15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

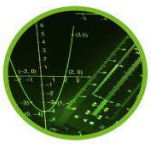
15-16 octubre de 2026

MEMORIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

MEMORIA DE LA MESA 3

CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGRONÓMICAS

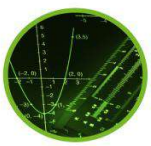
TOMO I

TEMÁTICAS

1. **AGRICULTURA PROTEGIDA, AGRICULTURA Y MANEJO AGRONÓMICO DE CULTIVOS**
2. **BIOESTIMULANTES Y BIOFERTILIZANTES**
3. **NUTRICIÓN VEGETAL FERTILIZACIÓN Y SUSTRATOS**

El contenido de los trabajos aquí publicados es responsabilidad absoluta de los autores y coautores




Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible


Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social


Ciencias Biológicas y Agronómicas


Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global


Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

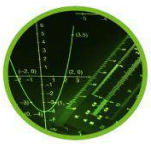
Compiladoras y Editoras

Rosa María García Núñez

Graciela Huerta Miranda

Amelia Rendón García

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

Contenido

TEMÁTICA 1. AGRICULTURA PROTEGIDA, AGRICULTURA Y MANEJO AGRONÓMICO DE CULTIVOS 9

Adaptación de sandía (*Citrullus lanatus*) en espaldera con acolchado plástico reutilizable en suelos ácidos y clima lluvioso

José Daniels Cruz Páez, Aurelio Morales Rivera, Alberto Polito Tenorio, Marco Antonio Solís Zavala 10

Capacidad de emergencia de yemas en variedades de caña de azúcar

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez, Leonardo Gómez-Martínez, Libia Iris Trejo-Téllez, Fernando Carlos Gómez-Merino 20

Comportamiento productivo de cultivares de arroz bajo condiciones de trópico húmedo en Tabasco, México

Sergio Salgado Velázquez, Dante Sumano López, Samuel Córdova Sanchez, Pablo Ulises Hernández Lara 34

Dinámica nutrimental y respuesta fisiológica y agronómica del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) bajo diferentes proporciones de biosólido en un sistema de agricultura protegida con fertirrigación controlada

Litzi Arizbeth Valdez Muñoz, Josefa Espitia López, Benito Flores Chávez, Paul Misael Garza López 52

Evaluación agronómica del chiltepin (*Capsicum annuum var. Glabriusculum*) en fibra de coco y suelo en invernadero

Santos Emiliano Mendoza-Rodríguez, José Luis Rodríguez-Chávez 68

Evaluación en las modificaciones de los componentes del rendimiento de papa cv. Fianna inducidas por podas foliares y florales

Santa Lucía Quintero Bastida, Emanuel Arias Rojas, José Antonio López Sandoval, José Alberto Salvador Escalante Estrada 84

Influencia de los períodos de competencia de malezas sobre el contenido relativo de clorofila y el NDVI en maíz del Valle de Mexicali

Luis Santiago Valenzuela Muñoz, Andrés González Ruiz, Carlos Enrique Ail Catizim, Henry López López 102



La agricultura protegida mexicana en el contexto actual: cultivos, estructuras y tendencias

Aurelio Bastida Tapia 113

Manejo agronómico y crecimiento de la flor de margarita (B*ellis sp*.) en Tixtla, Guerrero, México

Yolanda Isabel Escalante Estrada, José Alberto Salvador Escalante Estrada, Luis Daniel Samper-Escalante..... 131

Producción de cuatro híbridos de lilis *(lilium spp.)* bajo estructura protegida en la Universidad Tecnológica de la Sierra Sur de Oaxaca

Lucero Jazmin García Cruz, Misael Navarro Aparicio, Daniel Alejandro Olivera Reséndiz, Ibeth Cortes Ángeles 144

Producción sostenible de lechuga (*Lactuca sativa* L.) a campo abierto

Mercedes María Cuenca-Condoy, Bruno Laureano-Ahuelicán, Fidel Carreto-Adame . 154

Tratamientos pregerminativos en semillas de chile tusta (*Capsicum annuum* L.)

Sagrario Esteva-Martínez, Isidro Morales-García, Beatriz Quiroz-González 163

TEMÁTICA 2. BIOESTIMULANTES Y BIOFERTILIZANTES 173

Aplicación foliar y al suelo de algas marinas en la producción de jitomate en condición de agricultura protegida

Patricio Apáez-Barrios, Stefany Guadalupe Alonso-Alvarez, Yurixhi Atenea Raya-Montaño, Maricela Apáez-Barrios..... 174

Bioestimulantes foliares en el crecimiento y rendimiento de chile habanero bajo condiciones de casa sombra

Juan Carlos Álvarez Hernández, Juan Jesús Alvarado Mendoza, Saúl Pardo Melgarejo 190

Bioestimulantes y elicitores de resistencia: éxitos comerciales divergentes y posibles causas de la brecha traslacional

Nicolás Alberto Priego-Ranero, Martin Heil 201

Compuestos con potencial bioestimulante en el cultivo *in vitro* de *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews

Javier Camacho-Morales, Lourdes Georgina Iglesias-Andreu, Mauricio Luna-Rodríguez, Susana Hernández-Sánchez 218

Efecto de bioestimulantes en el crecimiento de plántulas de chile serrano (*Capsicum annuum* L.) cultivadas bajo condiciones semi-controladas

Lucía Araceli, Manzanarez-Jiménez; Cipriano, García-Gutiérrez; Gustavo Hernández-Carmona 229

Efecto de bioestimulantes sobre la brotación, crecimiento vegetativo y fructificación temprana de higo (*Ficus carica* L.) cv. Black Mission bajo condiciones de agricultura protegida

Yohandri Ruisanchez-Ortega, Fidel Núñez-Ramírez, Celia Selene Romeros-Félix, Jesús del Rosario Ruelas-Islas 242

Efecto de la aplicación de ácido salicílico y ácido glutámico sobre el contenido de clorofilas en plantas de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.)

Jesús Yassir Espinoza Galaviz, Carlos Estuardo Castillo Chacón, Julio César Tafolla Arellano, José Antonio González Fuentes 251

Evaluación local de micorriza y *Trichoderma* comerciales en la germinación, crecimiento y producción de chile chiltepín

Estela Sañudo-Ayala, Karelia Arizbeth Meza-Ayala, Jaime Alberto Félix-Herrán, Rey David Ruelas-Ayala 260

Quitosano como bioproducto agrícola: propiedades, obtención y aplicaciones en cultivos

José Lázaro Francés Mesa 275

Respuesta agronómica de tres genotipos de *Amaranthus* spp. a la bioestimulación con quitosano y ácido húmico al inicio de la fase reproductiva

Pablo Balderrama-Jiménez, José Bernardo Nieto-Flores 285

TEMÁTICA 3. NUTRICIÓN VEGETAL, FERTILIZACIÓN Y SUSTRATOS 293

Aplicación edáfica de fosforo, potasio y magnesio en el crecimiento vegetativo, contenido de clorofila y número de estomas en *Stenocereus pruinosus* 294

Luis Antonio Olivera Baez 302

Aplicaciones de yodo y glutamina en la concentración de hierro, cobre y zinc en lechuga

Willian Kenneth Lizárraga-Estrada; Fernando Carlos Gómez-Merino; Libia I. Trejo-Téllez; Víctor Hugo Carbajal-Vázquez 312

Calidad nutrimental del grano de frijol y maíz en función al tipo de fertilización

Iralda Yadira Pérez González, José Alberto Salvador Escalante Estrada, Víctor F. Conde Martínez 324

Consorcio bacteriano nativo del compostaje elicitado con nanopartículas SBA-15 como estrategia para aumentar el fósforo disponible

María del Pueblito Guevara Santana, Ramón Gerardo Guevara González, Rebeca Xilotl Jurado, Adrián Esteban Ortega Torres 340

Efecto del lixiviado de lombriz frente a fertilizantes químicos en el desarrollo del cultivo de rábano (*Raphanus sativus*)

Myrian Barrera-Abundes, Susana Martínez-Martínez, José Antonio Menes-Escalera .. 347

Efecto del neodimio en el contenido foliar de Fe, Cu y Zn en lechuga cultivada en hidroponía

Imelda Rueda-López, Fernando Carlos Gómez-Merino, Libia Iris Trejo-Téllez, Manuel Sandoval-Villa 359

Efecto del tipo de sustrato sobre el prendimiento y brotación de esquejes de morera (*Morus alba* L.)

Filiberto Anzures-Olvera; Celi Gloria Calixto Valencia; Oscar M. Antúnez-Ocampo; Fernando Edgar Martínez-Silva 365

Evaluación de la eficiencia de fertilizantes químicos y orgánicos en el crecimiento de plantas de pimienta gorda (*Pimenta dioica* L.) producidas en vivero

Luis Guadalupe Sierra, Olga Santiago Trinidad, Cristal Arany Guerrero Ortiz 383

Evaluación del lixiviado obtenido de lombricomposta de sustrato agotado de hongo en chile y jitomate

Ana Bell Sánchez-Aguilar, Manuel Sandoval-Villa, Javier Suárez-Espinosa 372

Evolución del rendimiento y de nutrimentos en limón mexicano con distintos manejos de fertilización

José C. García-Preciado, Jesús Andrés García Guerrero, Juan Carlos Álvarez Hernández 383

Fertilidad química de suelos maiceros de Quintana Roo

César Antonio Casasola-Elizondo, Erick Cortez-Torres, Francisco Rodriguez-Neave, Efren Andrés-Saucedo 393

Propiedades físicas de sustratos formulados con fibra de coco y tezontle para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Brenda González-Mendéz, Sara Monzerrat Ramírez-Olvera Ana Carolina Uitz-Chin, Víctor Manuel Ordaz-Chaparro 406

Propiedades físicas de sustratos hortícolas. Relación con su eficiencia hídrica en agricultura protegida

Yunier Sosa Sánchez, Juan Enrique Rubiños Panta, Cándido Mendoza Pérez, Roberto Ascencio Hernández 415

Respuesta del crecimiento y metabolismo antioxidante radicular de plántulas de *Brassica oleracea* germinadas en sustratos con frass de *Hermetia illucens*

Hugo González-Lara, Ana Angélica Feregrino-Pérez, Benito Parra-Pacheco, Juan Fernando García-Trejo 431

Revalorización de la borra de café mediante lombricompostaje con Eisenia fetida: una revisión documental

Graciela Hortensia Niño Mendoza 441

TEMÁTICA 1. AGRICULTURA PROTEGIDA, AGRICULTURA Y MANEJO AGRONÓMICO DE CULTIVOS

Adaptación de sandía (*Citrullus lanatus*) en espaldera con acolchado plástico reutilizable en suelos ácidos y clima lluvioso

José Daniels Cruz Páez[1], Aurelio Morales Rivera, Alberto Polito Tenorio, Marco Antonio Solís Zavala

Resumen

La Sandia conducida en espaldera con acolchado plástico reutilizable en Juan Rodríguez Clara, Veracruz. El ensayo se estableció en la temporada de lluvias de 2025 en el Instituto Tecnológico Superior de Juan Rodríguez Clara, con el híbrido 'Sangrienta'. Se analizaron tres condiciones de acolchado: plástico nuevo (PN), plástico reutilizable (PR) y suelo sin plástico (SP), con tres repeticiones. Se registraron variables morfológicas, fisiológicas y productivas; los datos se analizaron mediante ANOVA, comparación de medias y correlación de Pearson. El tratamiento PR presentó mayores valores numéricos en diámetro de tallo, largo de guía, área foliar, número de guías principales, clorofila e índice de cosecha. En productividad no se detectaron diferencias significativas por tratamiento; sin embargo, el peso promedio de fruto (PV), expresado en g fruto^{-1}, mostró tendencia favorable en PR (4880.07), seguido de SP (4230.40) y PN (3370.40). Las correlaciones indicaron asociación positiva entre diámetro de tallo, largo de guía y área foliar. Se concluye que la espaldera con acolchado reutilizable es una alternativa viable para mejorar el manejo de sandía en ambientes húmedos y suelos ácidos.

Palabras clave: Acolchado, Cucurbitáceas, Productividad, Suelos ácidos, Tutorado.

[1] Instituto Tecnológico Superior de Juan Rodríguez Clara, Ingeniería en Agronomía, Juan Rodríguez Clara, Veracruz, México. aumori236@hotmail.com, masolisz@itsjrc.edu.mx, apolitot@itsjrc.edu.mx, jdcruzp@itsjrc.edu.mx

Abstract

Watermelon (*Citrullus lanatus*) production in tropical regions with acidic soils and rainy conditions is limited by low nutrient availability, excessive moisture, and high disease pressure. The objective was to evaluate the agronomic adaptation of trellised watermelon with reusable plastic mulch in Juan Rodríguez Clara, Veracruz, Mexico. The field trial was conducted during the 2025 rainy season at the Instituto Tecnológico Superior de Juan Rodríguez Clara, using the hybrid 'Sangrienta'. Three mulch conditions were analyzed: new plastic mulch (PN), reusable plastic mulch (PR), and bare soil (SP), with three replications. Morphological, physiological, and productive variables were recorded. Data were analyzed through ANOVA, mean comparison, and Pearson correlation. The PR treatment showed the highest numerical values for stem diameter, vine length, leaf area, number of main vines, chlorophyll content, and harvest index. No significant treatment effects were detected for productivity; however, average fruit weight (PV), expressed as g fruit^{-1}, showed a favorable trend in PR (4880.07), followed by SP (4230.40) and PN (3370.40). Correlation analysis showed positive associations among stem diameter, vine length, and leaf area. It is concluded that trellis management combined with reusable mulch is a feasible alternative to improve watermelon management under humid environments and acidic soil conditions.

Keywords: Acidic soils, Cucurbits, Mulch, Productivity, Trellis.

Introducción

La sandía (*Citrullus lanatus*) es una cucurbitácea de importancia agrícola por su valor comercial, nutricional y adaptabilidad a diferentes sistemas productivos (Hdider *et al*., 2020). Sin embargo, su rendimiento puede disminuir en ambientes con suelos ácidos y alta precipitación, debido a que estas condiciones afectan el desarrollo radicular, la disponibilidad de nutrientes, la aireación del suelo y la sanidad del cultivo. En suelos ácidos, el bajo pH reduce la disponibilidad de fósforo, calcio y magnesio, y puede incrementar la solubilidad de aluminio y manganeso, elementos que interfieren con el crecimiento vegetal (Shaaban, 2024; Zhang *et al*., 2023). En regiones tropicales y subtropicales con lluvias frecuentes, el exceso de humedad también favorece la presencia de enfermedades foliares y radiculares, además de aumentar la lixiviación de nutrientes. Por ello, el manejo agronómico debe orientarse a reducir el contacto del fruto y del follaje con el suelo, mejorar la ventilación del dosel y conservar la humedad sin generar saturación. El sistema de conducción en espaldera constituye una alternativa para optimizar el uso vertical del espacio, facilitar las labores de manejo y disminuir problemas sanitarios asociados al contacto directo con suelo húmedo. Esta práctica, combinada con acolchado, puede mejorar el microambiente del cultivo y la eficiencia en el uso del agua (Devi *et al*., 2020; Zokirov *et al*., 2024). Asimismo, el uso de

plásticos reutilizables como acolchado agrícola representa una estrategia compatible con enfoques de producción sostenible, al disminuir la generación de residuos por ciclo y mantener efectos favorables sobre temperatura, humedad y control de malezas. En condiciones de clima lluvioso, estas coberturas pueden contribuir a estabilizar el ambiente edáfico y favorecer el desarrollo inicial del cultivo. Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la adaptación agronómica del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en sistema de espaldera con acolchado plástico reutilizable, bajo condiciones de suelos ácidos y clima lluvioso en Juan Rodríguez Clara, Veracruz.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó durante el ciclo agrícola de lluvias de 2025 en el campo experimental del Instituto Tecnológico Superior de Juan Rodríguez Clara, ubicado en Juan Rodríguez Clara, Veracruz, México, en las coordenadas 18°0'58.44" latitud norte y 95°24'4.45" longitud oeste. El sitio se localiza aproximadamente a 140 m de altitud, con clima cálido húmedo, temperatura media anual cercana a 26 °C y precipitación promedio anual de 1200 mm. El suelo del área experimental presentó condición ácida (pH 4.5), textura franco-arenosa y baja capacidad de intercambio catiónico, características que justificaron la evaluación de estrategias de manejo adaptadas a condiciones edafoclimáticas limitantes.



Figura 1. Colocación y ajuste del acolchado plástico durante el establecimiento del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en sistema de espaldera.

