio batimétrico realizado en las áreas de laguna manejadas por la cooperativa Agostaderos de Topón, se estimó una profundidad media de 64.58 ± 46.78 cm, y una capa de sedimento con un espesor de 45 ± 26.89 cm. Comparativamente, esta área resulta ser la más somera respecto a las profundidades estimadas en otros cuatro sistemas (Figura 5).

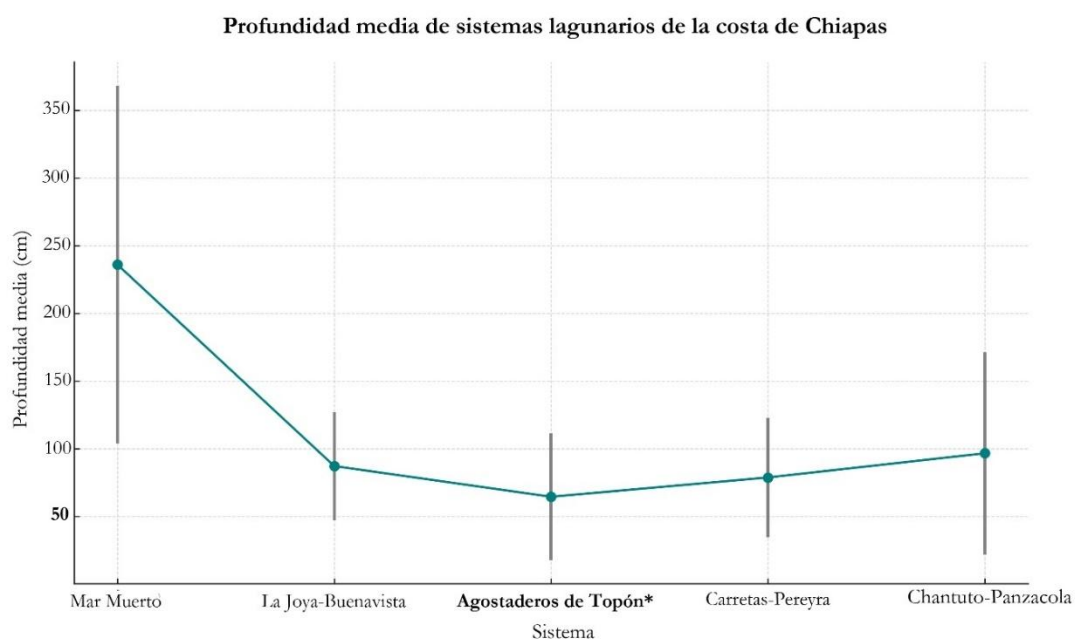


Figura 5. Comparación del valor de profundidad media (cm) de áreas de pesca de la cooperativa Agostaderos de Topón, con los reportados en cuatro sistemas lagunares de la costa de Chiapas[‡].

La evidencia señala que la canalización de los ríos ha provocado, en los últimos 40 años, el azolvamiento acelerado y pérdida de profundidad en sistemas como Cabildo-Amatal-Gancho Murillo, Chantuto-Panzacola, La Joya-Buenavista, en donde se estima que las áreas concesionadas a las

[‡] Mar Muerto: profundidad promedio estimada en 157 puntos de muestreo (Ríos y Pérez, 2018); La Joya-Buenavista: profundidad promedio estimada en 13 puntos de muestreo (Romero et al., 2020); Carretas-Pereyra: profundidad promedio estimada en 5 puntos de muestreo (Márquez et al., 2006); Chantuto-Panzacola: profundidad promedio estimada en 8 puntos de muestreo (Gómez et al., 2014). *Agostaderos de Topón. Caracterización batimétrica realizada por iniciativa de integrantes de la Sociedad Cooperativa Pesquera en 19 estaciones de muestreo. Febrero 2025.

cooperativas se han perdido de un 30 a 70% (Tovilla, 2022). Resalta la importancia de las iniciativas locales de establecer nexos con el sector académico, gubernamentales y civiles, apoyados con una política pública sólida, para entender los problemas socioeconómicos con una perspectiva científica y buscar soluciones conjuntas.

Estado de la pesquería en la comunidad de Topón

Con base en las respuestas proporcionadas por los pescadores observamos que los niveles más altos de producción se presentaron antes de 1998, año en el que el huracán Mitch provocó una crisis económica y social profunda en la comunidad de Topón por el colapso de las capturas de camarón y escama. Por ejemplo, el pescador 2 presentó una producción de alrededor de 4,000 kg en 1990, para luego descender hasta 100 kg en el 2000 y tener un ligero crecimiento en los siguientes años. De la misma manera, el pescador 6 obtuvo una producción de 1,000 kg en 1980, presentó su mayor nivel en 1990 con 1,500 kg y luego bajó súbitamente a casi 0 en el año 2000, para después mantenerse alrededor de los 100 kg. Estas tendencias son reflejo de la caída generalizada de la pesca en toda la costa de Chiapas (Figura 6).

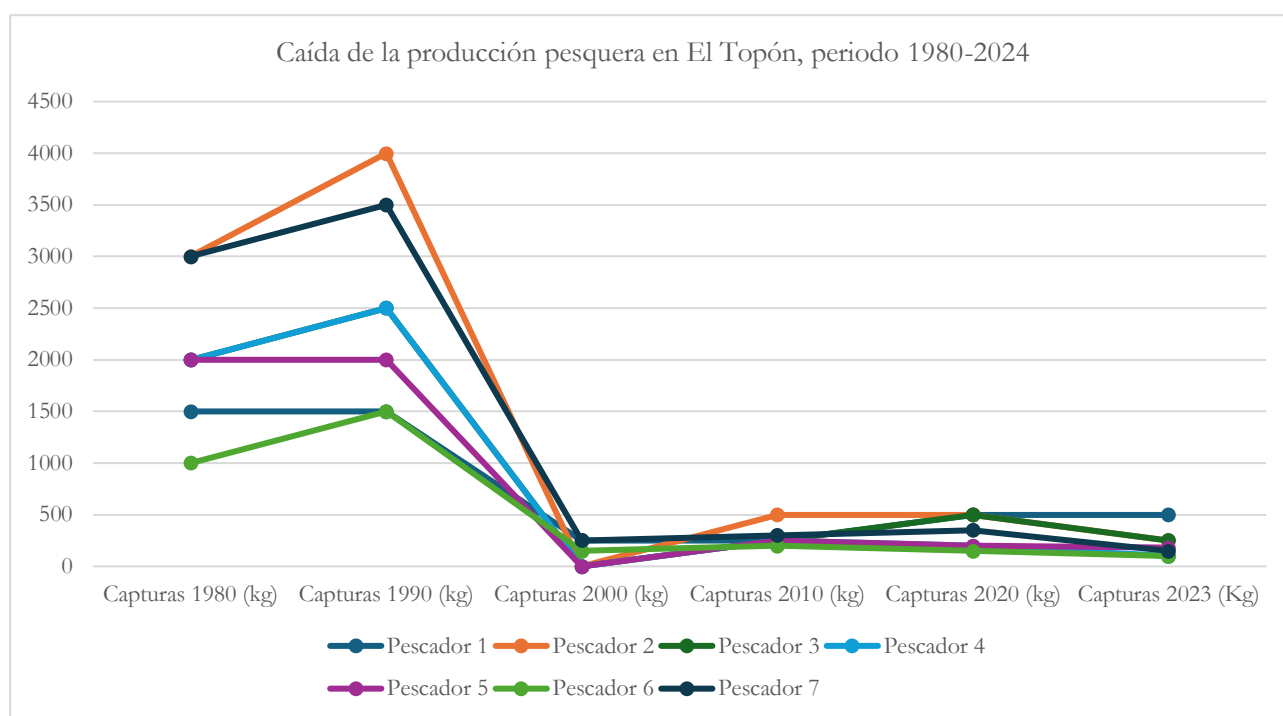


Figura 6. Caída de la producción pesquera entre 1980 y 2023.