Se utilizó el híbrido comercial de sandía 'Sangrienta', seleccionado por su vigor y tolerancia a enfermedades asociadas a ambientes cálido-húmedos. Las plántulas se produjeron en charolas de germinación con sustrato tipo peat moss, bajo condiciones protegidas. El trasplante se realizó cuando las plantas presentaron de dos a tres hojas verdaderas y un sistema radicular vigoroso. Posteriormente se instaló la estructura de espaldera con postes, alambre guía e hilos de tutorado vertical. Los brotes principales fueron guiados manualmente durante el desarrollo del cultivo y se realizó desbrote selectivo para mantener el crecimiento dirigido.



Figura 2. Establecimiento inicial y desarrollo de plántulas de sandía (*Citrullus lanatus*) bajo acolchado plástico en campo experimental

El manejo agronómico incluyó deshierbe manual, mantenimiento del tutorado, manejo integrado de plagas y enfermedades, y fertilización conforme al estado fenológico del cultivo. Para efectos del análisis de acolchado, se consideraron tres tratamientos: plástico nuevo (PN), plástico reutilizable (PR) y suelo sin plástico (SP), con tres repeticiones. Se evaluaron variables morfológicas y fisiológicas: diámetro de tallo en dos fechas (DTF1 y DTF2), número de hojas por guía (NPG), largo de guía por planta (LGP), área foliar (AF), número de guías principales (NGF1 y NGF2) y clorofila (CL). También se registraron variables productivas: número de flores (NF), peso fresco de fruto/rendimiento (PFR), número de frutos rentables (NFRT), número de frutos comerciales (NFC), peso promedio de fruto expresado en g fruto^{-1} (PV), peso seco (PS), biomasa aérea (BA) e índice de cosecha (IC).



Figura 3. Desarrollo vegetativo y emisión de guías en plantas de sandía (Citrullus lanatus) establecidas bajo acolchado plástico

Los datos fueron procesados mediante análisis de varianza (ANOVA). Cuando se detectaron diferencias entre tratamientos, se realizó comparación de medias mediante Tukey ($p \leq 0.05$). Adicionalmente, se estimaron correlaciones de Pearson entre variables estructurales y productivas, considerando asociaciones fuertes aquellas con $|r| \geq 0.70$ y $p \leq 0.05$. En la interpretación se distinguieron estrictamente los efectos estadísticamente significativos de las tendencias numéricas, con el fin de evitar sobreinterpretar respuestas no confirmadas por el análisis.

Resultados y discusión

El análisis de varianza mostró efectos de tratamiento en diámetro de tallo en la segunda medición (DTF2; $p = 0.022$) y largo de guía por planta (LGP; $p = 0.021$), mientras que área foliar (AF), número de guías principales (NGF1) y clorofila (CL) presentaron valores cercanos al umbral de significancia. En la comparación de medias, las variables morfofisiológicas compartieron la misma agrupación estadística; por ello, las diferencias observadas se interpretan como tendencias numéricas. En este sentido, el plástico reutilizable registró valores mayores en DTF1, DTF2, LGP, AF, NGF1 y CL, lo que sugiere un posible efecto favorable sobre el desarrollo vegetativo del cultivo.

Cuadro 1. Efecto del tipo de acolchado sobre variables morfofisiológicas de sandía (*Citrullus lanatus*) conducida en espaldera.

Trat.	DTF1	NPG	DTF2	LGP	AF	NGF1	NGF2	CL
PN	6.40 a	7.86 a	4.06 a	81.90 a	96.27 a	2.80 a	1.20 a	57.56 a
PR	8.06 a	7.80 a	5.06 a	112.10 a	113.10 a	4.73 a	1.66 a	60.00 a
SP	6.60 a	8.43 a	4.40 a	93.23 a	92.60 a	4.00 a	1.73 a	57.73 a

PN = plástico nuevo; PR = plástico reutilizable; SP = sin plástico. DTF = diámetro de tallo; NPG = número de hojas por guía; LGP = largo de guía por planta; AF = área foliar; NGF = número de guías; CL = clorofila. Medias con la misma letra no difieren estadísticamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

En las variables productivas, el ANOVA no detectó diferencias significativas por efecto de tratamiento para número de frutos, peso fresco/rendimiento, número de frutos rentables, número de frutos comerciales, peso de fruto, peso seco, biomasa aérea e índice de cosecha. Para PV, el valor de probabilidad fue cercano al umbral estadístico ($p = 0.093$), por lo que se interpreta como tendencia y no como diferencia significativa. Al revisar la escala de la variable, los valores se expresaron como peso promedio de fruto en g fruto^{-1}; bajo este criterio, el plástico reutilizable registró el mayor valor numérico (4880.07 g fruto^{-1}), seguido del tratamiento sin plástico (4230.40 g fruto^{-1}) y del plástico nuevo (3370.40 g fruto^{-1}). Esta tendencia es agronómicamente relevante para sandía, pero no debe presentarse como superioridad estadística estricta en este ciclo de evaluación.

Cuadro 2. Influencia del tipo de acolchado sobre variables productivas y de rendimiento en sandía (*Citrullus lanatus*).

Trat.	PFR	NFRT	NFC	PV (g fruto^{-1})	PS	BA	IC
PN	1.43	0.73	0.33	3370.40	159.87	48.70	7.66
PR	1.93	0.60	0.33	4880.07	217.67	45.03	9.50
SP	2.03	0.30	0.06	4230.40	171.00	40.06	9.46

PFR = peso fresco/rendimiento reportado en el informe técnico; NFRT = número de frutos rentables; NFC = número de frutos comerciales; PV = peso promedio de fruto expresado en g fruto^{-1}; PS = peso seco; BA = biomasa aérea; IC = índice de cosecha.



Figura 4. Fructificación de sandía (Citrullus lanatus) conducida en sistema de espaldera bajo condiciones de campo

Las correlaciones de Pearson evidenciaron relaciones estructurales relevantes entre variables de crecimiento. El diámetro de tallo en la segunda medición se asoció positivamente con el largo de guía, área foliar y número de guías primarias, lo que sugiere que plantas con tallos más robustos desarrollaron una arquitectura aérea más amplia. Asimismo, el largo de guía se relacionó con área foliar y número de guías primarias, confirmando que la expansión longitudinal favorece una mayor capacidad fotosintética. Estos resultados coinciden con el papel de la arquitectura de planta en sistemas de conducción vertical, donde el soporte, la exposición a la radiación y la ventilación condicionan el desempeño productivo (Devi *et al*., 2020; Walters *et al*., 2021).

Cuadro 3. Correlaciones significativas entre variables morfológicas, fisiológicas y productivas en sandía conducida en espaldera.

Variables relacionadas	r	p	Interpretación técnica
DTF1–DTF2	0.856	0.003	Crecimiento estructural sincronizado.
DTF1–LGP	0.734	0.024	Tallos más gruesos se asocian con guías más largas.
DTF1–AF	0.808	0.008	Mayor diámetro favorece la expansión foliar.
DTF2–LGP	0.935	0.000	Tallo robusto favorece mayor longitud de guía.

Variables relacionadas	r	p	Interpretación técnica
DTF2–AF	0.848	0.004	Mayor soporte vascular se asocia con área fotosintética.
DTF2–NGF1	0.929	0.000	Tallos más gruesos emiten más guías primarias.
LGP–AF	0.905	0.001	Guías largas promueven mayor área foliar.
LGP–NGF1	0.947	0.000	Mayor desarrollo longitudinal induce ramificación primaria.
NGF1–NGF2	0.824	0.006	Guías primarias favorecen emisión de guías secundarias.
NGF1–AF	0.786	0.012	Mayor número de guías aumenta la expansión foliar.
PFR–BA	-0.727	0.027	Posible competencia entre biomasa vegetativa y fruto.

La respuesta numéricamente favorable del plástico reutilizable puede explicarse por la modificación del microambiente edáfico, principalmente por la conservación de humedad, la reducción de malezas y la protección de la superficie del suelo. Bajo clima lluvioso, estas ventajas deben interpretarse junto con el efecto de la espaldera, ya que la conducción vertical reduce el contacto del follaje y los frutos con el suelo húmedo, mejora la ventilación y facilita el manejo fitosanitario. No obstante, debido a que las variables productivas no presentaron diferencias significativas por tratamiento, el comportamiento de PV debe discutirse como tendencia experimental y no como superioridad estadística. Estos resultados son congruentes con reportes sobre el uso de acolchado y riego en sandía, donde el control del microambiente puede favorecer el desempeño del cultivo bajo condiciones húmedas (Zokirov *et al*., 2024). La acidez del suelo continúa siendo una limitante central para el cultivo, por lo que el sistema de espaldera y el acolchado no sustituyen el manejo químico y biológico del suelo. En suelos ácidos se recomienda complementar estas prácticas con enmiendas, bioinsumos y manejo de fertilización, ya que la corrección del pH y el mejoramiento de la actividad biológica pueden incrementar la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad del sistema productivo (Khan *et al*., 2024; Zheng *et al*., 2023).

Conclusiones

La conducción en espaldera asociada con acolchado plástico reutilizable mostró potencial agronómico para la producción de sandía (*Citrullus lanatus*) en suelos ácidos y clima lluvioso de Juan Rodríguez Clara, Veracruz. El tratamiento con plástico reutilizable presentó mayores

valores numéricos en variables de crecimiento y en peso promedio de fruto; sin embargo, las variables productivas no mostraron diferencias significativas por efecto de tratamiento, por lo que dichos resultados deben interpretarse como tendencias del ciclo evaluado. La expresión de PV en g fruto^{-1} permitió presentar valores agronómicamente coherentes para sandía sin modificar la relación numérica entre tratamientos: PR mantuvo el mayor promedio, seguido de SP y PN. Las correlaciones positivas entre diámetro de tallo, largo de guía, área foliar y número de guías evidencian que la arquitectura vegetativa es determinante para el desempeño del cultivo bajo conducción vertical. Se recomienda validar estos resultados en ciclos adicionales, con mayor número de repeticiones y mediciones complementarias de humedad, temperatura, sanidad y propiedades del suelo.

Literatura citada

Ali, M. A. M., El-Dekashey, M. H. Z., Attallah, S. Y., y Mostafa, R. A. (2024). Using some safe materials to mitigate climate changes on productivity and fruit quality of watermelon under conditions of New Valley Governorate. *Journal of Plant Production*, *15*(6), 329–339. https://doi.org/10.21608/jpp.2024.294375.1345

Devi, P., Lukas, S., y Miles, C. (2020). Advances in watermelon grafting to increase efficiency and automation. *Horticulturae*, *6*(4), 88. https://doi.org/10.3390/horticulturae6040088

Hdider, C., Tlili, I., y Ilahy, R. (2020). Watermelon. In *Elsevier eBooks* (pp. 515–531). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812780-3.00032-5

Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., AbdAllah, E. F., y Ibrar, D. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. Plants, 13(2), 166. https://doi.org/10.3390/plants13020166

Musajan, A., Lin, Q., Wei, D., y Mao, S. (2024). Unveiling the mechanisms of digital technology in driving farmers' green production transformation: Evidence from China's watermelon and muskmelon sector. *Foods*, *13*(23), 3926. https://doi.org/10.3390/foods13233926

Shaaban, M. (2024). Acidic soils. In *Springer eBooks* (pp. 293–306). https://doi.org/10.1007/978-3-031-53208-5_13

Walters, S. A., Abdelaziz, M., y Bouharroud, R. (2021). Local melon and watermelon crop populations to moderate yield responses to climate change in North Africa. *Climate*, *9*(8), 129. https://doi.org/10.3390/cli9080129

Zhang, S., Zhu, Q., De Vries, W., Ros, G. H., Chen, X., Muneer, M. A., Zhang, F., y Wu, L. (2023). Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A

world-wide meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, *345*, 118531. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531

Zheng, X., Wei, L., Lv, W., Zhang, H., Zhang, Y., Zhang, H., Zhang, H., Zhu, Z., Ge, T., y Zhang, W. (2023). Long-term bioorganic and organic fertilization improved soil quality and multifunctionality under continuous cropping in watermelon. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, *359*, 108721. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108721

Zokirov, K., Sullieva, S., Abdullayev, D., Abdinazarova, X., Tojiyeva, F., Naurizbaev, A., y Qodirov, F. (2024). Watermelon yield in both mulched and unmulched fields: The impact of drip irrigation on watermelon production. *BIO Web of Conferences*, *130*, 01030. https://doi.org/10.1051/bioconf/202413001030

Capacidad de emergencia de yemas en variedades de caña de azúcar

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez[2], Leonardo Gómez-Martínez[3], Libia Iris Trejo-Téllez, Fernando Carlos Gómez-Merino

Resumen

La producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) enfrenta importantes retos derivados de la baja diversidad genética, ya que cerca del 70% de la superficie cultivada depende únicamente de cuatro cultivares. Esta situación incrementa la vulnerabilidad del cultivo ante sequías, salinidad, plagas, enfermedades y los efectos del cambio climático, factores que reducen el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos. Además, la limitada adopción de prácticas agroecológicas, como biofertilizantes, compostaje y policultivos, favorece la dependencia de insumos externos y modelos productivos menos sostenibles. Ante este panorama, se requieren estrategias innovadoras de investigación y biotecnología para desarrollar nuevos materiales genéticos con mayor capacidad de adaptación. El objetivo fue evaluar la adaptabilidad de siete híbridos de caña de azúcar desarrollados por el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba (Mex 09-66, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341) a las condiciones edafoclimáticas de la Cuenca del Papaloapan, y comparándolos con el cv. CP 72-2086. El estudio se realizó en la localidad de Paraíso Río Tonto, Tres Valles, Veracruz, bajo condiciones edafoclimáticas representativas de la zona. Se analizaron variables relacionadas con la emergencia de yemas y crecimiento inicial. Los resultados mostraron que el cultivar CP 72-2086 presentó la mejor adaptación general. Los híbridos Mex 09-208 y Mex 09-321 destacaron por sus altos porcentajes y velocidad de emergencia; en tanto que los híbridos Mex 09-321 y Mex 09-341 mostraron la mayor altura de planta. Estos resultados sugieren que dichos híbridos poseen un potencial promisorio para ampliar la base genética del cultivo y fortalecer su adaptación a las condiciones ambientales de la zona de estudio.

Palabras clave: adaptación, cambio climático, híbridos.

Abstract

[2] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264
[3] Universidad Filadelfia de México, Campus Cd. Alemán. Calle Olmecas, esquina Mixes, Cd Alemán, Veracruz, México. C. P. 95427. *Autor para correspondencia: fernandg@colpos.mx

Sugarcane (*Saccharum* spp.) production faces significant challenges stemming from low genetic diversity, as approximately 70% of the cultivated area relies on just four cultivars. This situation increases the crop's vulnerability to drought, salinity, pests, diseases, and the effects of climate change factors that reduce both yield and product quality. Furthermore, the limited adoption of agroecological practices such as biofertilizers, composting and polycultures fosters a reliance on external inputs and less sustainable production models. Given this scenario, innovative research and biotechnology strategies are needed to develop new genetic materials with greater adaptability. The objective was to evaluate the adaptability of seven sugarcane hybrids developed by the Colegio de Postgraduados, Córdoba Campus (Mex 09-66, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-321, Mex 09-333, and Mex 09-341), to the soil and climatic conditions of the Papaloapan Basin, comparing them with the cultivar CP 72-2086. The study was conducted in Paraiso Rio Tonto, Tres Valles, Veracruz, under soil and climatic conditions representative of the Papaloapan Basin. Variables related to bud emergence were analyzed. The results showed that the CP 72-2086 cultivar exhibited the best overall adaptation. The Mex 09-208 and Mex 09-321 hybrids stood out due to their high emergence rates and speed of emergence. These results suggest that these hybrids hold promising potential for broadening the crop's genetic base and enhancing its adaptation to the environmental conditions of the study area.

Keywords: adaptation, climate change, hybrids.

Introducción

A nivel global, el cultivo de caña de azúcar tiene una gran importancia económica y representa un recurso agrícola clave para las economías de diversas naciones tropicales en vías de desarrollo. Los principales países productores se encuentran en Asia, Centroamérica, Sudamérica y el Caribe. El líder mundial en producción de caña de azúcar es Brasil, con 760 millones de Mg, seguido por India, con 460 millones de Mg, China, con 107 millones de Mg y Tailandia, con 94 millones de Mg; mientras que México figura como el sexto país productor de caña de azúcar con una producción de 46 millones de Mg (STATISTA, 2026; UNC, 2026). En cuanto a producción de azúcar, Brasil lidera la producción con 43.8 millones de Mg, seguido por India, con 30 millones de Mg, la Unión Europea, con 15.5 millones de Mg y China, con 12.6 millones de Mg; en este rubro el país ocupa el noveno lugar con 5.4 millones de Mg (USDA, 2026). En México, el estado con mayor volumen de producción de caña de azúcar, al cierre agrícola registrado en 2024, fue Veracruz con 20.6 millones de Mg, debido a ello, en el año 2023 sus ingresos por cosecha de caña fueron de 17 mil 387 millones de pesos. Después de Veracruz; Jalisco y San Luis Potosí son los estados con mayor volumen

de producción con 6.49 y 4.88 millones de Mg, respectivamente. Los estados que completan las diez entidades de importancia en producción son Oaxaca, Chiapas, Tamaulipas, Tabasco, Morelos, Nayarit y Quintana Roo (DGSIAP, 2026).

La caña de azúcar, como sistema de producción, es sensible a factores de estrés bióticos y abióticos. En cuestiones de parámetros edafoclimáticas requiere de ciertas condiciones idóneas para alcanzar una alta productividad; es decir, la variación en estos parámetros puede afectar la producción comercial de caña de azúcar a escala mundial (Headley *et al*., 2024). Por otro lado, la producción de caña de azúcar en el campo mexicano, solo se sustenta en cuatro cultivares comerciales: CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431 e ITV 92-1424 (Sentíes-Herrera, 2016), lo que ha dado lugar a una base genética reducida. Esta homogeneidad varietal incrementa la vulnerabilidad de los cultivos ante plagas, enfermedades y condiciones climáticas adversas, comprometiendo su estabilidad agronómica y su capacidad de adaptación frente a escenarios cambiantes. Esta fragilidad genética se ve agravada por los bajos rendimientos que se registran en diversas regiones del país, los cuales continúan por debajo de los estándares nacionales e internacionales. A pesar de que la caña de azúcar representa un cultivo estratégico para el sector agroindustrial, su productividad se encuentra limitada por el uso de tecnologías agrícolas desactualizadas, la escasa inversión en investigación aplicada y el deterioro progresivo de los suelos, factores que impiden el aprovechamiento pleno del potencial productivo. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la adaptabilidad de siete híbridos de caña de azúcar desarrollados por el Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba, (Mex 09-66, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341) a las condiciones edafoclimáticas de la Cuenca del Papaloapan, y comparándolos con el cv. CP 72-2086.

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en una parcela, ubicada en las coordenadas 18°11'12.3" N 96°13'10.8" O, a una altitud de 15 m, en la localidad de Paraíso Río Tonto, perteneciente al municipio de Tres Valles, Veracruz. La temperatura promedio en el intervalo de tiempo (marzo-julio) en el que se llevó a cabo el estudio fue de 33 °C máx. y 24 °C mín., con una precipitación pluvial promedio en los cinco meses de 390 mm (Cuadro 1).

Cuadro 1. Temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial de cinco meses (marzo-julio, 2024) en la localidad de Paraíso Río Tonto, Tres Valles, Veracruz.

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación pluvial (mm)

	Máxima	Mínima	
Marzo	30.4	22.2	420
Abril	32.4	23.7	534
Mayo	35.9	26.6	210
Junio	33.9	24.8	296
Julio	32.4	22.8	491

Fuente: elaboración propia con datos de CONADESUCA, 2024.

Entre las características químicas y físicas del suelo de la parcela utilizada en este estudio, se destaca un pH alcalino (8.0), y una conductividad eléctrica de 0.33 dS m^{-1}, con una densidad aparente de 1.25 g cm^{-3}, contenido de materia orgánica de 1.14 % y una clasificación textural como franco arcilloso (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características químicas y físicas de suelo muestreado en la localidad de Paraíso Río Tonto, Tres Valles, Veracruz.

	pH	CE (dS m^{-1})	Densidad aparente (g cm^{-3})	Materia orgánica (%)
	8.0	0.33	1.25	1.14
Nitrógeno total (%)	P (mg kg^{-1})	Ca ($cmol_{(+)}$ kg^{-1})	K ($cmol_{(+)}$ kg^{-1})	Mg ($cmol_{(+)}$ kg^{-1})
0.074	8.259	34.978	0.053	1.013
	Al (mg kg^{-1})	Cu (mg kg^{-1})	Fe (mg kg^{-1})	Mn (mg kg^{-1})
	1.33	0.53	12.7	8.49
	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase textural
	38.16	26.00	35.84	Franco arcilloso

Análisis de suelo realizado en el Laboratorio de Nutrición Vegetal, en el Programa de Edafología en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

La siembra se llevó a cabo en subparcelas de 8 × 10 m. Los tallos se colocaron a dos hilos por surco (dos tallos) y se realizaron cortes para separar las yemas, posteriormente, se taparon las yemas. Se realizó una fertilización con mezcla física NPK (20-10-20) durante la etapa de emergencia. Una longitud de dos metros lineales por surco, con tres repeticiones, se tomó como área para realizar la toma de datos de las variables de emergencia de yemas y crecimiento inicial en plántulas; las variables evaluadas fueron: porcentaje de emergencia de yemas (PEY, se contabilizó el número de yemas emergidas por los dos metros lineales), velocidad de emergencia de yemas (VEY) y coeficiente de velocidad de emergencia de yemas (CVEY). Los datos se recopilaron desde la siembra hasta los 40 días después de la siembra (dds); en tanto que, para determinar el crecimiento inicial, la altura de planta (AP, se

consideró como altura, desde el nivel de suelo hasta el último collar visible del tallo) y el largo de hoja (LH, desde el collar ubicado en el tallo hasta la punta de la hoja) se midió con un flexómetro (Truper®), estos datos se obtuvieron a los 100 dds.

Resultados y discusión

Variables de emergencia de yemas

El proceso de emergencia de la caña de azúcar principia en la siembra de las yemas y termina en la elongación de estas, hasta surgir como un brote. El crecimiento de los brotes está mediado por cambios físicos y químicos al interior de la yema. La activación de enzimas, tales como invertasas, amilasas, proteasas y oxidasas, catabolizan moléculas complejas a simples, liberando energía, los cuales son utilizados para la construcción de órganos como raíces, tallos y hojas. Esta etapa puede variar entre los 7 y 10 días; seguido del crecimiento inicial que puede ir de los 35 hasta los 45 días. Un factor externo que puede afectar la emergencia es la temperatura, rangos óptimos para una buena brotación, oscilan entre los 24 a 37 °C, con buena humedad en el suelo (Yang-Rui, 2023).

En la variable PEY, los híbridos presentaron respuestas diferenciales ante las condiciones en las cuales fueron sembradas. El tratamiento testigo (CP 72-2086), presento el mayor PEY (76%). Aunque, los híbridos Mex 09-208 y Mex 09-321 tuvieron un PEY de 67 y 61% respectivamente, no difirieron estadísticamente del tratamiento testigo. Por otro lado, los híbridos Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-333, Mex 09-341 y Mex 09-66, fueron los valores más bajos estadísticamente registrados y diferentes al tratamiento testigo en 43, 23, 59, 62 y 61% respectivamente (Figura 1).

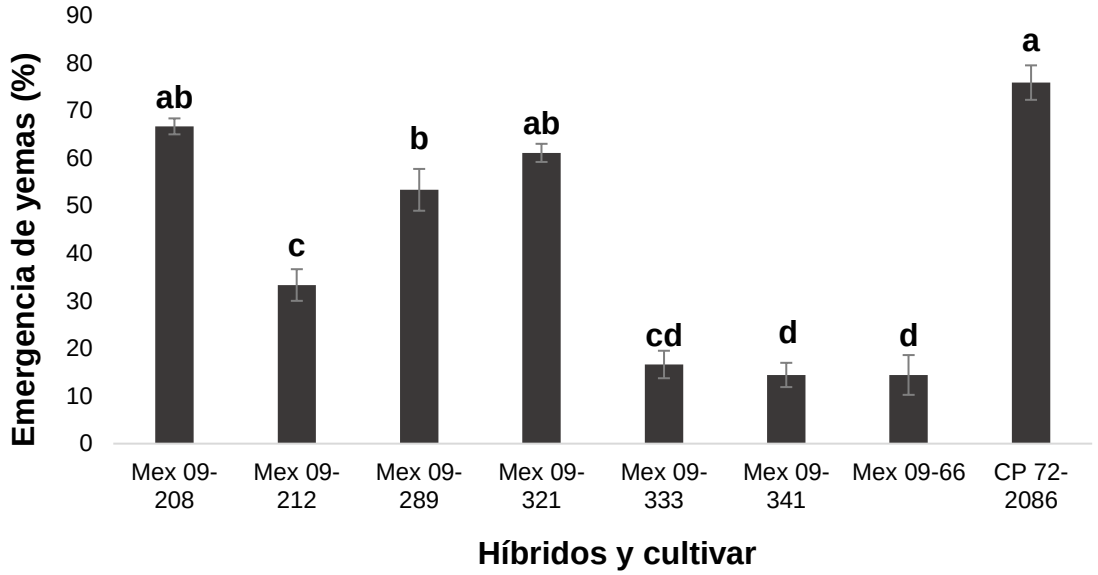


Figura 1. Porcentaje de emergencia de yemas de siete híbridos y un cultivar en condiciones edafoclimáticas de la localidad Paraíso Río Tonto en Tres Valles, Veracruz. Medias ± DE con letras diferentes indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

El porcentaje de emergencia de yemas es un indicador del número de yemas emergidas, y proporciona información sobre la viabilidad, crecimiento y desarrollo de las yemas. Valores por encima del 60% o lo más cercano al 100%, sugieren yemas con buena adaptación, mientras que, valores por debajo del 60%, indican problemas en la calidad de las yemas o sensibilidad a las condiciones edafoclimáticas (Enríquez-Gómez, 2022). En nuestro estudio, el material con mejor adaptación al área experimental fue el cv. CP 72-2086 (tratamiento testigo), en tanto que, los híbridos que mejor se adaptaron fueron Mex 09-208 y Mex 09-321, ya que su porcentaje de emergencia fue entre el 60 y 100% (Figura 1).

La VEY se refiere al tiempo que tarda una yema en elongarse y emerger, procesos de emergencia rápidos, son deseables, ya que, permiten el pronto establecimiento de las pantas a las condiciones del suelo o sustrato y un mejor aprovechamiento de los nutrimentos. Por otro lado, el CVEY es un parámetro que toma en cuenta el número de plantas emergidas a través del tiempo, lo que permite el análisis de la distribución temporal de la emergencia; anticipando posibles problemas en el desarrollo de las plántulas. De forma general, ambas

variables evalúan tanto la velocidad como la cantidad de brotes emergentes en un tiempo determinado; los valores altos indican una mayor emergencia a corto plazo (Carbajal-Vázquez *et al*., 2025).

En cuanto a la variable VEY en nuestro estudio, los híbridos Mex 09-208 y Mex 09-321 superaron al tratamiento testigo en 7 y 6 %, respectivamente; sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. En tanto que, los híbridos Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-333, Mex 09-341 y Mex 09-66 obtuvieron los valores más bajos y fueron estadísticamente diferentes al tratamiento control en 61, 41, 76, 88 y 91%, respectivamente (Figura 2).

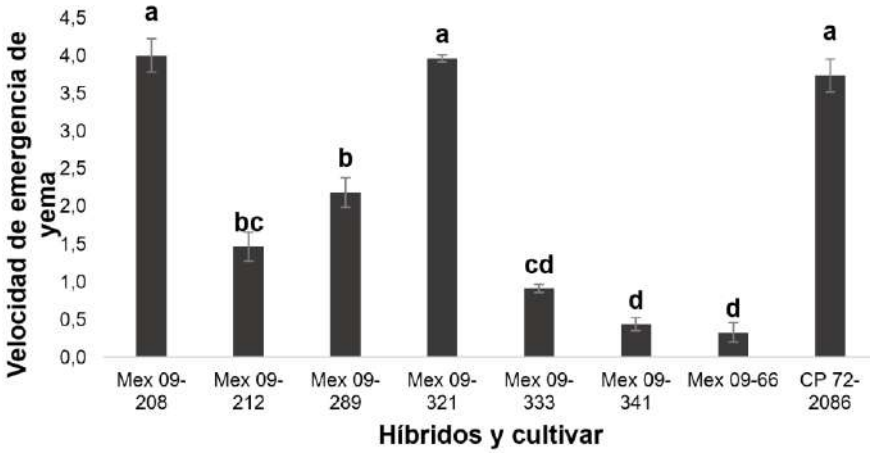


Figura 2. Velocidad de emergencia de yemas de siete híbridos y un cultivar en condiciones edafoclimáticas de la localidad Paraíso Río Tonto en Tres Valles, Veracruz. Medias ± DE con letras diferentes indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

Por otro lado, en la Figura 3, el CVEY del híbrido Mex 09-333 fue 39% mayor significativamente al tratamiento testigo (CP 72-2086). Mientras que, los híbridos Mex 09-208 y Mex 09-289 fueron los de menor CVEY en comparación con el tratamiento testigo. Por otro lado, los híbridos Mex 09-212, Mex 09-321, Mex 09-341 y Mex 09-66 no fueron estadísticamente diferentes al tratamiento testigo.

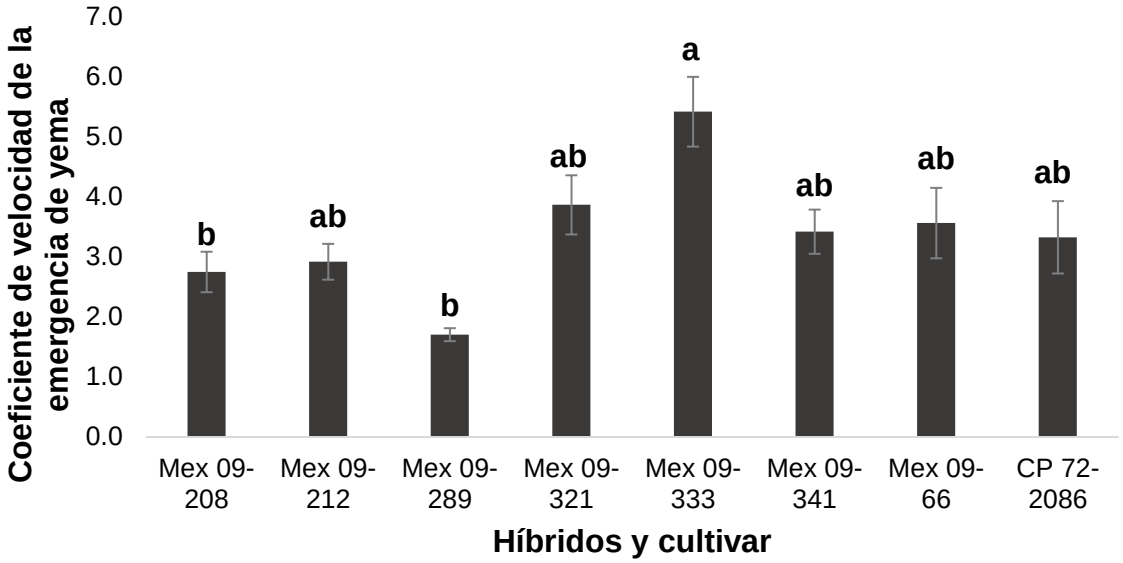


Figura 3. Coeficiente de velocidad de emergencia de yemas de siete híbridos y un cultivar en condiciones edafoclimáticas de la localidad Paraíso Río Tonto en Tres Valles, Veracruz. Medias ± DE con letras diferentes indican diferencia estadística significativa (Tukey. $p \leq 0.05$).

En las variables de estudio VEY y CVEY, los híbridos Mex 09-208 y Mex 09-321 presentaron una buena velocidad de emergencia, igual que el testigo (Figura 2), lo cual indica una buena adaptación al área de estudio. En cuanto, al coeficiente de emergencia, el híbrido Mex 09-333 fue el que mejores resultados mostro en esta variable (Figura 3). Lo anterior, supone que estos tres híbridos mostraron una mayor emergencia en menor tiempo y tenderán a ser plántulas con mayor vigor, lo que les proporcionará un mejor desarrollo.

Variables de crecimiento inicial

En este estudio, el cultivar CP 72-2086 fue calificado como un tratamiento testigo, para comparar de acuerdo a sus características botánicas, a los siete híbridos evaluados. Dentro de estas características se destaca que los tallos molederos son considerados medianos, con una altura promedio de 3 m, y con una lámina foliar promedio de 164 cm, considerada como larga. Estos valores son estimados en plantas que han cumplido su ciclo y están lista para la cosecha (Gómez-Merino y Sentíes-Herrera, 2015).

En la variable AP, los híbridos Mex 09-341 y Mex 09-321 mostraron mayor altura (146 y 143 cm, respectivamente) en comparación con el tratamiento testigo (CP 72-2086, 128 cm); sin embargo, ambas alturas no fueron estadísticamente diferentes a la altura del tratamiento testigo. Por otro lado, los híbridos Mex 09-212 y Mex 09-289 fueron los que obtuvieron los valores más bajo en AP (93 y 71 cm, respectivamente), ambos híbridos fueron estadísticamente diferentes al tratamiento testigo (Figura 4).