Los pescadores de la comunidad consideraron que la disminución de la producción pesquera se debe al azolvamiento de las lagunas (100 %), a la contaminación del agua (95 %), a la falta de apoyos gubernamentales (62.5 %), a la expansión de palma de aceite en la zona (92.5 %) y a la explotación de la pesca industrial en la zona marina (62.5 %) (Figura 7).

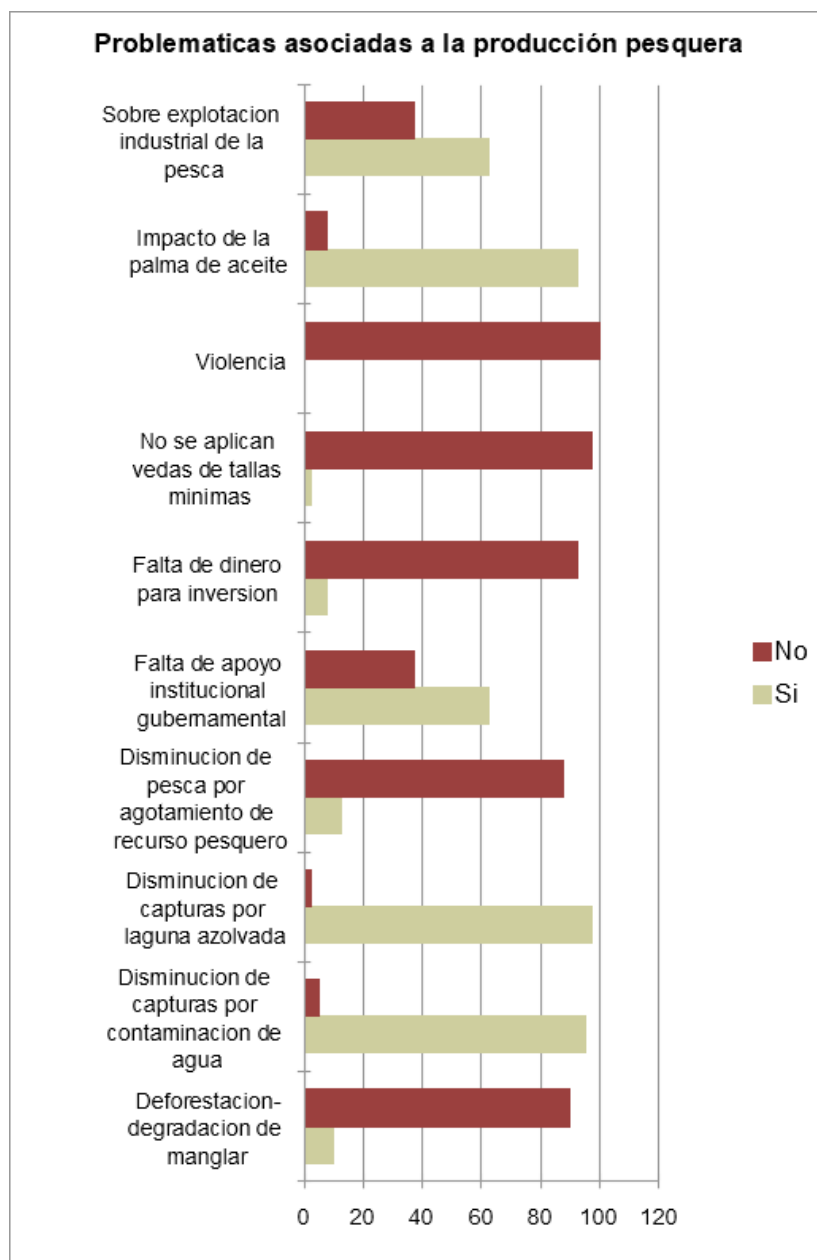


Figura 7. Percepción de los socios de la cooperativa Agostaderos de Topón sobre las principales problemáticas que enfrenta la actividad pesquera.

Más del 90% de los socios de la cooperativa perciben que la temperatura del agua de la laguna ha incrementado, los periodos de lluvias han cambiado, la cantidad del recurso pesquero ha disminuido y cada día capturan menos: lisas, lisetas, camarón, mojarra, róbalo y pargos. Por el contrario, existe un compromiso fuerte de la comunidad hacia la conservación. Más del 90% de los pescadores percibe que las zonas de manglar no se han reducido y que la calidad del agua se mantiene, mientras que siguen invirtiendo el mismo tiempo para llegar a las áreas de pesca en el sistema.

El 75% de los pescadores encuestados perciben que la actividad pesquera tiene futuro, por lo que en caso de un colapso de la pesquería ven como alternativa trabajar en el sector de servicios y comercio (2.5 %), en la ganadería (2.5 %), migrar a otros municipios de Chiapas (2.5 %), migrar a otro

estado/ciudad del país (2.5 %), incursionar en el ecoturismo (25 %), complementar la pesca con el ecoturismo y las actividades del campo (57.5 %) y trabajar en la construcción (5 %) (Figura 8).