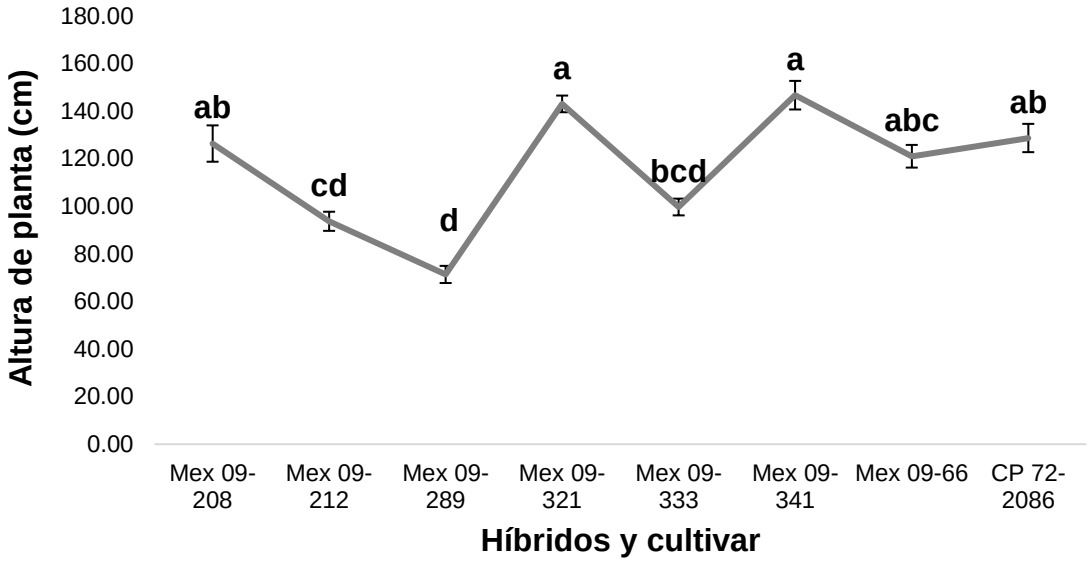


Figura 4. Altura de planta de siete híbridos y un cultivar en condiciones edafoclimáticas de la localidad Paraíso Río Tonto en Tres Valles, Veracruz. Medias ± DE con letras diferentes indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$)

De manera general y de acuerdo a la longitud promedio, el tallo puede se clasifica como: corto (menos de 250 cm), mediano (entre 250 y 350 cm) o largo (más de 350 cm). En la altura de una planta de caña de azúcar, la longitud del tallo es determinante, ya que este se constituye como el órgano de almacenamiento de azúcares y por consiguiente el de mayor interés (Gómez-Merino y Sentíes-Herrera, 2015).

De acuerdo a los resultados obtenidos, de los datos evaluados a los 100 dds, el tratamiento testigo el cv. CP 72-2086 mostró una AP de 128 cm. En tanto que, los híbridos Mex 09-341 y Mex 09-321 presentaron mayor AP en 14 y 12%, respectivamente, aunque sin ser diferentes

al tratamiento testigo (Figura 4). Sin embargo, se observó una tendencia de los híbridos 09-341 y Mex 09-321 a una mejor adaptación a las características edafoclimáticas del área de estudio en la variable AP.

Mientras que, los valores observados en los híbridos Mex 09-212 y Mex 09-289, fueron 27 y 44%, respectivamente, más bajos y estadísticamente diferentes al tratamiento testigo. Lo que indica que estos híbridos, en la AP fueron sensibles a las condiciones del área de estudio durante el tiempo de evaluación (100 d).

En los tallos, la forma en que se presentan las hojas es en forma alterna, es decir, una hoja por nudo. La longitud de la hoja se clasifica como corta, si es menor a 110 cm, mediana si la longitud oscila entre 110 y 160 cm, y larga, si el valor supera los 160 cm (Gómez-Merino y Sentíes-Herrera, 2015).

En la Figura 5 se presentan los resultados de la variable LH. El híbrido Mex 09-321 fue donde se observó el valor más alto en la LH, correspondiendo a un incremento de 41% con respecto al tratamiento testigo (CP 72-2086). En tanto que, los híbridos Mex 09-212, Mex 09-333 y Mex 09-66 no fueron diferentes estadísticamente al tratamiento testigo. Mientras que, los híbridos Mex 09-289 y Mex 09-341, ambos registraron los valores más bajos en la LH (37 y 76 cm, respectivamente), siendo estos estadísticamente diferentes al tratamiento testigo.

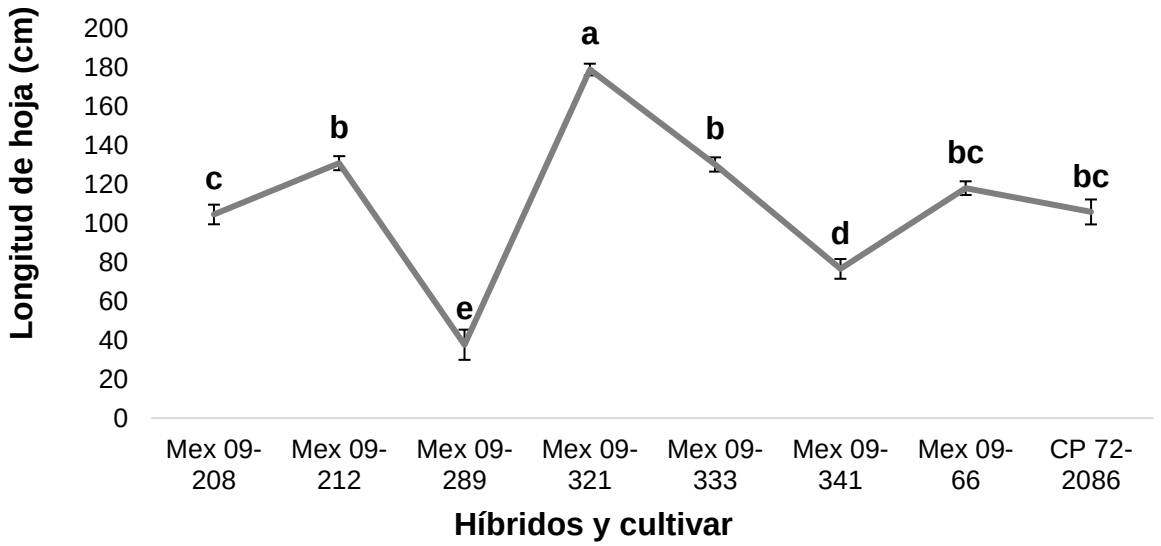


Figura 5. Longitud de hoja de siete híbridos y un cultivar en condiciones edafoclimáticas de la localidad Paraíso Río Tonto en Tres Valles, Veracruz. Medias ± DE con letras diferentes indican diferencia estadística significativa (Tukey, $p \leq 0.05$)

En este sentido, el híbrido Mex 09-321 fue el tratamiento que mejor longitud mostró (179 cm), siendo diferente estadísticamente al tratamiento testigo en 41% (Figura 5), la cual se le puede caracterizar como una hoja larga. En tanto que, los híbridos Mex 09-212 y Mex 09-333 se pueden considerar como medianas. En todos los casos se pueden catalogar como hojas con un buen potencial fotosintético.

Conclusiones

En conclusión, este estudio evidencia la importancia de evaluar nuevos híbridos bajo diversas condiciones edafoclimáticas para determinar su respuesta y capacidad de adaptación. Los hallazgos contribuyen al fortalecimiento del programa nacional de mejoramiento genético y plantean alternativas viables para incrementar la productividad del cultivo en la Cuenca del Papaloapan. En México, la generación de híbridos enfrenta desafíos prioritarios que demandan atención inmediata; por ello, resulta indispensable diversificar la base genética, incorporar tecnologías innovadoras, mejorar los rendimientos en campo y adoptar prácticas sostenibles. La implementación de estas estrategias permitirá a México conservar su competitividad y garantizar la viabilidad del sistema agroindustrial de la caña frente a los crecientes retos del contexto global.

Literatura citada

Libro

Yang-Rui, L. (2022). *Growth and Development of Sugarcane* (*Saccharum* spp. Hybrid*) and Its Relationship with Environmental Factors*. *In*: Verma, K.K., Song, XP., Rajput, V.D., Solomon, S., Li, YR., Rao, G.P. (eds) Agro-industrial Perspectives on Sugarcane Production under Environmental Stress. Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-19-3955-6_1

Revistas

Carbajal-Vázquez, V. H., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., & Hidalgo-Contreras, J. V. (2025). Vanadium differently affects sugarcane bud emergence and early growth. *Agro Productividad*. 18(7): 17-25. https://doi.org/10.32854/bxedxp98

Enríquez-Gómez, H. M. (2022). Evaluación de prendimiento y vigor de semilla asexual de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana, Peñuela, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. 51 p.

Gómez-Merino, F. C., & Sentíes-Herrera, H. E. (2015). Manual para la identificación varietal de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados. 40 p.

Headley, H., Moonsammy, S., Davis, H., Warner, D., Adams, A., & Oyedotun, T. D. T. (2024). Modeling climate variability and global sugarcane production: Empirical consideration for collective policy action. *Heliyon*. 10(23): e40359.

Sentíes-Herrera, H. E., Gómez-Merino, F. C., & Loyo-Joachin, R. (2015). Mejoramiento genético de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México: una historia de éxito con nuevos desafíos. *Agro Productividad*. 9(7): 8-13.

Referencias electrónicas

CONADESUCA. (2024). "Boletín climatológico marzo-julio. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar". [en línea]. Ciudad de México, México. Disponible en: https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/boletin-climatologico. [Consulta: 22 de enero de 2025].

DGSIAP. (2026). "Anuario Estadístico de la Producción Agrícola/cierre de producción 2024". Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [en línea]. Ciudad de México, México. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. [Consulta: 7 de agosto de 2026].

STATISTA. (2026). "Sugar Industry – statistics and facts". [en línea]. Hamburgo, Alemania Available at: https://www.statista.com/topics/1224/sugar/#topicOverview. [Accessed: August 7, 2026].

UNC. (2026). "Editorial: Finaliza la zafra 2024/2025, 1.48% arriba en la producción de azúcar, respecto a la zafra anterior". Unión Nacional de Cañeros A.C. [en línea]. Ciudad de México, México. Disponible en: https://caneros.org.mx/editorial-nuevo-precio-de-referencia-del-azucar-base-estandar-para-ciclo-2020-2021-2/. [Consulta: 7 de agosto de 2026].

USDA. (2026). "Top production countries: sugar production 2025/2026. Foreign Agricultural Service/U.S". Department of Agriculture. [on line]. Washington, D. C., EE. UU. Available at: https://www.fas.usda.gov/data/production/0612000. [Accessed: August 7, 2026].

Comportamiento productivo de cultivares de arroz bajo condiciones de trópico húmedo en Tabasco, México

Sergio Salgado Velázquez[4], Dante Sumano López[5], Samuel Córdova Sanchez[6], Pablo Ulises Hernández Lara[4]

Resumen

La respuesta de los cultivares de arroz a las variaciones ambientales es importante para la identificación de materiales con comportamiento agronómico favorable en el trópico húmedo. El objetivo del estudio fue evaluar el comportamiento agronómico y de producción de cinco cultivares de arroz durante tres ciclos de producción en Huimanguillo, Tabasco, México. Se evaluaron Tabasqueña A17, Veracruzana A21, Oroña A17, LHA-13 y Choca-05, en un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones. Se midió la altura de la planta y el diámetro del tallo a los 75 días después del trasplante, el rendimiento de grano y las condiciones climáticas de cada ciclo. La variedad Tabasqueña A17 fue la que mostró mejor comportamiento general, alcanzando alturas de aproximadamente 116 a 119 cm, diámetros de tallo de 6,7 a 7,0 mm, y rendimientos de 6,8 a 7,5 t ha^{-1}. También, Veracruzana A21 tuvo un comportamiento favorable, con rendimientos de 6.6–7.1 t ha^{-1}, mientras que Oroña A17 y LHA-13 tuvieron valores intermedios. Choca-05 tuvo los rendimientos más bajos, de entre 5.1 y 6.0 t ha^{-1}. El ciclo E2 coincidió con los menores rendimientos de todos los cultivares y registró la menor precipitación acumulada (393.5 mm). La jerarquía de materiales fue relativamente consistente entre ciclos. Los resultados identificaron a Tabasqueña A17 y Veracruzana A21 como los materiales con mejor comportamiento agronómico y productivo bajo las condiciones evaluadas del trópico húmedo de Tabasco.

Palabras clave: rendimiento de grano; interacción genotipo × ambiente; variabilidad ambiental; ciclos agrícolas; *Oryza sativa* L.

Abstract

[4] Sergio Salgado Velázquez. Profesor investigador. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Huimanguillo. Huimanguillo, Tabasco, México. Salgado.sergio@inifap.gob.mx)
[5] Dante Sumano López. Profesor investigador. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agricolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Huimanguillo. Huimanguillo, Tabasco, México. Sumano.dante@inifap.gob.mx
[6] Samuel Córdova Sánchez. Profesor Investigador. Universidad Popular de la Chontalpa (UPCH). Cardenas, Tabasco, México. Sacorsa_1976@hotmail.com

The response of rice cultivars to environmental variations is important for identifying materials with favorable agronomic performance in the humid tropics. The objective of the study was to evaluate the agronomic and production performance of five rice cultivars during three production cycles in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. Tabasqueña A17, Veracruzana A21, Oroña A17, LHA-13, and Choca-05 were evaluated in a randomized complete block design with five replications. Plant height and stem diameter were measured at 75 days after transplanting, along with grain yield and the climatic conditions of each cycle. The Tabasqueña A17 variety showed the best overall performance, reaching heights of approximately 116 to 119 cm, stem diameters of 6.7 to 7.0 mm, and yields of 6.8 to 7.5 t ha^{-1}. Veracruzana A21 also showed favorable performance, with yields of 6.6–7.1 t ha^{-1}, while Oroña A17 and LHA-13 had intermediate values. Choca-05 had the lowest yields, ranging from 5.1 to 6.0 t ha^{-1}. Cycle E2 coincided with the lowest yields for all cultivars and recorded the lowest accumulated precipitation (393.5 mm). The ranking of the materials was relatively consistent among cycles. The results identified Tabasqueña A17 and Veracruzana A21 as the materials with the best agronomic and productive performance under the evaluated humid tropical conditions of Tabasco.

Keywords: grain yield; genotype × environment interaction; environmental variability; cropping cycles; *Oryza sativa* L.

Introducción

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los principales cultivos alimentarios a nivel mundial y desempeña un papel fundamental en la alimentación de una importante proporción de la población.

En México, la producción nacional de arroz continúa siendo insuficiente para cubrir la demanda interna. De acuerdo con cifras oficiales, durante 2024 se sembraron 31,346 ha de arroz palay y se obtuvo una producción superior a 219,587 t. Esta situación evidencia la importancia de fortalecer la productividad del cultivo mediante el desarrollo y evaluación de materiales con alto potencial de rendimiento y adecuada respuesta a las condiciones ambientales de las principales regiones productoras del país (SIAP, 2025). Su producción se lleva a cabo en una amplia variedad de ambientes, desde sistemas irrigados intensivos hasta condiciones de temporal que están sujetas a una mayor variabilidad ambiental. Esta amplia gama de condiciones de cultivo constituye uno de los mayores obstáculos para el mantenimiento de niveles adecuados de productividad, ya que la manifestación del rendimiento depende tanto de las características genéticas de los materiales como de las condiciones ambientales prevalecientes durante el desarrollo del cultivo. En este sentido, la identificación de materiales capaces de expresar un comportamiento productivo favorable

constituye un componente importante para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas arroceros (Salgado-Velázquez *et al.*, 2026a).

El rendimiento de grano, que es uno de los principales criterios tomados en cuenta para la selección y recomendación de variedades de arroz, es el resultado final de los diferentes procesos fisiológicos y agronómicos que ocurren en el ciclo del cultivo. Sin embargo, la productividad de un mismo material puede variar entre localidades, años o ciclos agrícolas, como consecuencia de las variaciones de temperatura, precipitación, humedad atmosférica, disponibilidad de agua y duración del periodo de crecimiento. Estas diferencias ambientales pueden alterar el establecimiento del cultivo, el desarrollo vegetativo, la formación de estructuras reproductivas, la floración y el llenado de grano, lo que produce respuestas diferentes entre materiales genéticos. Por eso, la evaluación del rendimiento durante más de un ciclo de producción permite obtener una apreciación más amplia del comportamiento productivo de los materiales que aquella que se deriva de una sola fecha o periodo de cultivo.