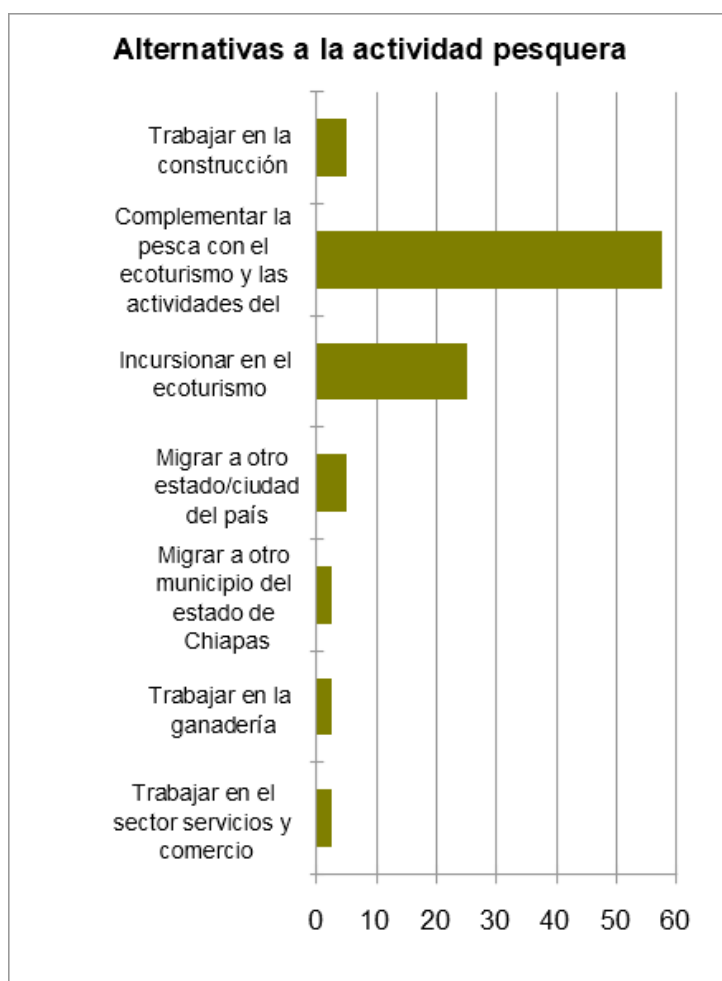


Figura 8. Actividades económicas alternativas ante el declive de la pesquería en la comunidad.

Los pescadores indicaron que algunas soluciones para recuperar la pesca en la comunidad son: más apoyo institucional/gubernamental (2.5%), proyectos de acuacultura (17.5%), encontrar mercados más justos y benéficos para los productos pesqueros (17.5%), implementar una certificación (10 %), la diversificación de la economía comunitaria (ecoturismo, comercio, servicios, agricultura y ganadería sustentables) (32.5%), abrir las bocanarras (17.5%) y desarrollar una pesca responsable (2.5%). Al 75% de los pescadores les agrada la idea de que los hijos y nietos sigan dedicados a la pesca y consideran que, respetando las normas de conservación, los recursos pesqueros pueden recuperarse en el sistema lagunar.

Es una realidad que buen número de jóvenes de la comunidad prefieren emigrar frente a las escasas oportunidades de empleo e ingreso que genera la pesca. El 72% de los jóvenes que salieron de la comunidad lo hicieron porque “la pesca ya no genera ingresos suficientes”. El 9% de los jóvenes que han emigrado señalaron que ya no tenían interés en la actividad pesquera; mientras que el 8% señala que la crisis de la pesca en la comunidad se debe a la “falta de mercados que generen ganancias para el pescador”.

Otros motivos importantes para abandonar la pesca son: “no es suficiente el apoyo que recibimos de las dependencias del gobierno” (6%), “los jóvenes prefieren trabajar en actividades de la industria y el comercio en zonas urbanas (5%), y ha bajado la producción pesquera en la comunidad (3%). Los jóvenes prefieren emigrar a Tijuana y Ciudad Juárez (2.5%), a los Estados de la Frontera Norte (52.5%), Estados Unidos (42.5%) y más cerca, Acapetahua y Escuintla (9.5%).

Dinámica de la Cooperativa de Producción Pesquera Agostaderos de Topón

Para hacer frente a la crisis que se vive en las cuencas hidrográficas, sistemas lagunares y manglares de la costa, la cooperativa ha construido un esquema de gobernanza basada en la confianza, la solidaridad y la participación de los diversos socios de la comunidad, lo cual ha facilitado la generación de acuerdos para el cuidado de los manglares, la pesca responsable y la limpieza continua de la laguna por la comunidad. Este tipo de esquema de gobernanza participativa se basan en el consenso entre los diversos grupos de interés en los territorios, lo cual da lugar a acuerdos y/o arreglos institucionales que favorecen el aprovechamiento responsable y equitativo de los recursos pesqueros, para garantizar la preservación de la actividad pesquera por varias generaciones en la comunidad (Velázquez y Rosales, 2023).

Lo anterior se refleja en la respuesta de los pescadores respecto a los apoyos que brinda la cooperativa. El 100% de los encuestados mencionó que la cooperativa brinda conocimientos e información, respaldo económico en las temporadas de veda y contingencias, representación ante dependencias de gobierno como la CONAPESCA, nexos con universidades, centros de investigación, ONG y asociaciones civiles, apoyo para inserción en mercados más redituables y para adquirir equipos de pesca. Todos los pescadores indicaron estar de acuerdo con las acciones de la mesa directiva actual. Al evaluar la gestión de la actual administración el 80% de los pescadores encuestados la consideró como muy buena, 17.5% como buena y 2.5% como regular. Prácticamente el 100% de los encuestados confía en los líderes de la cooperativa y consideran que la organización está funcionando bien.

Con relación a los procesos de toma de decisiones, la totalidad de los pescadores encuestados indicó que los temas que se discuten en las asambleas son claros y la opinión de todos los integrantes es tomada en cuenta. La encuesta indica que existe transparencia en el manejo de los recursos económicos de la organización, mediante la rendición de cuentas continua de parte de los directivos y los informes de gastos son claros. Cuando los pescadores tienen necesidades o problemas urgentes recurren a la familia, cooperativa, tequio de la comunidad y gobierno municipal. El 100% de los encuestados señaló que existe una buena relación entre los socios de la cooperativa, existe mutua confianza, cooperación, solidaridad y equidad.

En lo que respecta a la relación con instancias gubernamentales y Organizaciones no Gubernamentales (ONG), la totalidad de los pescadores encuestados manifiesta tener conocimiento acerca de que su zona de pesca se encuentra dentro de una ANP. Asimismo, conocen el año en que fue decretada la reserva y están familiarizados con su plano de manejo, elementos que contribuyen al fomento

de prácticas de pesca responsable dentro de la comunidad. Los pescadores señalaron que son continuamente consultados por las autoridades de la reserva para la aplicación de medidas de conservación ambiental, por lo que están dispuestos a colaborar en el desarrollo de proyectos de cuidado de los manglares y pesca responsable. El 100% de los reconoció que en la comunidad se respetan las regulaciones tales como las vedas y tallas mínimas, contribuyendo así al manejo sustentable de los recursos.

La mayoría de los pescadores indicaron que la relación con la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), Conservación Internacional (CI) y Comité Estatal de Sanidad Acuícola del Estado de Chiapas (CESACH) es muy buena; mientras que la mitad indicó lo mismo con respecto a la relación con el gobierno municipal. Los niveles más bajos de aprobación de las instituciones corresponden a la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA), Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural del Estado de Chiapas (SEMAHN) y Secretaría de Pesca y Acuacultura del Estado (SEPESCA) (Figura 9).

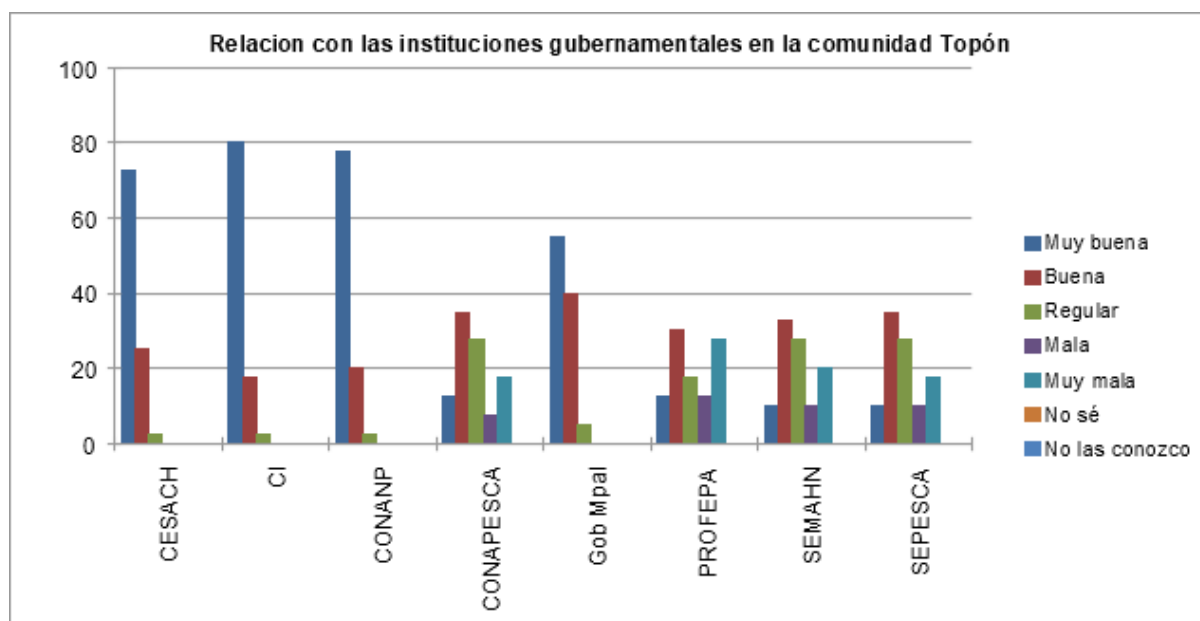


Figura 9. Relación de los pescadores con las instituciones en la comunidad

Problemáticas que afectan a los manglares y pesca, desde la perspectiva de los pescadores de Topón

Como resultado del taller, se identificaron de manera colectiva los principales problemas que afectan tanto a los manglares como a la actividad pesquera, así como las estrategias comunitarias orientadas a la conservación. Desde la perspectiva de las cooperativas locales, los principales problemas fueron: el azolvamiento de las lagunas, la contaminación del agua, la disminución de la producción pesquera y la falta de capital financiero para el procesamiento de productos.

A nivel regional, se identificaron otras amenazas como la deforestación en la cuenca alta, la introducción de especies exóticas (palma de aceite y tilapia), la tala inmoderada de mangle y la falta de terminar el canal perimetral para mejorar la circulación del agua. Estas condiciones han contribuido a la degradación de los humedales y manglares por sedimentación del agua de los ríos hasta el litoral, provocando la pérdida de manglares (Toledo, 2018). Por su parte, los representantes institucionales coincidieron en señalar como problemas locales, el azolvamiento, la contaminación, el cierre de la bocabarra, la tala de manglar. Mientras que los problemas a nivel regional señalados incluyeron la escasa coordinación interinstitucional, aunado a la falta de apoyo al sector pesquero por parte de CONAPESCA, la descoordinación con instituciones como la CONAPESCA y la débil articulación entre las dependencias encargadas de la gestión ambiental como la CONAGUA, PROFEPA, SEPESCA y el Gobierno Estatal.

Estrategias comunitarias de conservación

Una vez identificados y socializados los problemas, se acordaron tres estrategias prioritarias para enfrentar los desafíos relacionados con la pesca y los manglares:

1) **Sensibilización y capacitación ambiental:** Las acciones sugeridas incluyen fortalecer la conciencia ambiental mediante el cuidado de los humedales costeros; campañas dirigidas a jóvenes y funcionarios municipales, estatales y federales, fomentar la participación de mujeres en las asambleas, y promover programas de manejo de residuos. Cursos de educación ambiental para niños, adolescentes y adultos impartidos por El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), las universidades Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) y Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

2) **Desazolve de las lagunas:** Se propuso acciones como diagnóstico técnico del azolvamiento, el trabajo comunitario para la limpieza de lagunas, reforestación en las zonas media y alta de la cuenca, y la participación de instituciones como: CONAGUA, CONAPESCA, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), Gobierno del estado de Chiapas y municipios.

3) **Políticas públicas y gestión interinstitucional:** Se destacó la necesidad de establecer convenios con CONAGUA para políticas regionales y articular la disminución de la deforestación en la cuenca alta.

En el Análisis de los problemas y de las estrategias, tanto los socios de las cooperativas como los representantes institucionales coincidieron en que, la implementación de estrategias de conservación

implica establecer alianzas con los tres niveles de gobierno involucrados en temas ambientales. Las cooperativas resaltaron la importancia de construir conciencia social sobre los problemas y sus soluciones, mientras que las instituciones enfatizaron la urgencia de programas de educación ambiental, capacitación técnica de funcionarios en temas de manejo de material reciclado y una visión de manejo integral de cuenca y sistema costero. Alineado con estas propuestas, Tovilla (2006) y Romero y Tovilla (2009), sostienen que la mejor estrategia para el manejo de manglares en esta región es la conservación basada en un enfoque de manejo integral de la cuenca a nivel medio y alto. Ante los riesgos climáticos, es necesario buscar modelos sólidos de producción con alta resiliencia, aprovechar especies locales - moluscos, crustáceos y peces como robalo, pargo, lisa, bagres y mojarra, adaptadas al territorio y a las condiciones ambientales del sistema, para lograr un uso eficiente del agua dulce y estuarina; contar con mecanismos de respaldo financiero (\$) frente a riesgos ambientales; reducir la cadena de comercialización, y promover una economía circular y solidaria. Resulta necesaria, en ecologías ausentes de garantía del acceso y la propiedad de la tierra, así como el conocimiento científico de los saberes tradicionales, la biodiversidad, la cultura en su diversidad de vida social, y la redistribución económica y social.

La experiencia de Topón muestra que las cooperativas pesqueras no solo poseen un conocimiento acumulado de su territorio, sino que cuentan con estructuras organizativas y capacidades de generar alianzas con los tres niveles de gobierno, elementos clave para una gestión sustentable de los recursos. Por ejemplo, la propuesta de trabajo comunitario en acciones como el desazolve, la reforestación y la elaboración de convenios con la CONAGUA demuestra que poseen una comprensión clara de los principios de gobernanza ambiental desde abajo, con potencial de concretarse si se estableciera una vinculación efectiva con los apoyos institucionales existentes.

CONCLUSIÓN

El presente trabajo tuvo como principal objetivo realizar una revisión crítica de las políticas públicas que están incidiendo en el manejo de las cuencas hidrográficas, el estado de conservación del ecosistema de manglar y el aprovechamiento de los recursos pesqueros en la costa de Chiapas y sus efectos en la comunidad de Topón, Pijijiapan.

Nuestros hallazgos empíricos coinciden con las contribuciones de Brenner (2018) y Vargas y Brenner (2024) en torno a que la falta de coordinación entre las políticas de desarrollo agropecuario y ambiental ha sido un detonante importante para la degradación de los manglares y el agotamiento de los recursos pesqueros en la costa de Chiapas.