Una de las principales condiciones climáticas que influyen sobre el desarrollo del arroz, es la temperatura. Las condiciones térmicas gobiernan la velocidad de crecimiento y la duración de las distintas etapas fenológicas, siendo capaces las altas temperaturas durante las fases reproductivas de afectar la fecundación, aumentar la esterilidad de las espiguillas y reducir el llenado de los granos. Las altas temperaturas que ocurren durante la floración pueden causar pérdidas importantes en la productividad, y las altas temperaturas nocturnas pueden aumentar la respiración de las plantas y reducir la eficiencia con que los fotoasimilados se utilizan para la formación y llenado del grano (Wu *et al.*, 2021; Xing *et al.*, 2024). Estos efectos son especialmente importantes en las regiones tropicales, ya que allí las temperaturas permanecen relativamente altas durante la mayor parte del año.

El comportamiento productivo del arroz está determinado también por la disponibilidad y distribución de la precipitación, especialmente cuando el cultivo se desarrolla mayoritariamente bajo condiciones de temporal. Una buena disponibilidad de agua favorece el crecimiento y la formación del rendimiento, pero los períodos de déficit hídrico en etapas críticas pueden limitar los diferentes procesos fisiológicos, y las precipitaciones excesivas pueden alterar las condiciones del suelo, afectar el manejo agronómico y aumentar la humedad dentro del dosel vegetal. De igual forma, la alta humedad relativa típica de los ambientes tropicales puede alterar la demanda atmosférica de agua y propiciar condiciones asociadas a una mayor presión de enfermedades. Por consiguiente, la combinación de temperatura, precipitación y humedad que se da durante cada ciclo de producción produce ambientes particulares bajo los cuales los materiales de arroz pueden expresar diferentes respuestas productivas (Ghazy *et al.*, 2023; Salgado-Velázquez *et al.*, 2026b).

Estas condiciones cobran especial importancia en el trópico húmedo del sureste de México. En esta zona se dan temperaturas elevadas, humedad atmosférica alta y precipitaciones abundantes, aunque su distribución puede variar mucho en el transcurso del año. En Tabasco, la variación estacional permite establecer arroz en diferentes períodos de producción, de tal forma que un mismo material puede estar expuesto a condiciones ambientales contrastantes, dependiendo de la fecha de establecimiento y del desarrollo de sus etapas fenológicas. En estos casos, la evaluación en ciclos agrícolas diferentes, sirve como una herramienta útil, para determinar si las diferencias observadas entre materiales se mantienen o cambian, a medida que cambian las condiciones de producción.

La diferente respuesta de los materiales genéticos ante los cambios ambientales se encuentra íntimamente ligada a la interacción genotipo-ambiente. Si esa interacción se da, las diferencias de desempeño entre los materiales no necesariamente permanecen constantes entre ciclos o condiciones de producción, de modo que un material que muestra un rendimiento sobresaliente en un ambiente determinado puede cambiar su posición relativa cuando se evalúa bajo condiciones diferentes. Este fenómeno constituye una consideración importante en la selección varietal, puesto que las recomendaciones basadas únicamente en el rendimiento obtenido durante un ciclo pueden no representar adecuadamente el comportamiento de los materiales en otros periodos de producción (Huang *et al.*, 2021; Abebe *et al.*, 2023). Por lo tanto, la comparación de la performance entre diferentes ciclos permite conocer, no sólo la capacidad productiva promedio, sino también la magnitud de las variaciones que experimentan los materiales ante cambios en las condiciones de producción.

México cuenta con materiales de arroz desarrollados y seleccionados para las diferentes regiones productoras. En el sureste del país, la generación y evaluación de germoplasma adaptado a ambientes tropicales, ha permitido disponer de materiales con características agronómicas contrastantes y diferente respuesta frente a factores bióticos y abióticos. Entre ellos están la Tabasqueña A17, la Veracruzana A21 y la Oroña A17, y otros materiales procedentes de programas nacionales de mejoramiento que han sido evaluados en condiciones regionales. Las diferencias genéticas y agronómicas que existen entre estos materiales, hacen necesario evaluar comparativamente su productividad en diferentes periodos de establecimiento, sobre todo cuando se requiere obtener información que ayude a seleccionar los materiales apropiados para las condiciones de producción del sureste mexicano (Hernández-Aragón *et al.*, 2023).

La evaluación regional de materiales adquiere mayor importancia cuando las condiciones locales difieren de aquellas donde fueron originalmente seleccionados, o cuando existen

variaciones ambientales importantes entre ciclos agrícolas. Un alto potencial de rendimiento es una característica deseable, pero su expresión depende de la habilidad del material para capitalizar las condiciones favorables y responder a las restricciones ambientales que se presentan durante su desarrollo. Por tanto, las evaluaciones efectuadas directamente en los núcleos productores entregan información importante para conocer el comportamiento de los materiales bajo condiciones representativas de producción y permiten generar antecedentes técnicos para orientar futuras recomendaciones varietales.

En Tabasco, la disponibilidad de información obtenida durante varios ciclos consecutivos, es muy útil porque puede haber variabilidad entre los periodos de producción. Comparando el rendimiento de distintos materiales bajo un mismo manejo agronómico y diseño experimental, mediante procedimientos estadísticos se logran separar las diferencias atribuibles a los materiales, a los ciclos y a la respuesta particular de cada material frente a dichos ciclos. La presente información puede ayudar a reconocer los materiales con mayor capacidad productiva y determinar si el desempeño relativo se mantiene cuando cambian las condiciones ambientales asociadas a la época de establecimiento.

Con este criterio se planteó como hipótesis que el rendimiento de grano difiere entre los materiales de arroz y que la magnitud de estas diferencias puede modificarse entre ciclos de producción en respuesta a las condiciones ambientales prevalecientes durante el desarrollo del cultivo. Así, el objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento de grano de cinco materiales de arroz establecidos durante tres ciclos de producción bajo condiciones de trópico húmedo en Huimanguillo, Tabasco, México, con la finalidad de identificar aquellos con mejor comportamiento productivo y generar información que contribuya a su evaluación y aprovechamiento en los sistemas arroceros de la región.

Materiales y métodos

Sitio experimental. El estudio se realizó en el Campo Experimental Huimanguillo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, México, en las coordenadas 17°50′ N y 93°23′ O, a una altitud aproximada de 20 m. La región presenta clima tropical húmedo, clasificado como Af de acuerdo con Köppen, con precipitación anual superior a 2,000 mm y temperaturas medias anuales entre 25 y 28 °C.

El suelo del área experimental se clasifica como Fluvisol eútrico de acuerdo con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). Presenta textura franco-arenosa, drenaje moderado, reacción cercana a la neutralidad, con pH aproximado de 6.8, contenido medio de materia orgánica y concentraciones moderadas de macro y micronutrientes. El área ha sido

utilizada para el cultivo de arroz durante más de dos décadas, por lo que representa condiciones características de los sistemas de producción establecidos en el trópico húmedo del sureste de México.

Material vegetal. Se evaluaron cinco materiales genéticos de arroz: Tabasqueña A17, Veracruzana A21, Oroña A17, LHA-13 y Choca-05. Los materiales presentan diferencias en duración del ciclo, altura de planta, potencial productivo y respuesta a factores bióticos y ambientales. Tabasqueña A17, Veracruzana A21 y Oroña A17 corresponden a materiales desarrollados por el INIFAP, mientras que LHA-13 y Choca-05 proceden de materiales utilizados en los programas de mejoramiento y evaluación regional.

Tabasqueña A17 presenta un ciclo aproximado de 127 a 138 días y un potencial de rendimiento reportado entre 7.0 y 9.0 t ha^{-1}. Veracruzana A21 presenta un ciclo entre 131 y 139 días y un potencial productivo de 7.5 a 9.3 t ha^{-1}, mientras que Oroña A17 presenta un ciclo de 131 a 148 días y un potencial de 6.0 a 9.0 t ha^{-1}. Para LHA-13 y Choca-05, los registros derivados de evaluaciones de campo señalan ciclos aproximados de 130–140 y 125–135 días, respectivamente, así como diferencias en su respuesta a las condiciones ambientales regionales.

Cuadro 1. Materiales de arroz evaluados en tres ciclos de producción en Huimanguillo, Tabasco, México.

Material	Ciclo (días)	Rendimiento (t ha^{-1})
Tabasqueña A17	127–138	7.0–9.0
Veracruzana A21	131–139	7.5–9.3
Orona A17	131–148	6.0–9.0
LHA-13	130–140	6.0–8.0
Choca-05	125–135	5.0–7.0

Fuente: Catalogo de variedades del INIFAP (2022).

El experimento se desarrolló durante tres ciclos de producción establecidos consecutivamente entre junio de 2024 y diciembre de 2025. El primer ciclo (E1) se estableció el 15 de junio de 2024 y concluyó con la cosecha el 30 de noviembre del mismo año, con una duración total de 168 días. El segundo ciclo (E2) inició el 15 de diciembre de 2024 y finalizó el 30 de mayo de 2025, con una duración de 166 días. El tercer ciclo (E3) se estableció el 10 de junio de 2025 y se cosechó el 2 de diciembre de 2025, con una duración total de 175 días.

Los tres periodos de evaluación permitieron comparar el comportamiento productivo de los materiales bajo diferentes épocas de establecimiento y condiciones ambientales

características de la región. Cada ciclo de producción fue considerado como un ambiente de evaluación para determinar la respuesta del rendimiento de grano.

Cuadro 2. Periodos correspondientes a los tres ciclos de producción evaluados.

Ciclo	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Duración (días)
E1	15-junio-2024	30-noviembre-2024	168
E2	15-diciembre-2024	30-mayo-2025	166
E3	10-junio-2025	2-diciembre-2025	175

En cada ciclo se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco repeticiones. Los tratamientos estuvieron constituidos por los cinco materiales de arroz, por lo que cada ciclo estuvo integrado por 25 unidades experimentales. En total se dispuso de 75 unidades experimentales considerando los tres periodos de evaluación.

Cada parcela experimental tuvo dimensiones de 6.0 × 5.0 m, correspondientes a una superficie de 30 m². Para disminuir la influencia de los efectos de borde, la determinación del rendimiento se realizó en el área central de cada parcela y se excluyeron las zonas exteriores durante la cosecha.

Manejo agronómico. La preparación del terreno fue semejante en los tres ciclos de producción. Inicialmente se realizó un paso de arado, seguido de dos pasos de rastra para reducir el tamaño de los agregados del suelo y generar condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo. Posteriormente, se efectuó la nivelación final mediante rototiller con el propósito de mejorar la uniformidad de la superficie y favorecer la distribución del agua en el área experimental. La fertilización se realizó con una dosis total de 130 kg de N ha^{-1}, 40 kg de P_2O_5 ha^{-1} y 120 kg de K_2O ha^{-1}. El fósforo y el potasio se aplicaron al momento del establecimiento del cultivo, mientras que el nitrógeno se suministró en forma de urea y se fraccionó en dos aplicaciones. La primera se realizó aproximadamente 30 días después de la emergencia y la segunda 35 días después, coincidiendo aproximadamente con la etapa de iniciación de la panícula. El control de malezas se realizó mediante la combinación de métodos químicos y manuales. Después del establecimiento del cultivo se utilizaron herbicidas preemergentes a base de pendimetalina y clomazone, aplicados con un volumen de agua de 200 L ha^{-1}. Posteriormente, alrededor de los 30 días después de la siembra, se efectuó el control postemergente de gramíneas, ciperáceas y especies de hoja ancha mediante los herbicidas utilizados en el manejo regional del cultivo. Cuando fue necesario se efectuaron deshierbes manuales complementarios para mantener las parcelas libres de competencia significativa durante el desarrollo del experimento. El manejo de insectos plaga se efectuó con base en las recomendaciones técnicas regionales y de acuerdo con su presencia durante el ciclo. Entre los principales organismos considerados se encontraron la chinche del

arroz (*Oebalus insularis*), el barrenador (*Rupela albinella*) y el ácaro del arroz (*Steneotarsonemus spinki*). Las medidas de control se aplicaron de acuerdo con la incidencia observada durante cada periodo de producción. Las necesidades hídricas del cultivo fueron cubiertas principalmente mediante la precipitación. No obstante, se proporcionaron riegos suplementarios cuando las condiciones lo requirieron, particularmente durante etapas consideradas críticas para la formación del rendimiento, como macollamiento, iniciación de panícula, floración y llenado de grano, con la finalidad de evitar condiciones severas de déficit de humedad.

Caracterización ambiental de los ciclos. La información meteorológica se obtuvo de la estación climatológica localizada en el Campo Experimental Huimanguillo, situada a menos de 50 m del área donde se establecieron los experimentos. Durante los tres ciclos se registraron diariamente la temperatura máxima, mínima y media del aire, precipitación, humedad relativa y evaporación. Estos registros se utilizaron para caracterizar las condiciones ambientales prevalecientes durante cada periodo de producción y proporcionar elementos para interpretar las posibles diferencias observadas en el rendimiento de los materiales. Debido a que el objetivo del presente trabajo se concentró en el comportamiento productivo, las variables meteorológicas fueron utilizadas únicamente para describir las condiciones generales en las que se desarrolló cada ciclo y no como variables de respuesta.

Variables de estudio. Las evaluaciones de altura de planta y diámetro del tallo se realizaron dentro del área útil de cada parcela experimental a los 75 días después del trasplante (DDT). En cada fecha de evaluación se mantuvo el mismo criterio de muestreo para todos los cultivares y ambientes.

La altura de planta (cm) se determinó en diez plantas seleccionadas aleatoriamente dentro del área útil de cada parcela. La medición se realizó desde la superficie del suelo hasta el extremo superior de la planta, utilizando una cinta métrica marca Truper de 5m. Las diez mediciones obtenidas se promediaron para generar un único valor representativo por parcela y fecha de evaluación.

El diámetro del tallo (mm) se determinó sobre las mismas diez plantas utilizadas para la medición de altura. La lectura se efectuó en la porción basal del tallo mediante un vernier digital, marca Truper manteniendo una posición de medición uniforme entre plantas y fechas. Los valores individuales se promediaron para obtener el diámetro medio correspondiente a cada unidad experimental.

Determinación del rendimiento de grano. El rendimiento de grano constituyó la variable principal de respuesta del estudio. La cosecha se realizó cuando cada material alcanzó la madurez fisiológica, considerada cuando aproximadamente 90 % de los granos presentaba la coloración característica de madurez. Para la determinación del rendimiento se cosechó el área útil ubicada en la parte central de cada parcela experimental. El grano obtenido en cada unidad experimental se pesó y posteriormente se determinó su contenido de humedad mediante un medidor digital. Los valores de rendimiento fueron corregidos a un contenido estándar de 14 % de humedad y posteriormente convertidos a kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}), considerando la superficie efectiva cosechada. Este procedimiento permitió comparar los materiales bajo una base uniforme de contenido de humedad y eliminar la influencia de diferencias en la humedad del grano al momento de la cosecha.

Análisis estadístico. Las variables de estudio se analizaron en el ambiente estadístico R. Se empleó un modelo lineal mixto para determinar los efectos asociados con el material genético, el ciclo de producción y la interacción material x ciclo. Los materiales y los ciclos de producción se consideraron efectos fijos, mientras que los bloques anidados dentro de cada ciclo fueron considerados efectos aleatorios.

De manera general, el modelo estadístico utilizado se representó como:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + A_j + (C \times A)_{ij} + B_k(A_j) + \varepsilon_{ijk}$$

donde Y_{ijk} representa el valor de la variable de estudio observada; μ es la media general; C_i corresponde al efecto del i-ésimo material; A_j representa el efecto del j-ésimo ciclo de producción; $(C \times A)_{ij}$ corresponde a la interacción entre material y ciclo; $B_k(A_j)$ representa el efecto aleatorio del bloque anidado dentro del ciclo, y ε_{ijk} corresponde al error experimental.

La significancia de los efectos fijos se determinó mediante análisis de varianza tipo III. Cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. Asimismo, se obtuvieron las medias de cada variable de estudio de cada material dentro de cada ciclo y la media general de los tres periodos de evaluación. Los análisis se realizaron mediante los paquetes lme4, lmerTest y emmeans de R.

Resultados y discusión

Las tres etapas de producción tuvieron diferencias principalmente en la precipitación acumulada, mientras que la temperatura y la evaporación presentaron menor variación (Figura 1). En E1 las temperaturas máxima, media y mínima fueron de 34.36, 28.84 y 23.33

°C, respectivamente, con una precipitación acumulada de 1,506.3 mm y una evaporación de 725.20 mm. E2 fue el ciclo más seco y frío con temperaturas de 32.69, 26.69 y 20.69 °C, precipitación de 393.5 mm y evaporación de 777.33 mm. En E3 las condiciones fueron intermedias, con temperaturas de 33.00, 27.95 y 22.61 °C, precipitación acumulada de 956.2 mm y evaporación de 765.98 mm.