En esta línea de argumentación, las políticas de colonización del Trópico Húmedo de México para dar paso a los monocultivos y cadenas de agroexportación detonaron en nuestra zona de estudio un modelo de desarrollo que no es compatible con la conservación de los manglares, creando un escenario en el que es más rentable para los actores locales y regionales desmontar una hectárea de manglar para poner un potrero o sembrar palma de aceite, plátano o mango.

La expansión de la frontera agroindustrial en los humedales y manglares de la costa de Chiapas puede considerarse como un proceso de larga duración de más de un siglo de aplicación de políticas que favorecen el desarrollo agropecuario del gran capital por encima de la pesca artesanal y la conservación de la riqueza biológica de esta región. Si no se detiene este modelo de desarrollo seguirá reduciéndose la extensión de los humedales costeros, la cobertura de manglar y la pérdida de biodiversidad, así como los modos de vida y saberes ancestrales asociados a este rico ecosistema. Es urgente repensar las políticas de desarrollo y ordenamiento territorial en la región con el fin de articular a los sectores del manejo racional de cuencas hidrográficas-ríos, desarrollo agropecuario, conservación ambiental y pesca hacia un manejo integrado de la zona costera.

Por su parte, el sector conservacionista en la costa de Chiapas carece de los recursos económicos, el capital humano y las capacidades técnicas para implementar una política ambiental efectiva en el control de la deforestación de los manglares, por lo que se requiere un mayor involucramiento del sector académico en la generación y difusión del conocimiento que permita a las comunidades de las políticas dirigidas al cuidado de los manglares y la pesca responsable. Además, como señala Brenner (2018), se requiere avanzar en una “*integración horizontal*” de las políticas de los distintos sectores que tienen incidencia en los humedales de la región, con el fin de construir políticas transversales más efectivas para contener los factores que desencadenan la deforestación del manglar y el agotamiento de los recursos pesqueros.

A pesar de que, bajo las condiciones actuales, congregarse a los diversos actores y grupos de interés que operan en los diferentes niveles de las cuencas hidrográficas de la costa de Chiapas parece una labor utópica, nuestro trabajo hace un llamado urgente a detonar plataformas de gobernanza más efectivas para la protección y restauración de los manglares y pesquerías artesanales de la región, haciendo énfasis en la inclusión de las poblaciones costeras que, por más de cincuenta años, han sido olvidadas e invisibilizadas de las políticas de desarrollo regional.

Es necesario resaltar la experiencia de la comunidad de Topón, la cual, a diferencia de las tendencias de fragmentación social y conflicto de las cooperativas de la costa de Chiapas, ha logrado construir las instituciones comunitarias adecuadas para un esquema de *gobernanza participativa e incluyente*[§] en torno al manejo de los manglares y recursos pesqueros. Los altos niveles de confianza han posibilitado el establecimiento de acuerdos comunitarios que derivan en sanciones fuertes para quienes no respetan las reglas de la conservación del manglar y de la pesca responsable.

A partir de los resultados obtenidos en el taller, se encontró que existe una discrepancia entre las políticas de manejo de cuencas y las estrategias comunitarias, y ésta radica en la falta de voluntad política para reconocer a los actores locales como socios estratégicos en los procesos de conservación de los manglares y la pesca. El análisis muestra que la conservación del sistema cuenca-manglar- pesca en comunidades organizadas como Topón, dependerá menos de promulgación de leyes y más de la

[§] Velázquez y Rosales (2023)

capacidad de las instituciones de los tres niveles de gobiernos para coordinarse entre sí y articularse efectivamente con los actores locales, para hacer un manejo integral del territorio, desde la cuenca alta hasta el mar.

El caso de Topón puede servir de guía para detonar cambios organizacionales en el resto de las cooperativas pesqueras de la costa de Chiapas y construir una agenda más sólida y amplia para la restauración de los ríos, lagunas palustres, lacustres, manglares y pesquerías artesanales en la región.

Si no se avanza en la construcción de políticas de manejo integrado de las cuencas hidrográficas-ríos y zonas costeras del estado de Chiapas, los esfuerzos locales serán insuficientes, puesto que los sedimentos y contaminantes están fluyendo con celeridad desde la cuenca alta a través de la red de ríos-arroyos y esteros conectados a los sistemas lagunares, situación que está llevando al límite la capacidad de los humedales para sostener las pesquerías que alimentan y dan trabajo a cientos de familias en la costa de esta entidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboites L (2019). La Comisión Nacional de Colonización y la expansión de la pequeña propiedad rural en México 1947-1963. *Historia Mexicana*, 68 (3): 1165-1204.
- Acosta J et al. (2023). Changes in mangrove coverage classification criteria could impact the conservation of mangroves in Mexico. *Land Use Policy*, 129: 106651.
- Almendarez LC et al. (2016). Análisis económico y de sensibilidad de la flota camaronera de alta mar del litoral del Pacífico mexicano como unidades de producción. *Denarius*, 31: 133-161.
- Ávila L; Cedeño M (2021). El desarrollo regional en el marco de los megaproyectos en el sureste de México. Venegas Herrera MAC et al. (coord.). *Políticas públicas, empleo y migración en perspectiva territorial*, Vol. III. UNAM; AMECIDER. 1-12 p.
- Banerjee S et al. (2024). Participatory Methodologies as People-Centered Social Innovation: Listening to Voices of People in Policy Practice. *Societies*, 14(12), 256. <https://doi.org/10.3390/soc14120256>
- Barrios RJ (2015). Combustibles forestales y su relación con incendios en humedales de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas. ECOSUR (Tesis), Tapachula, Chiapas. 88p
- Bezaury JE (2004). Las Áreas Naturales Protegidas Costeras y Marinas de México. Rivera-Arriaga E et al. (eds.). *El Manejo Costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad de Quintana Roo: México. 191-222p.
- Brenner L (2018). Los impactos ambientales de las políticas públicas en los manglares de Chiapas, México: una consecuencia de la falta de integración de la política ambiental. *Gestión y Política Pública*, 27: 237-267.
- Carbajal ES (2014). Evaluación del impacto del azolvamiento en La Laguna Cerritos a partir de la canalización del Río Cintalapa. ECOSUR (Tesis). Tapachula, Chiapas, México 68p.

- Cardoso JG (2016). Combined environmental stress from shrimp farm and dredging releases in a subtropical coastal lagoon (SE Gulf of California). *Marine Pollution Bulletin*, 104: 83-91.
- Castellanos A. (2024), Fronteras de aceite. Hegemonía de la palma africana en Chiapas. CIMSUR, UNAM, 376p.
- Castelán E (2001). Los Consejos de Cuenca en México. 1ª ed. México: Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua A.C: 15p.
- CEIEG. (2020). Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica. Disponible en: https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/MAPASMUNDC/Base_Pijijiapan.pdf.pdf. Consultado en: 25 de abril de 2015.
- Celaya M; Almaráz A (2018). Recuento histórico de la normatividad pesquera en México: un largo proceso de auge y crisis. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 16 (6): 33-56.
- CONABIO (2025). Monitoreo de Manglares. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Portal de Geoinformación 2025. CONABIO. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/bimagstipr/sitpriogw. Consultado en: 11 de abril de 2025.
- CONAFOR (2021). Recurrencia de incendios sobre la Reserva La Encrucijada en los municipios de Pijijiapan, Mapastepec, Acapetahua, Huixtla y Mazatán. Periodo 2007-2021. Informe Estatal, Gerencia Tuxtla Gutiérrez, Chiapas 70p.
- CONAFOR (2025). Pago por Servicios Ambientales: Incentivos económicos para la conservación de los ecosistemas. CONAFOR. Disponible en: <https://www.gob.mx/conafor/articulos/pago-por-servicios-ambientales-incentivos-economicos-para-la-conservacion-de-los-ecosistemas>. Consultado en: 22 de abril de 2025.
- CONANP (2025a). Programas de Manejo de las Áreas Naturales Protegidas de México. CONANP. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programas-de-manejo>. Consultado en: 22 de abril de 2025.
- CONANP (2025b). Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible (PROCOCODES). Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programa-de-conservacion-para-el-desarrollo-sostenible-procodes-57997>. Consultado en: 22 de abril de 2025.
- CONANP (2025c). Tratados. SEMARNAT. Leyes y Normas. Disponible en: https://www.conanp.gob.mx/leyes_normas/tratados.php. Consultado en: 22 de abril de 2025.
- CONAPESCA (2025a). Anuarios Estadísticos de Pesca y Acuicultura. Estadística de acuicultura y pesca relativa a los principales aspectos económicos y sociales. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuicultura-y-pesca>. Consultado en: 5 de abril de 2025.
- CONAPESCA (2025b). Proyecto Estratégico de Retiro Voluntario de Embarcaciones Camaroneras PERVEC. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/acciones-y-programas/proyecto->

estrategico-de-retiro-voluntario-de-embarcaciones-camaroneras-pervec. Consultado en: 22 de abril de 2025.

CONAPESCA (2025c). Incrementan dragados productividad y economía de comunidades pesqueras dentro del Convenio de Colaboración SEMAR-CONAPESCA. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/prensa/incrementan-dragados-productividad-y-economia-de-comunidades-pesqueras-dentro-del-convenio-de-colaboracion-semar-conapesca>. Consultado en: 30 de abril de 2025.

De la Presa PJ (2005). Características fisicoquímicas del suelo en áreas de manglar impactadas por dragados y sujetas a restauración, en laguna de Chantuto. Instituto Tecnológico de Tapachula (Tesis), Tapachula. 87p.

Díaz AM et al. (2019). Uso local de la madera de mangle en el sistema lagunar de Mar Muerto. Quintero AL et al. (Coord.). Estudios del bosque de manglar. Editorial Lirio, Universidad Autónoma Intercultural de Sinaloa y Universidad Autónoma Indígena de México: México D.F. 105-126p.

DOF (2002). Norma Oficial Mexicana 059- SEMARNAT-2001, de 6 de marzo de 2002. Diario Oficial de la Federación: México, DF., 85p.

DOF (2003). Norma Oficial Mexicana 022-SEMARNAT-2003, de 10 de abril 2003. Diario Oficial de la Federación, México, DF., 22p.

DOF (2006). Reforma a la Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación, 29 de abril de 2006. Diario Oficial de la Federación, México, DF., 24p.

DOF (2007). Ley General de Pesca y Acuacultura Sustentables. Diario Oficial de la Federación, 24 de julio 2007. Diario Oficial de la Federación, México, DF., 76p. Escalona DR (2021). Condición ecológica de las riberas, diversidad de macroinvertebrados y calidad del agua en el río Margaritas, Chiapas, México. ECOSUR (Tesis). Tapachula, Chiapas.

Espinoza A et al. (2011). Contextual factors influencing sustainable fisheries in Mexico. Marine Policy, 35: 343-350.

Field C D (1999). Charter for Mangroves. Yáñez-Arancibia A. y Lara-Domínguez A. L. (eds.). Ecosistemas de Manglar en América Tropical. INECOL A.C., UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA. 380 p.

FONATUR (2024). Informe de Gestión Gubernamental 2018-2024-FONATUR. 1ª ed. México: FONATUR. 88p.

Galván A; Márquez AZ (2006). Descripción biofísica de la cuenca del río Coapa, Chiapas. Hidrobiológica 16(2): 107-120.

Gálvez MM (2017). Impacto de la canalización del Río Vado Ancho sobre la Cuenca Baja, Laguna Panzacola y las Pesquerías. ECOSUR (Tesis), Tapachula, Chiapas. 58p.

- García D (2022). Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la presencia de Aldrin en Laguna de Chantuto, Chiapas, para el uso de un modelo matemático de análisis de calidad de agua. Universidad Autónoma Metropolitana, (Tesis), Xochimilco. 168p.
- Gómez R et al. (2019). Problemas asociados con la rectificación y el cambio de cauce de ríos en los sistemas lagunares de la costa de Chiapas, México. *Ciencia Pesquera*, 27(2): 59-67.
- Gómez A (2022). Solo embarcaciones nortañas explotan pesca en Chiapas. *Diario del Sur*, 29 de junio 2022.
- Gómez R et al. (2014). Índices tróficos de importancia ecológica y su relación con algunas variables fisicoquímicas en el sistema lagunar estuarino Chantuto-Panzacola, Chiapas, México. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras*, 31 (2): 47-57.
- Gómez R et al. (2019). Problemas asociados con la rectificación y cambio de cauce de ríos en los sistemas lagunares de la costa de Chiapas, México. *Ciencia Pesquera*, 27 (2): 59-67.
- Hernández AH et al. (2004). Water quality and presence of pesticides in a tropical coastal wetland in southern Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 48(11-12): 1130-1141.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Base de Datos. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx>. Consultado en: 15 de abril de 2025.
- INEGI (2025). Uso de suelo y vegetación. Series I-VI. INEGI. Geografía y Medio Ambiente. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>. Consultado en: 22 de abril de 2025.
- Kauffman JB; Donato DC (2012). Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. CIFOR Working Paper 86.
- Leal M; Spalding M (2024). The State of the World's Mangroves 2024 (eds). Global Mangrove Alliance. DOI: <https://doi.org/10.5479/10088/119867>
- Leonard E (2021). Fronteras internas, extracción de rentas y enclaves ganaderos: la colonización agraria del Istmo Central mexicano, 1945-1985. *Trace*, 80: 47-78.
- Linares R; Tovilla C (2013). Pesticidas Organoclorados en una laguna costera. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). La Biodiversidad en Chiapas: Estudio Estado, Vol. I. ISBN: 978-607-7607-74-8. pp. 322-324.
- López BW et al. (2013). El manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales (Folleto Técnico Núm. 19). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Pacífico Sur, Campo Experimental Centro de Chiapas. Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, México. Número de páginas 79p.
- López AA (2015). Turismo y desarrollo sustentable en áreas protegidas o sobre los "nuevos" contrasentidos para la producción y el marasmo en el ámbito rural. *Desacatos*, 47: 36-53.