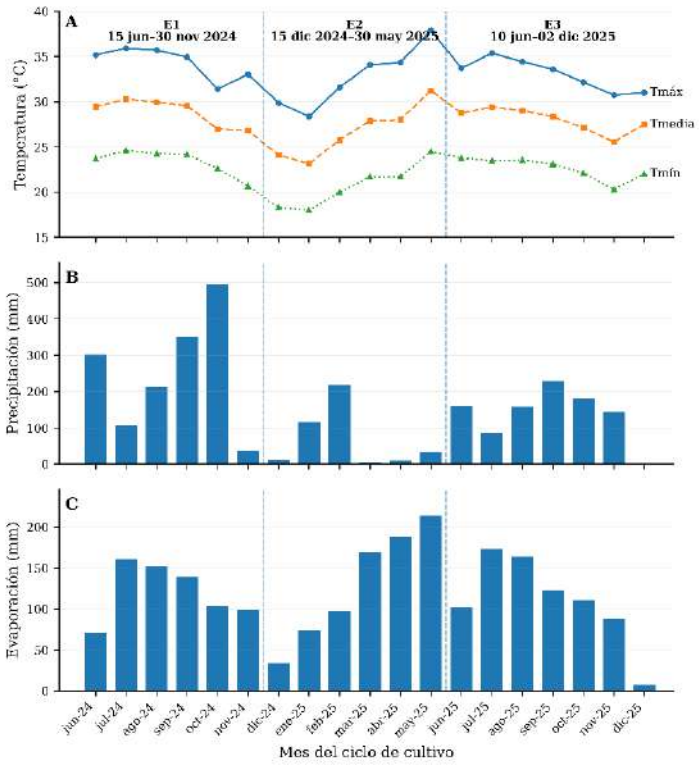


Figura 1. Variación de la temperatura, precipitación y evaporación durante tres ciclos de producción de arroz en Huimanguillo, Tabasco, México.

La diferencia mayor entre ambientes se asoció con la disponibilidad de agua por precipitación. E2 presentó una precipitación inferior a la evaporación y coincidió con los menores rendimientos de grano observados en los cinco cultivares. En cambio, E1 y E3 presentaron mayores acumulados de precipitación y también los valores más altos de rendimiento (R=0.75). Este comportamiento indica que las diferencias ambientales entre ciclos influyeron en la expresión productiva de los materiales, aunque su efecto debe interpretarse juntamente con la distribución de la lluvia, el riego suplementario y las características propias de cada cultivar.

La altura de planta a los 75 días después del trasplante (DDT) presentó diferencias entre cultivares y ambientes (Figura 2). Tabasqueña A17 presentó la mayor altura en los tres ciclos, con valores cercanos a 119, 116 y 118 cm en E1, E2 y E3, respectivamente, y se diferenció estadísticamente del resto de los materiales. Veracruzana A21, con alturas aproximadas de 110 a 114 cm, fue la segunda en el grupo estadístico. Oroña A17 y LHA-13 presentaron valores intermedios y no hubo diferencias significativas entre ellos, mientras que Choca-05 registró consistentemente las menores alturas, con valores cercanos a 90–98 cm. El orden relativo de los cultivares fue similar en los tres ambientes, aunque en E2 se redujo la altura en general respecto a E1 y E3. Las diferencias encontradas se pueden atribuir a la variabilidad genética entre los materiales y su respuesta particular a las condiciones ambientales. En arroz se ha documentado una gran variabilidad fenotípica para altura de planta y otros caracteres agronómicos relacionados con la productividad (Mongiano *et al.*, 2020). Igualmente, Khan *et al.* (2023) manifestaron que la altura puede influir en la expresión del rendimiento, aunque debe existir un equilibrio entre el crecimiento vegetativo, captación de radiación y resistencia al acame.

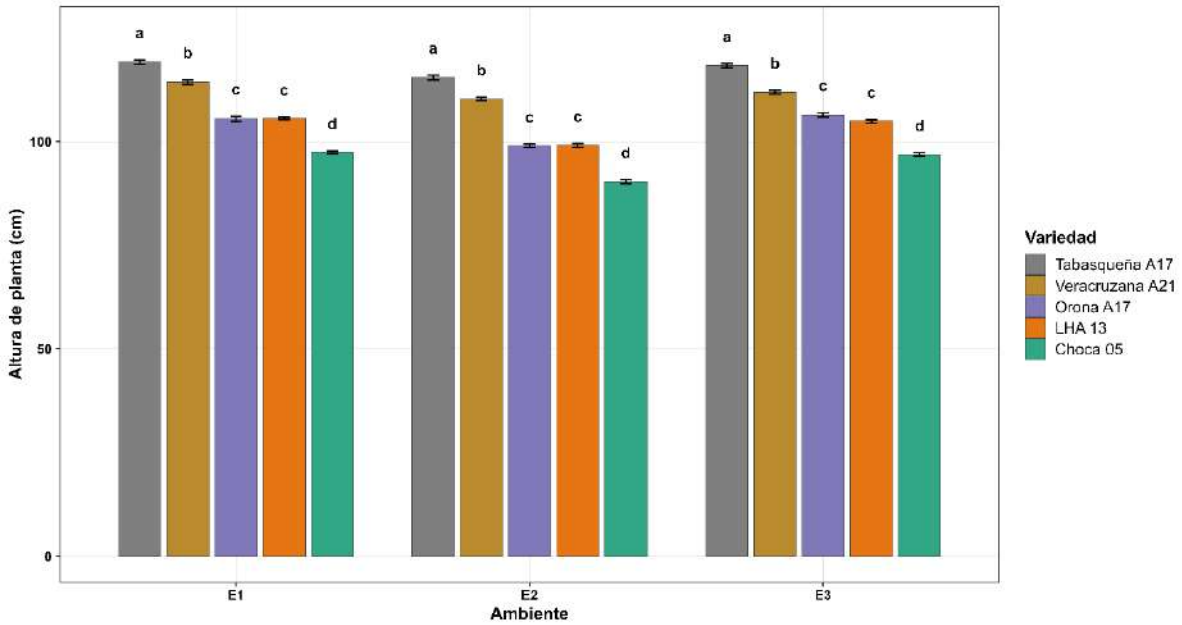


Figura 2. Altura de planta de cinco cultivares de arroz a los 75 días después del trasplante en tres ambientes de producción.

En este estudio, las mayores alturas y los mayores rendimientos de grano se presentaron en conjunto en Tabasqueña A17 y Veracruzana A21, mientras que Choca-05 tuvo los menores valores de ambas variables. Sin embargo, esta correspondencia no implica necesariamente una relación causal, dado que el rendimiento depende también del genotipo, condiciones climáticas, manejo agronómico y los diferentes componentes de producción. Esta interpretación se ajusta a estudios en los que, si bien se ha encontrado una relación positiva entre la altura y el rendimiento, la altura explica únicamente una parte de la variación productiva (Zhang et al., 2017).

El diámetro del tallo a los 75 DDT también mostró diferencias entre cultivares y ambientes (Figura 3). Tabasqueña A17 tuvo los valores mayores en los tres ciclos, con diámetros cercanos a 6.7–7.0 mm, le siguió Veracruzana A21 con aproximadamente 6.4–6.7 mm. En E1, Veracruzana A21 y Oroña A17 fueron del mismo grupo estadístico y LHA-13 y Choca-05 tuvieron los valores más bajos. En E2 y E3 se observó una mejor diferenciación, con Tabasqueña A17 en el primer grupo, Veracruzana A21 en el segundo, Oroña A17 y LHA-13 con valores intermedios y Choca-05 con menor diámetro. La respuesta observada fue similar a la obtenida para altura de planta, ya que los cultivares con mayor crecimiento vertical, también tendieron a presentar los tallos de mayor diámetro. Estas diferencias indican la variabilidad de crecimiento y arquitectura que existe entre los materiales de arroz. Shrestha *et al.* (2021) encontraron diferencias significativas entre genotipos para rasgos de crecimiento, rendimiento y sus componentes, mientras que Khan *et al.* (2023) hallaron una variabilidad fenotípica y genética amplia para diferentes caracteres agronómicos asociados con la productividad. En el manuscrito del que se ha partido, se citan las dos obras.

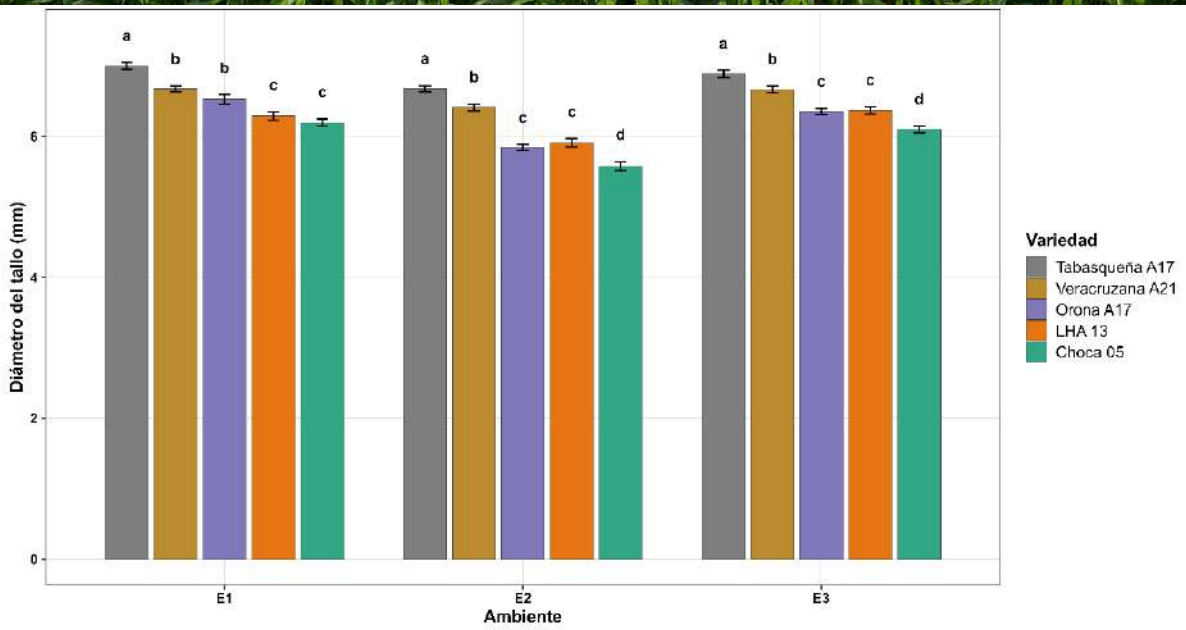


Figura 3. Diámetro del tallo de cinco cultivares de arroz a los 75 días después del trasplante en tres ambientes de producción.

Durante E2 se registraron, al igual que en altura, los diámetros generales más pequeños. Esta respuesta indica que las condiciones particulares de ese ciclo pudieron limitar parcialmente el crecimiento vegetativo, aunque no es posible atribuir este comportamiento a un solo factor ambiental, ya que la expresión de las características agronómicas resulta de la combinación de los efectos genéticos y ambientales.

Se encontraron diferencias en el rendimiento de grano entre cultivares y ambientes productivos (Figura 4), con valores que oscilaron aproximadamente entre 5,1 y 7,5 t ha^{-1}. En E1, Tabasqueña A17 obtuvo mayor rendimiento, con aproximadamente 7.5 t ha^{-1}, seguida por Veracruzana A21 con 7.1 t ha^{-1}. Oroña A17 y LHA-13 alcanzaron valores cercanos a 6.6 y 6.4 t ha^{-1}, respectivamente, mientras que Choca-05 tuvo el menor rendimiento, de alrededor de 5.8 t ha^{-1}. En E2 se observó una caída generalizada de la productividad. Tabasqueña A17 y Veracruzana A21 obtuvieron rendimientos aproximados de 6,8 y 6,6 t ha^{-1}, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre sí. Las variedades Oroña A17 y LHA-13 tuvieron un rendimiento de aproximadamente 6.0 y 5.7 toneladas por hectárea, respectivamente, mientras que la Choca-05 presentó de nuevo el menor rendimiento con un valor cercano a 5.1 toneladas por hectárea. En E3 la Tabasqueña A17 obtuvo cerca de 7.4 t

ha⁻¹, seguida por la Veracruzana A21 con 7.1 t ha⁻¹. Oroña A17 y LHA-13 dieron alrededor de 6.7 y 6.5 t ha⁻¹, respectivamente, y Choca-05 alcanzó cerca de 6.0 t ha⁻¹. En líneas generales, la jerarquía de los materiales se mantuvo relativamente constante entre ambientes: Las variedades Tabasqueña A17 y Veracruzana A21 fueron las que presentaron los mayores rendimientos, mientras que Oroña A17 y LHA-13 mostraron una respuesta intermedia y Choca-05 los menores valores.

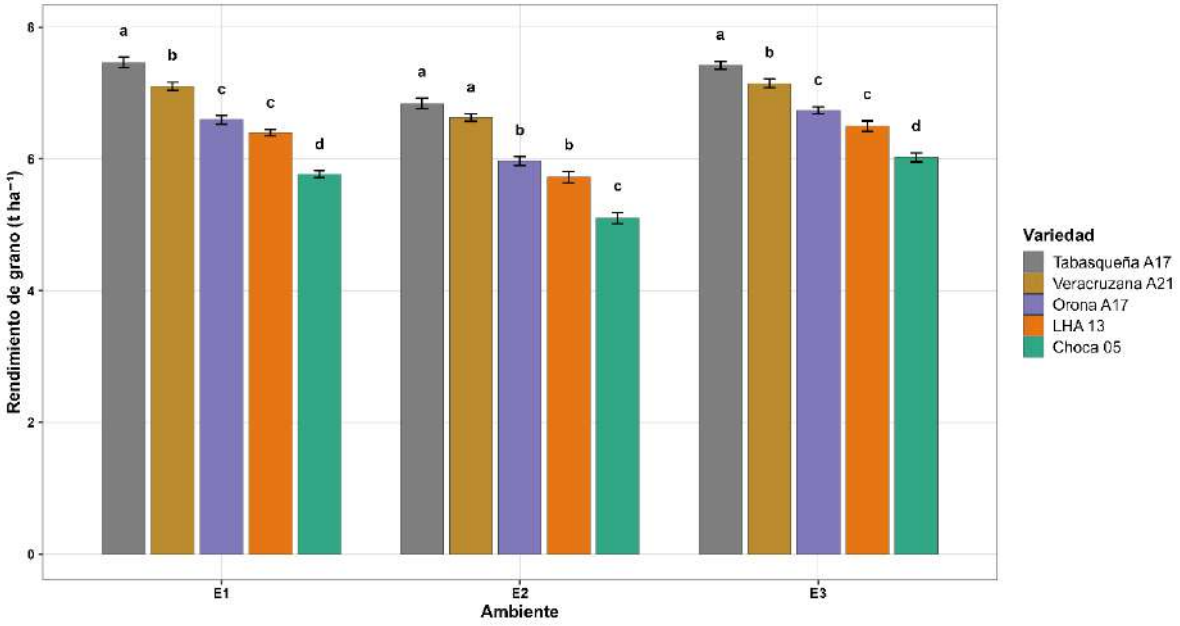


Figura 4. Rendimiento de grano de cinco cultivares de arroz en tres ambientes de producción en Huimanguillo, Tabasco, México.

Los diferentes rendimientos entre ciclos ponen en evidencia la influencia que las condiciones ambientales tienen sobre la expresión del potencial productivo. Huang *et al.* (2021), evaluando cultivares de arroz en ambientes templados, subtropicales y tropicales, comprobaron que la interacción genotipo x ambiente modifica el rendimiento y sus componentes. De igual forma, Ghazy *et al*. (2023) encontraron diferencias significativas entre genotipos y ambientes, resaltando la importancia de realizar evaluaciones en múltiples ambientes para la identificación de materiales con alto rendimiento y respuesta favorable bajo condiciones contrastantes.

En este estudio, E2 fue el ambiente de menor rendimiento para todos los cultivares y también presentó la menor precipitación acumulada, con 393.5 mm, comparado con 1,506.3 mm en E1 y 956.2 mm en E3. Esta coincidencia apunta a que las condiciones hídricas de E2 pudieron haber contribuido a restringir la expresión del rendimiento. El agua resulta de especial importancia durante las etapas reproductivas del arroz, pues el déficit hídrico durante floración y llenado de grano puede reducir la fertilidad, el peso del grano y, por ende, el rendimiento (López-Hernández *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2023).