- Machuca MA (2014). Diagnóstico del estado actual del uso y manejo de la zona costera en el Estado de Chiapas. ECOSUR (Tesis), Tapachula. 128p.
- Martínez GJ (2017). Estimación de la tasa de azolvamiento de la Laguna Pampa el Cabildo Chiapas. ECOSUR (Tesis), Tapachula. 78p.
- Márquez AZ et al. (2006). Consideraciones batimétricas del sistema lagunar Carretas-Pereyra, Chiapas, México. Hidrobiológica, 16 (2): 121-126.
- Martínez LR et al. (2009). Camaronicultura mexicana y mundial: ¿actividad sustentable o industria contaminante? Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 25 (3): 181-196.
- Martínez ST; González LF (2016). La construcción de la política pesquera en México. Una mirada desde el campo geográfico. Revista Atlántica de Economía, 2: 2-27.
- Morales G B (2010). Estructura del manglar y uso del recurso leña en cuatro localidades de la Reserva de Biosfera "La Encrucijada" Chiapas, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Tesis), Tapachula. 86p.
- Orive A (1987). Historia y continuidad de la política hidráulica. Ingeniería Hidráulica México, 2 (1): 29-30.
- Orozco GM (2004). La pesca en Chiapas. 1ª ed. Fomento Económico de Chiapas A.C. 72p.
- Perevotchchivoka M; Ochoa AM (2012). Avances y limitantes del programa de pago por servicios ambientales hidrológicos en México, 2003-2009. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 10 (3): 89-112.
- PROFEPA (2025). Manifestación de Impacto Ambiental (MIA). Disponible en: <https://www.gob.mx/profepa/articulos/manifestacion-de-impacto-ambiental-mia>. Consultado en: 22/04/2025.
- Pulido VM; Tovilla C (2003). Conservación y Manejo del Manglar en el Área Natural Protegida El Gancho Murillo, costa de Chiapas. H. Ayuntamiento de Tapachula, Laboratorio de Ecología de Manglares y Zona Costera, ECOSUR, Tapachula Chiapas, México, 38p.
- Ríos SA; Pérez I (2018). Caracterización y distribución de la batimetría, parámetros fisicoquímicos y sedimentos del sistema lagunar Mar Muerto, Oaxaca-Chiapas, México. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. (Tesis), Chiapas. 189p.
- Rivera G et al. (2009). Assessment of an artisanal shrimp fishery of *Litopenaeus vannamei* in a lagoon-estuarine system based on the concept of maximum sustainable yield. Revista de Biología Marina y Oceanografía, 44 (3): 635-646.
- Rivera G et al. (2014). Evolución y manejo de la pesquería de camarón blanco en un sistema lagunar-estuarino del sur de México. Méndez MC; Reyes F (coord.). Biodiversidad y Sustentabilidad. Investigaciones sobre la biodiversidad para el desarrollo social. Volumen II. UNICACH: Chiapas. 93-112p.

- Rodríguez MT et al. (2013). Manglares de México. Extensión, distribución y monitoreo. 1ª ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 128p.
- Romero EI et al. (2020). The influence of hábitat of the spatio-temporal dynamics of fish assemblages in a lagoon estuarine system of the Mexican Pacific. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48: 23-37.
- Romero EI; Tovilla C (2009). Estructura del manglar en el sistema lagunar costero de Carretas-Pereyra, reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas, México. *Lacandonia, Revista Ciencias UNICACH* 3 (1): 19-28.
- Rosete FA (2006). El ordenamiento ecológico marino y costero: tendencias y perspectivas. *Gaceta Ecológica*, 78: 47-63.
- Salas RL (2021). Producción de hojarasca y estructura forestal en un manglar tipo ribereño del Pacífico Sur, México. *ECOSUR (Tesis)*, Tapachula. 74p
- Santamaría S (2014). Caracterización estructural y cambios en la cobertura del manglar en el sistema lagunar Los Patos Sólo Dios, Pijijiapan, Chiapas. *ECOSUR (Tesis)*, Tapachula. 88p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (1974). Avance de la deforestación sobre la zona media y alta de la Sierra Madre de Chiapas en el periodo 1940-1970. Informe de campo. Ciudad de México. 65p.
- SEMARNAP (1996). Programa de Áreas Naturales Protegidas de México 1995-2000. 1ª ed. México: SEMARNAP/INEC. 117p.
- Sotelo EI; Alarcón M. (2017). La gestión ambiental en México: su evolución vista en cuatro etapas. Sotelo EI; Rosas Huerta A (coord.). Políticas públicas y medio ambiente. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. 41-60.
- Susnávar M et al. (2022). Análisis de la implementación en la política pública pesquera en México. *Estudios Políticos*, 56: 233-253.
- Toledo JT (2018). Reflexiones y propuesta de solución sobre la crisis ambiental: El caso de La Encrucijada, Chiapas. *Denarius*, (34): 195.
<https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcsh/denarius/v2018n34/>.
- Tovilla C (2006). Propuesta Para la Conservación, Manejo y Restauración de los Bosques de Manglar de la Costa de Chiapas. Consejo de Ciencia y Tecnología de Chiapas, (COCYTECH) y ECOSUR, Laboratorio de Ecología de Manglares y Zona Costera. Tapachula Chiapas, México. 148 p.
- Tovilla C et al. (2007). Informe Final: Inventario Forestal de los Bosques de Manglar de la Costa de Chiapas, México. COCYTECH y Laboratorio de Ecología de Manglares y Zona Costera ECOSUR. Tapachula Chiapas, México. 92p.
- Tovilla C (2008). La dimensión en la crisis ambiental en la costa de Chiapas y la necesidad de un programa de ordenamiento de las actividades. Sánchez JE; Jarquín R (eds.). *La Frontera Sur. Reflexiones*

sobre el Soconusco, Chiapas y sus problemas ambientales, poblacionales y productivos. Senado de la República LX Legislatura; El Colegio de la Frontera Sur. 25-41.