Sin embargo, la reducción del rendimiento en E2 no puede explicarse solamente por la menor precipitación, ya que el cultivo tuvo riego suplementario y la respuesta final depende también de la distribución temporal de las lluvias, de la temperatura y de la respuesta del propio material. En arroz bajo condiciones tropicales se ha observado que las fluctuaciones térmicas y hídricas pueden alterar la expresión fenotípica y el comportamiento agronómico de los genotipos.

Un aspecto importante fue que, a pesar de que la magnitud del rendimiento varió entre ciclos, no hubo cambios importantes en la jerarquía de los cultivares. En los tres ambientes Tabasqueña A17 se mantuvo entre los materiales más productivos, generalmente seguida por Veracruzana A21, mientras que Choca-05 ocupó de forma consistente la posición inferior. Este comportamiento está de acuerdo con evaluaciones multiambientales donde se ha podido demostrar que la variación del rendimiento es el resultado de los efectos combinados del genotipo, el ambiente y su interacción (Huang *et al.*, 2021; Ghazy *et al.*, 2023).

Conclusiones

Tabasqueña A17 mostró el mejor comportamiento agronómico y productivo en los tres ciclos de evaluación, con rendimientos de grano de 6.8 a 7.5 t ha^{-1}, así como las mayores alturas de planta y diámetros de tallo a los 75 DDT. Veracruzana A21 también exhibió un comportamiento favorable con rendimientos entre 6.6 y 7.1 t ha^{-1}. En contraste, Oroña A17 y LHA-13 presentaron respuestas intermedias, con intervalos de 6.0–6.7 y 5.7–6.5 t ha^{-1}, respectivamente, mientras que Choca-05 registró los menores rendimientos, entre 5.1 y 6.0 t ha^{-1}. Las condiciones ambientales alteraron la magnitud del rendimiento de los cultivares. El ciclo E2, con menor acumulación de precipitación (393.5 mm) presentó los menores rendimientos, mientras que E1 y E3, con 1,506.3 y 956.2 mm de precipitación respectivamente, tuvieron mayor productividad. Sin embargo, la posición relativa de los cultivares se mantuvo similar entre ciclos, destacando consistentemente Tabasqueña A17 y Veracruzana A21. El estudio se hizo en una sola localidad y en tres ciclos de producción. Por ello, se recomienda ampliar la evaluación a otras zonas arroceras y años agrícolas, además

de incorporar componentes del rendimiento, análisis de estabilidad y una evaluación más detallada de las relaciones entre clima y productividad.

Literatura citada

Abebe, D., Mohammed, W., & Tesfaye, A. (2023). Genotype × environment interaction and stability analysis in upland rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Ethiopia. *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 26(1): 51–62. https://doi.org/10.1007/s12892-022-00161-5

Ghazy, M. I., Abdelrahman, M., El-Agoury, R. Y., El-Hefnawy, T. M., El-Naem, S. A., Daher, E. M., & Rehan, M. (2023). Exploring genetics by environment interactions in some rice genotypes across varied environmental conditions. *Plants*. 13(1): 74. https://doi.org/10.3390/plants13010074

Hernández-Aragón, L., Tavitas-Fuentes, L., Álvarez-Hernández, J. C., & de la O-Olán, M. (2023). Origen y características de la diversidad genética del arroz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 46(4): 461–469. https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4.461

Huang, X., Jang, S., Kim, B., Piao, Z., Redona, E., & Koh, H. J. (2021). Evaluating genotype × environment interactions of yield traits and adaptability in rice cultivars grown under temperate, subtropical and tropical environments. *Agriculture*. 11(6): 558. https://doi.org/10.3390/agriculture11060558

Jarin, A. S., Islam, M. M., Rahat, A., Ahmed, S., Ghosh, P., & Murata, Y. (2024). Drought stress tolerance in rice: Physiological and biochemical insights. *International Journal of Plant Biology*. 15(3): 692–718. https://doi.org/10.3390/ijpb15030051

Khan, M. A. R., Mahmud, A., Ghosh, U. K., Hossain, M. S., Siddiqui, M. N., Islam, A. A., Anik, T. R., Rahman, M., Sharma, A., Abdelrahman, M., Ha, C. V., Mostofa, M. G., & Tran, L. S. P. (2023). Exploring the phenotypic and genetic variabilities in yield and yield-related traits of the diallel-crossed F5 population of aus rice. *Plants*. 12(20): 3601. https://doi.org/10.3390/plants12203601

López-Hernández, M. B., López-Castañeda, C., Kohashi-Shibata, J., Miranda-Colín, S., Barrios-Gómez, E. J., & Martínez-Rueda, C. G. (2018). Tolerancia a sequía y calor en arroz (*Oryza sativa*). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 5(15): 373–385. https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1558

Mongiano, G., Titone, P., Pagnoncelli, S., Sacco, D., Tamborini, L., Pilu, R., & Bregaglio, S. (2020). Phenotypic variability in Italian rice germplasm. *European Journal of Agronomy*. 120: 126131. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126131

R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Salgado-Velázquez, S., Barrios-Gómez, E., Hernández-Aragón, L., Hernández-Lara, P. U., Olvera-Rincón, F., Sumano-López, D., & Palma-Cancino, D. J. (2026). Advances in rice agronomic technologies in Latin America in the face of climate change. *Crops*. 6(1): 8. https://doi.org/10.3390/crops6010008

Salgado-Velázquez, S., Olvera-Rincón, F., Sumano-López, D., Hernández-Lara, P. U., Freyre-Barrón, S., Palma-Cancino, D. J., & Córdova-Sánchez, S. (2026). Uso eficiente del recurso hídrico en genotipos de arroz de temporal y bajo riego suplementario en Tabasco, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*. 11(núm. esp. 2): e0111042. https://doi.org/10.30973/aap/2025.11.e0111042

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2025). "Este arroz ya se coció…" y está listo en su Día Internacional. *Gobierno de México*. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/este-arroz-ya-se-cocio-y-esta-listo-en-su-dia-internacional

Shrestha, J., Subedi, S., Kushwaha, U. K. S., & Maharjan, B. (2021). Evaluation of rice genotypes for growth, yield and yield components. *Journal of Agriculture and Natural Resources*. 4(2): 339–346.

Wu, C., Cui, K., Li, Q., Li, L., Wang, W., Hu, Q., & Peng, S. (2021). Estimating the yield stability of heat-tolerant rice genotypes under various heat conditions across reproductive stages: A 5-year case study. *Scientific Reports*. 11(1): 13604. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93079-x

Xing, Y. H., Lu, H., Zhu, X., Deng, Y., Xie, Y., Luo, Q., & Yu, J. (2024). How rice responds to temperature changes and defeats heat stress. *Rice*. 17(1): 73. https://doi.org/10.1186/s12284-024-00748-2

Xu, Y., Chu, C., & Yao, S. (2021). The impact of high-temperature stress on rice: Challenges and solutions. *The Crop Journal*. 9(5): 963–976. https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.02.011

Zhang, Y., Yu, C., Lin, J., Liu, J., Liu, B., Wang, J., & Zhao, T. (2017). OsMPH1 regulates plant height and improves grain yield in rice. *PLOS ONE*. 12(7): e0180825. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180825

Zhang, Y., Zhao, X., Liu, F., Zhu, L., & Yu, H. (2023). Effect of different water stress on growth index and yield of semi-late rice. *Environmental Sciences Proceedings*. 25(1): 84. https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14318

Dinámica nutrimental y respuesta fisiológica y agronómica del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) bajo diferentes proporciones de biosólido en un sistema de agricultura protegida con fertirrigación controlada

Litzi Arizbeth Valdez Muñoz[7], Josefa Espitia López, Benito Flores Chávez, Paul Misael Garza López

Resumen

El aprovechamiento agrícola de biosólidos constituye una estrategia sustentable para la valorización de residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales; sin embargo, la variabilidad en su composición nutrimental limita su uso como fuente exclusiva de fertilización en cultivos de alta demanda nutrimental, como el pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de biosólido incorporado a un sustrato inerte de tezontle sobre la dinámica nutrimental y la respuesta fisiológica y agronómica del cultivo bajo condiciones de agricultura protegida y fertirrigación controlada. El experimento se estableció mediante un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos y cinco repeticiones. Los biosólidos, provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco, Hidalgo, fueron previamente caracterizados y su composición nutrimental permitió establecer un programa de fertirrigación con soluciones nutritivas ajustadas semanalmente de acuerdo con la conductividad eléctrica de cada tratamiento, garantizando condiciones homogéneas para evaluar el efecto del biosólido sobre el sistema de cultivo. Durante los primeros dos meses se monitorearon variables nutrimentales (pH, conductividad eléctrica, NO_3^-, K^+, Ca^{2+} y Na^+) y variables fisiológicas (altura de planta, diámetro de tallo y contenido relativo de clorofila). Los resultados preliminares muestran que el manejo nutrimental permitió mantener condiciones de crecimiento comparables entre tratamientos, sin observar una respuesta lineal al incremento en la proporción de biosólido. Se concluye de manera preliminar que el biosólido influye en la dinámica de disponibilidad de nutrimentos y en la respuesta del

[7] Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, CP 43775, Ex. Hacienda de Quetzalapa, Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo, México. va338404@uaeh.edu.mx, profe_5566@uaeh.edu.mx, paul_garza@uaeh.edu.mx, josefa_espitia11153@uaeh.edu.mx

cultivo, por lo que su efecto debe evaluarse como un componente funcional del sistema de producción y no únicamente como una fuente de nutrimentos.

Palabras clave: biosólido, *Capsicum annuum*, fertirrigación, dinámica nutrimental, tezontle.

Abstract

The agricultural use of biosolids represents a sustainable strategy for the valorization of waste derived from wastewater treatment; however, the variability in their nutrient composition limits their use as the sole source of fertilization for crops with high nutrient demands, such as bell pepper (*Capsicum annuum* L.). The objective of this research was to evaluate the effect of different proportions of biosolids incorporated into an inert *tezontle* (volcanic scoria) substrate on nutrient dynamics and the crop's physiological and agronomic responses under protected agriculture and controlled fertigation conditions. The experiment was conducted using a randomized complete block design with six treatments and five replicates. The biosolids, sourced from the Atotonilco Wastewater Treatment Plant in Hidalgo, were characterized beforehand; their nutrient composition allowed for the establishment of a fertigation program using nutrient solutions adjusted weekly based on the electrical conductivity of each treatment, thereby ensuring homogeneous conditions to evaluate the biosolid's effect on the cropping system. During the first two months, nutrient variables (pH, electrical conductivity, NO_3^-, K^+, Ca^{2+}, and Na^+) and physiological variables (plant height, stem diameter, and relative chlorophyll content) were monitored. Preliminary results indicate that the nutrient management strategy maintained comparable growth conditions across treatments, with no linear response observed regarding the increase in the biosolid proportion. It is preliminarily concluded that biosolids influence nutrient availability dynamics and crop response; therefore, their effect should be evaluated as a functional component of the production system rather than merely as a nutrient source.

Keywords: biosolid, *Capsicum annuum*, fertigation, nutrient dynamics, *tezontle*.

Introducción

El crecimiento poblacional, la expansión de las zonas urbanas y el incremento en la cobertura de los sistemas de saneamiento han generado un aumento considerable en la producción de

lodos residuales derivados del tratamiento de aguas residuales municipales. Después de los procesos de estabilización, estos materiales se transforman en biosólidos, cuya disposición final representa uno de los principales retos ambientales para los organismos operadores de agua debido a los costos asociados con su manejo, transporte y confinamiento. En este contexto, el aprovechamiento agrícola de biosólidos ha cobrado relevancia como una estrategia orientada a promover la economía circular, disminuir la generación de residuos y reincorporar nutrimentos y materia orgánica a los sistemas de producción agrícola.

Diversos estudios han documentado que los biosólidos pueden aportar nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y micronutrientes, además de incrementar el contenido de materia orgánica, mejorar la estructura del suelo, favorecer la actividad microbiana e incrementar la capacidad de intercambio catiónico. Estos efectos pueden traducirse en una mayor disponibilidad de agua y nutrimentos para los cultivos, así como en mejoras en el crecimiento vegetal y el rendimiento agrícola cuando son aplicados bajo condiciones adecuadas y respetando los criterios de inocuidad establecidos por la normativa ambiental.

Sin embargo, la composición química de los biosólidos presenta una elevada variabilidad determinada por el origen de las aguas residuales, el tipo de tratamiento empleado y el proceso de estabilización utilizado. En consecuencia, no todos los biosólidos poseen la capacidad de satisfacer completamente los requerimientos nutrimentales de un cultivo, especialmente en sistemas intensivos de producción bajo agricultura protegida, donde la demanda de nutrimentos es elevada y el manejo de la fertilización requiere un control preciso.

En el cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.), la nutrición mineral constituye uno de los factores de mayor influencia sobre el crecimiento vegetativo, el desarrollo reproductivo, la calidad del fruto y el rendimiento final. Debido a ello, la producción comercial bajo invernadero depende generalmente del uso de soluciones nutritivas balanceadas que permitan mantener concentraciones adecuadas de los principales elementos esenciales durante todo el ciclo del cultivo.

La mayoría de las investigaciones relacionadas con biosólidos han evaluado su capacidad para sustituir parcial o totalmente la fertilización química mediante aplicaciones directas al suelo. No obstante, esta estrategia dificulta diferenciar si las respuestas observadas en las plantas se deben al aporte nutrimental del biosólido o a las modificaciones que éste produce sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del medio de crecimiento.

Con el propósito de reducir esta fuente de variación, en la presente investigación se utilizó tezontle como sustrato inerte, debido a que presenta un aporte nutrimental mínimo y proporciona principalmente soporte físico al sistema radical. Esta condición permitió evaluar el efecto de diferentes proporciones de biosólido con una menor interferencia de la fertilidad natural del suelo. Asimismo, la caracterización inicial del biosólido proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco evidenció concentraciones insuficientes de algunos nutrimentos para satisfacer completamente la demanda del cultivo, motivo por el cual fue necesario implementar un programa de fertirrigación mediante soluciones nutritivas ajustadas semanalmente de acuerdo con la conductividad eléctrica y la concentración de nutrimentos presentes en cada tratamiento.

Bajo este enfoque, el biosólido dejó de evaluarse únicamente como una fuente potencial de nutrimentos y pasó a considerarse como un componente funcional del medio de crecimiento, cuyo efecto puede expresarse mediante modificaciones en la dinámica de disponibilidad nutrimental y en la respuesta fisiológica del cultivo cuando el suministro de nutrimentos se mantiene bajo condiciones controladas.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de biosólido incorporado a un sustrato inerte de tezontle sobre la dinámica nutrimental y la respuesta fisiológica y agronómica del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de agricultura protegida con fertirrigación controlada.

Materiales y métodos

Sitio experimental

La investigación se desarrolló en el invernadero del Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), ubicado en el municipio de Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo, México, a una altitud aproximada de 2 180 m s. n. m. La región presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. El experimento se estableció en un invernadero de 10 × 20 m, con cubierta plástica blanca, donde se mantuvo una temperatura promedio de 25 °C y una humedad relativa cercana al 70 % durante el periodo de evaluación. Estas condiciones permitieron reducir la variabilidad ambiental y mantener un manejo homogéneo del riego y la nutrición del cultivo.

Material vegetal

Se utilizaron plántulas certificadas de pimiento morrón (Capsicum annuum L.) obtenidas a partir de semilla comercial de la empresa Hydro Environment® (México). El trasplante se realizó 55 días después de la siembra, el 12 de junio de 2026, cuando las plántulas presentaban un desarrollo vegetativo uniforme y eran aptas para su establecimiento definitivo. Cada planta se estableció individualmente en bolsas de polietileno negro de 30 × 30 cm, constituyendo cada bolsa una unidad experimental.

Preparación del sustrato

Como sustrato se utilizó tezontle rojo con granulometría de 3 a 8 mm, debido a su estabilidad física, elevada porosidad y reducido aporte nutrimental. El material fue lavado previamente para eliminar partículas finas y posteriormente se colocaron aproximadamente 5 kg por bolsa.

La utilización de un sustrato inerte permitió disminuir la influencia de la fertilidad natural del suelo y evaluar de manera más precisa el efecto de las diferentes proporciones de biosólido sobre la dinámica nutrimental del sistema de cultivo.

Obtención y caracterización del biosólido

El biosólido utilizado en la investigación fue obtenido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Atotonilco, Hidalgo, México. Antes de su incorporación al experimento, el material fue sometido a una caracterización fisicoquímica y microbiológica para verificar su calidad agronómica y su cumplimiento con la normatividad vigente para su aprovechamiento agrícola.