- Tovilla C et al. (2014). Informe Final: Restauración de Áreas de Manglar, Impactadas por dragados con *Conocarpus erectus* y *Rhizophora mangle*, en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. Laboratorio de Manejo Integral de Sistemas Costeros, ECOSUR y Comisión Nacional Forestal CONAFOR, Tapachula Chiapas, México 176p.
- Tovilla C et al. (2018). Manglares del Pacífico Sur, Monitoreo de la Estructura y Composición, Como Una Estrategia para a Conservación, Restauración y Manejo: Informe Final del Proyecto FFN005" Inventario y Monitoreo del Estado Actual de los Bosques de Manglar de Chiapas y Oaxaca. Laboratorio de Manejo Integral de Sistemas Costeros, ECOSUR y CONABIO, Tapachula Chiapas, México 289p.
- Tovilla C; Salas RL (2019). Patrones de consumo y demanda de leña en dos comunidades de la costa de Chiapas. Quintero AL et al. (Coord.). En Estudios del bosque de manglar. Editorial Lirio México D.F. 127-159p.
- Tovilla C (2022). Impacto de la Canalización del Río San Nicolás Sobre los Humedales y la Pesquería Entre 1999-2021. Disertante en el IV Congreso Internacional de Investigación en “La Investigación en la Diversidad Social”, impartido por La Universidad de San Carlos de Guatemala y El Centro Universitario de Totonicapán, noviembre de 2022.
- US-EPA (2006). Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Región iii btg Marine Creening Benchamarks, Métodos de uso 3620, 3546, 3660, y 8081.
- Valderrama LL. et al. (2017). Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980–2015. 1ª edición. CONABIO: Ciudad de México, D.F. 126 p.
- Vargas D; Brenner L. (2024). Comunidades y políticas públicas mexicanas en manglares: entre la conservación y el turismo. Estado & comunes, 2(19), 77-99. https://doi.org/10.37228/estado_comunes.v2.n19.2024.347
- Vázquez CI; Fermán JL (2009). Las Áreas Naturales Protegidas como fuente de conflictos entre la conservación y el desarrollo. Caso de estudio en la pesca ribereña en México. Asociación Latinoamericana de Sociología, XXVII Congreso de la Asociación Latinoamericana de Sociología y VIII Jornadas de Sociología de la Universidad de Buenos Aires: 1-24.
- Vázquez G et al. (2023). Análisis de la producción de camarón de estero en el sistema lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. Luna LM et al. (coord.). Aportaciones al conocimiento biológico de Chiapas, Volumen I. UNICACH. 173-186.
- Velázquez PC et al. (2019). Estructura del manglar y su influencia en el almacén de carbono en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. Madera y Bosques, 25 (3). doi: 10.21829/myb.2019.2531885.

- Velázquez VM; Rosales R (2023), Tipologías de la gobernanza territorial en la pesca de langosta espinosa en las reservas de la biósfera de Sian Ka'an y Banco Chinchorro, Quintana Roo, México. *Sociedad y Ambiente*, 26: 1-29.
- Warman J et al. (2021). Análisis de los impactos en las coberturas forestales y potencial de mitigación de las parcelas del programa Sembrando Vida implementadas en 2019. 1ª ed. World Resources Institute-Mexico. 12p.
- Wenger AS et al. (2017). A critical analysis of the direct effects of dredging on fish. *Fish and Fisheries*, 18 (5): 967-985.
- Yáñez A; Lara AL (1999). Los manglares de América Latina en la Encrucijada. Yáñez A; Lara AL (eds.), *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA.

Índice

A

adaptabilidad, 158
aislamiento, 203, 205, 207

B

bicentenario, 156, 159, 160
biophysical, 40

C

cajas Bruce, 148, 151
calidad, 74, 75, 76, 78
canela, 137
capsicum annuum var. *aviculare*, 86, 88
cepas, 64, 65, 67, 68, 69

D

densidad poblacional, 150
Dosidicus gigas, 40, 41, 44, 46

E

Enterobacter cloacae, 9
extractos vegetales, 62, 69

F

fitopatología, 64
flavonoides, 21, 23
forraje
 seco, 157, 158, 159
 verde, 157, 158, 159, 160

H

híbridos, 97

I

imágenes digitales, 82
índice
 de verdor, 84
 vegetativo, 81
 de vegetación, 80
inhibición del crecimiento, 64, 66, 67
interacción, 160

M

melón, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151
micronutrientes, 75, 76

N

NDVI, 108, 113, 114, 116, 117

Q

Quitosano, 111, 113

R

rendimiento, 144, 150, 151
 de biomasa, 11, 15

S

sensorial, 52, 57
silicosulfocálcico, 137
sulfocálcico, 137

T

Thiamethoxam, 122, 123, 126
tratamiento químico, 122, 127
trigo, 81
 cristalino, 74

V

Valle del Yaqui, 97
vigor de plántula, 123

X

X-ray, 40, 41, 43, 45

Y

yeso agrícola, 74, 75, 76, 78
yogurt, 51

Z

zea mays, 19, 121
zigzag, 145, 146, 147, 150, 151
zinc, 137

Editores



Leandris Argentele-Martínez

Profesor e Investigador Titular "C" del Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Yaqui (ITVY). Miembro del Sistema Nacional de investigadoras e Investigadores del SECIHTI, Nivel 1. Profesor Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Líder del Cuerpo Académico consolidado ITVAYA-CA-3. Líneas de investigación: Fisiología Vegetal, Bioquímica, Biología Celular y Molecular en plantas y microorganismos. Doctorado en Ciencias Biotecnológicas. Desarrollo de investigaciones sobre mecanismos fisiológicos, rutas anapleróticas y mecanismos moleculares activados por los organismos durante su adaptación estreses abióticos. Uso de marcadores moleculares de tolerancia de los organismos al estrés abiótico (salinidad, sequía y calor). Manejo de técnicas de isótopos estables para el

seguimiento de reacciones bioquímicas en células y tejidos. Aplicación de técnicas experimentales univariadas y multivariadas para el procesamiento de datos. Entre sus principales proyectos, se encuentra vigente en 2022 “Aplicaciones del microbioma y el metaboloma de la *Parkinsonia aculeata* L. Sp. Pl. para la mitigación de estreses biótico y abiótico en el semidesierto y en especies de interés agrícola en México” correo electrónico para contacto: oleinismora@gmail.com



Ofelda Peñuelas Rubio

Profesor e Investigador Titular "C" del Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Yaqui (ITVY). Miembro del Sistema Nacional de investigadoras e Investigadores del SECIHTI, Nivel 1. Profesora con Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, miembro del Cuerpo Académico consolidado ITVAYA-CA-3. México. Realizó dos estancias posdoctorales (Enero 2016 - Diciembre 2017) dentro del programa de Estancias Nacionales de CONACYT en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional unidad Sinaloa del Instituto Politécnico Nacional en el área de Ecología Molecular de la Rizósfera. Es Doctora en Ciencias especialidad

en Biotecnología. Su quehacer científico lo desarrolla en el área agrícola, principalmente en el manejo sustentable de los recursos implicados en los agroecosistemas y el aprovechamiento de la microbiota del suelo. Ha participado en colaboración con distintos grupos de investigación lo que le ha permitido participar en proyectos multidisciplinarios y en publicaciones científicas. Email para contacto: ofeperub@gmail.com



 Jaime Garatuza-Payán

Profesor e Investigador “C” del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON). Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente. Miembro del sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores del SECIHTI Nivel 2. Profesor perfil deseable (PROMEP). Miembro del cuerpo académico consolidado “Ciencias del Agua”. Miembro del Comité Científico del Programa Mexicano del Carbono (PMC). Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Profesor-Investigador distinguido en el Instituto Tecnológico de Sonora. Entre sus principales

expertices se encuentran las líneas de investigación y generación del conocimiento: Biotecnología en sistema de producción agrícola, manejo de cuencas, hidrometeorología y cambio climático. Cuenta con más de 100 publicaciones científicas en revistas de alto factor de impacto. Email para contacto: jaime.garatuza@itson.edu.mx



Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000

Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil

Telefone (66) 9608-6133 (Whatsapp)

<https://www.editorapantanal.com.br>

contato@editorapantanal.com.br



9786585756563