La caracterización fisicoquímica fue realizada por el Laboratorio Central Universitario del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, determinándose pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica, nitrógeno inorgánico, nitrógeno total, fósforo asimilable, potasio, sodio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico (CIC), azufre, hierro, cobre, zinc, manganeso, boro, densidad aparente, textura, relación carbono: nitrógeno y la concentración de plomo, cromo, cadmio, níquel, cobalto y molibdeno. Asimismo, se determinaron los principales parámetros de salinidad del extracto de pasta de saturación.

Los análisis fueron realizados mediante metodologías estandarizadas, incluyendo determinación potenciométrica para pH; puente de conductividad para CE; materia orgánica por el método de Walkley y Black; nitrógeno total mediante el método Kjeldahl; fósforo disponible mediante el método Olsen; potasio y sodio por espectrofotometría de emisión de flama; calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica; capacidad de intercambio catiónico mediante extracción con tiourea de plata; textura mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos; y metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica, entre otras metodologías descritas por el laboratorio.

La evaluación microbiológica fue realizada por Fertilidad de Suelos S. de R.L., empleando un método interno basado en la NOM-004-SEMARNAT-2002, Anexo III, obteniéndose una concentración de coliformes fecales inferior a 3 NMP g^{-1} de sólidos totales, valor que se encuentra dentro de los límites establecidos por dicha norma para su aprovechamiento agrícola.

Los resultados de la caracterización indicaron que, si bien el biosólido presentó concentraciones importantes de materia orgánica y diversos macro y micronutrimentos, el contenido de nitrógeno disponible resultó insuficiente para satisfacer completamente los requerimientos nutrimentales del cultivo de pimiento morrón durante todo su ciclo. En consecuencia, fue necesario implementar un programa de fertirrigación ajustado semanalmente para complementar el suministro de nutrimentos y mantener condiciones homogéneas entre tratamientos.

Tratamientos experimentales

El experimento se estableció mediante seis tratamientos correspondientes a diferentes proporciones de biosólido incorporadas al sustrato de tezontle.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados durante el experimento.

Tratamiento	Proporción de biosólido
T0	0 %
T1	1 %
T2	2 %

T3	3 %
T4	4 %
T5	5 %

Fuente: Elaboración propia (2026).

Cada tratamiento contó con cinco repeticiones, constituyendo un total de 30 unidades experimentales.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos y cinco repeticiones. Debido a que las variables nutrimentales y fisiológicas fueron registradas semanalmente sobre las mismas unidades experimentales, el análisis estadístico se planteó bajo un enfoque de medidas repetidas en el tiempo, considerando el porcentaje de biosólido como factor fijo y la semana de evaluación como factor de seguimiento.

Manejo nutrimental

Inicialmente se planteó evaluar el efecto del biosólido como fuente de nutrimentos sin el uso de fertilización convencional. Sin embargo, la caracterización inicial evidenció concentraciones insuficientes de algunos elementos esenciales para cubrir la demanda nutrimental del cultivo.

Con el fin de evitar deficiencias nutricionales que comprometieran el desarrollo de las plantas y permitieran comparar adecuadamente el efecto de los tratamientos, se implementó un programa de fertirrigación mediante soluciones nutritivas ajustadas semanalmente. Los ajustes se realizaron considerando la conductividad eléctrica y la concentración de nutrimentos disponibles en cada tratamiento, buscando mantener un suministro nutrimental controlado durante todo el ciclo del cultivo.

Este manejo permitió reducir el efecto de la disponibilidad inmediata de nutrimentos como fuente de variación experimental y centrar la evaluación en la influencia del biosólido sobre la dinámica nutrimental y la respuesta fisiológica del cultivo.

Variables evaluadas

Durante el desarrollo del experimento se realizaron evaluaciones semanales de variables relacionadas con el estado nutrimental y el crecimiento del cultivo.

Variables nutrimentales

pH de la solución del sustrato, Conductividad eléctrica (CE), Concentración de nitratos (NO_3^-), Calcio (Ca^{2+}), Potasio (K^+), Sodio (Na^+).

Las mediciones fueron realizadas mediante un kit portátil LAQUAtwin® (HORIBA Ltd., Japón), utilizando sensores específicos para cada ion.

Variables fisiológicas

Se evaluaron semanalmente:

- Altura de planta (cm): Se determinó desde la base del tallo hasta el ápice mediante una cinta métrica graduada.
- Diámetro del tallo (mm): Se midió en la base del tallo utilizando un vernier digital Insize®, con resolución de 0.01 mm.
- Contenido relativo de clorofila: Se determinó mediante un medidor SPAD-502 Plus® (Konica Minolta Inc., Japón), realizando lecturas en hojas completamente desarrolladas.

Variables productivas

Al concluir el ciclo del cultivo se evaluarán: Número de frutos por planta, peso promedio del fruto, rendimiento por planta, calidad comercial, calidad e inocuidad del fruto.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos serán sometidos inicialmente a estadística descriptiva para verificar la distribución de las variables evaluadas. Posteriormente se aplicará un modelo lineal mixto con medidas repetidas en el tiempo, considerando como efecto fijo la proporción de biosólido y como efecto de repetición las semanas de evaluación realizadas sobre la misma unidad experimental. Cuando se detecten diferencias significativas ($p \leq 0.05$), las medias serán comparadas mediante la prueba de Tukey. Adicionalmente, se analizará la interacción entre

el porcentaje de biosólido y el tiempo de evaluación con el propósito de describir la dinámica nutrimental y fisiológica del cultivo durante su desarrollo.

Resultados preliminares y discusión

La caracterización inicial del biosólido permitió establecer una estrategia de manejo nutrimental adecuada para el desarrollo del experimento. Aunque el material presentó características compatibles con su aprovechamiento agrícola conforme a la NOM-004-SEMARNAT-2002, su composición nutrimental hizo necesario complementar el suministro de nutrimentos mediante fertirrigación ajustada semanalmente. Esta decisión permitió mantener condiciones de crecimiento comparables entre tratamientos y evaluar el efecto del biosólido bajo un manejo nutrimental controlado.

Durante las primeras ocho semanas de evaluación se observó que las variables nutrimentales, particularmente la conductividad eléctrica, el pH y la concentración de nitratos, permanecieron dentro de los intervalos establecidos mediante los ajustes realizados a la solución nutritiva. El seguimiento continuo permitió reducir la variabilidad ocasionada por diferencias en la disponibilidad inmediata de nutrimentos, favoreciendo una comparación más objetiva entre tratamientos.

Respecto a las variables fisiológicas, las mediciones de altura de planta, diámetro de tallo y contenido relativo de clorofila mostraron diferencias entre tratamientos; sin embargo, dichas diferencias no siguieron una tendencia proporcional al incremento de la concentración de biosólido. En algunos casos, tratamientos con menores porcentajes presentaron un comportamiento similar o superior al observado en concentraciones mayores.

Este comportamiento sugiere que el efecto del biosólido no depende únicamente de la cantidad aplicada, sino de la interacción entre sus propiedades físicas y químicas, la disponibilidad de nutrimentos y el manejo de la fertirrigación. Resultados similares han sido reportados en investigaciones donde la respuesta agronómica estuvo asociada a la capacidad del biosólido para modificar el medio de crecimiento más que a su aporte directo de nutrimentos.

Los resultados obtenidos hasta esta etapa respaldan parcialmente la hipótesis planteada, al demostrar que el biosólido influye en la dinámica nutrimental del sistema de cultivo; sin embargo, será necesario concluir el ciclo productivo para determinar si dichas modificaciones se reflejan en el rendimiento, la calidad comercial y la inocuidad del fruto.

Caracterización del biosólido

La caracterización inicial del biosólido permitió verificar que el material cumplía con las especificaciones necesarias para su aprovechamiento agrícola; sin embargo, se observaron concentraciones relativamente bajas de algunos nutrimentos esenciales para sostener por sí solos el crecimiento del cultivo de pimiento morrón durante todo el ciclo productivo.

Este comportamiento justificó la implementación de un programa de fertirrigación controlada que permitiera mantener condiciones nutrimentales adecuadas y, al mismo tiempo, evaluar el efecto específico de la incorporación del biosólido sobre la dinámica del sistema de cultivo.

Dinámica nutrimental

El monitoreo semanal permitió dar seguimiento a la evolución de la conductividad eléctrica, pH y concentración de nutrimentos en cada tratamiento, realizando ajustes oportunos en la solución nutritiva conforme avanzó el desarrollo del cultivo.

Los registros obtenidos durante los primeros dos meses indican que el manejo nutrimental permitió mantener condiciones relativamente estables entre tratamientos, disminuyendo el riesgo de deficiencias severas y garantizando un suministro continuo de nutrimentos esenciales.

No obstante, se observaron diferencias en la magnitud y frecuencia de los ajustes requeridos entre tratamientos, lo que sugiere que la incorporación de biosólido podría influir en la dinámica de disponibilidad de nutrimentos dentro del sistema de producción.

Respuesta fisiológica del cultivo

Las evaluaciones semanales de altura de planta, diámetro de tallo y contenido relativo de clorofila (SPAD) mostraron tendencias diferenciadas entre tratamientos durante los primeros dos meses de desarrollo.

De manera preliminar, no se observó una relación directamente proporcional entre el incremento en la proporción de biosólido y el crecimiento vegetativo del cultivo, ya que algunos tratamientos con menores porcentajes presentaron respuestas similares o superiores a aquellos con concentraciones más elevadas. Este comportamiento sugiere que el efecto del biosólido podría depender no solamente de la cantidad incorporada al sustrato, sino también

de la interacción entre sus propiedades físicas y químicas, la disponibilidad nutrimental y el manejo de la fertirrigación.

Los resultados obtenidos hasta esta etapa indican la necesidad de continuar con el seguimiento del cultivo hasta concluir el ciclo productivo para determinar si estas tendencias se mantienen durante las etapas de floración, fructificación y cosecha.

El aprovechamiento agrícola de biosólidos representa una alternativa viable para la valorización de residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales; sin embargo, su utilización continúa siendo objeto de investigación debido a la variabilidad en su composición química y al comportamiento que presentan bajo diferentes condiciones de cultivo. En sistemas convencionales establecidos en suelo, numerosos estudios han atribuido los incrementos en crecimiento y rendimiento principalmente al aporte de nutrimentos y materia orgánica proporcionados por los biosólidos. No obstante, en el presente estudio se adoptó un enfoque metodológico diferente al emplear un sustrato inerte de tezontle y un programa de fertirrigación ajustado semanalmente, con el propósito de minimizar la influencia de la fertilización y evaluar con mayor precisión el efecto del biosólido sobre la dinámica nutrimental del sistema.

Los resultados preliminares indican que la incorporación del biosólido no generó una respuesta lineal en las variables fisiológicas evaluadas. En algunos casos, tratamientos con menores proporciones de biosólido presentaron un comportamiento similar o incluso superior al observado en concentraciones mayores. Este comportamiento coincide con investigaciones que señalan que el incremento en la dosis de biosólidos no necesariamente se traduce en un mayor crecimiento vegetal, debido a que la respuesta depende de múltiples factores relacionados con la disponibilidad efectiva de nutrimentos, las características físicas del medio de crecimiento y la interacción entre la raíz y el sustrato.

La caracterización inicial del biosólido permitió identificar concentraciones relativamente bajas de algunos nutrimentos esenciales para satisfacer completamente los requerimientos del cultivo de pimiento morrón. Este hallazgo modificó el planteamiento original de la investigación, ya que fue necesario implementar un programa de fertirrigación que garantizara un suministro nutrimental adecuado durante todo el ciclo del cultivo. Lejos de representar una limitación metodológica, esta modificación fortaleció el diseño experimental al permitir que todos los tratamientos se desarrollaran bajo condiciones nutrimentales

controladas, reduciendo el riesgo de que diferencias severas en la disponibilidad de nutrimentos enmascararan el efecto propio del biosólido.

Desde esta perspectiva, el biosólido dejó de evaluarse únicamente como una fuente de fertilización y pasó a considerarse como un componente funcional del sistema de cultivo. Diversos autores han señalado que, además del aporte de nutrimentos, los biosólidos pueden modificar propiedades relacionadas con la retención de agua, la capacidad de intercambio catiónico, la actividad microbiana y la liberación gradual de elementos minerales. Aunque estas variables no fueron determinadas directamente en la presente investigación, constituyen mecanismos potenciales que podrían explicar las diferencias observadas entre tratamientos y que deberán ser consideradas en la interpretación de los resultados finales.

El uso de tezontle como sustrato inerte representó una ventaja metodológica importante, ya que permitió disminuir la variabilidad asociada a la fertilidad natural del suelo. En consecuencia, las diferencias observadas entre tratamientos pueden asociarse principalmente a la incorporación del biosólido y a la interacción que éste establece con la solución nutritiva y el sistema radical del cultivo. Este enfoque difiere de la mayoría de los estudios reportados en la literatura, en los cuales resulta complejo separar el efecto derivado de la fertilización del efecto asociado a las modificaciones del medio de crecimiento.

Otro aspecto relevante fue el monitoreo semanal de la conductividad eléctrica y de la concentración de nutrimentos en cada tratamiento. Este seguimiento permitió realizar ajustes oportunos en la solución nutritiva y mantener condiciones relativamente homogéneas durante el desarrollo del cultivo. La estabilidad observada en las variables nutrimentales constituye un elemento fundamental para interpretar la respuesta fisiológica de las plantas, ya que disminuye la posibilidad de atribuir diferencias en el crecimiento a deficiencias nutrimentales ocasionadas por un manejo inadecuado de la fertirrigación.

Los resultados obtenidos hasta esta etapa sugieren que la respuesta del cultivo no depende exclusivamente de la cantidad de biosólido incorporada al sustrato, sino de la interacción entre las propiedades del biosólido, la dinámica de disponibilidad de nutrimentos y las condiciones de manejo del sistema de producción. En este sentido, la identificación de una dosis óptima podría representar un criterio agronómico más relevante que la simple búsqueda de la mayor proporción de biosólido aplicada.

Finalmente, es importante señalar que la investigación continúa en desarrollo y que las tendencias observadas durante las primeras etapas fenológicas deberán confirmarse mediante la evaluación del rendimiento, la calidad comercial de los frutos y el análisis estadístico de todas las mediciones realizadas a lo largo del ciclo del cultivo. Estos resultados permitirán establecer con mayor precisión el potencial del biosólido como componente funcional de sustratos utilizados en agricultura protegida.

Conclusiones

Las concentraciones de nutrimentos determinadas durante la caracterización inicial del biosólido evidenciaron la necesidad de complementar la nutrición del cultivo mediante fertirrigación, permitiendo mantener condiciones nutrimentales controladas durante el desarrollo del experimento.

La incorporación de biosólido en un sustrato inerte de tezontle constituye una estrategia metodológica que permite evaluar su efecto sobre la dinámica nutrimental y la respuesta fisiológica del cultivo con una menor interferencia de la fertilidad natural del suelo.

Los resultados preliminares indican que el incremento en la proporción de biosólido no produjo una respuesta lineal en las variables fisiológicas evaluadas, lo que sugiere que el efecto del biosólido depende de la interacción entre sus propiedades y el manejo nutrimental del sistema.

El monitoreo continuo de la solución nutritiva permitió mantener condiciones de crecimiento comparables entre tratamientos y proporcionó información relevante sobre la evolución temporal de la disponibilidad de nutrimentos durante el ciclo del cultivo.

La continuación del experimento permitirá determinar la influencia de las diferentes proporciones de biosólido sobre el rendimiento, la calidad e inocuidad del fruto, contribuyendo a establecer criterios técnicos para su utilización en sistemas de agricultura protegida.

Perspectivas de la investigación

La presente investigación constituye una etapa inicial para comprender el comportamiento de biosólidos incorporados a sustratos inertes bajo condiciones de fertirrigación controlada. La información generada permitirá fortalecer futuras investigaciones orientadas al

aprovechamiento sustentable de biosólidos en agricultura protegida y contribuirá al desarrollo de estrategias que favorezcan la economía circular mediante la valorización de residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

Asimismo, los resultados finales servirán como base para generar recomendaciones técnicas relacionadas con la dosis de aplicación, el manejo nutrimental y la productividad del cultivo de pimiento morrón, promoviendo alternativas de producción más eficientes y ambientalmente sustentables.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por las facilidades otorgadas para el desarrollo de la investigación. Se reconoce el apoyo del programa de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable, así como del personal académico y técnico que participa en el desarrollo del proyecto. Asimismo, se agradece a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo económico brindado a traves de la beca de posgrado para la realización de estudios de Maestria en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable.

Estado actual de la investigación

El presente trabajo corresponde a una investigación en desarrollo dentro del programa de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Los resultados presentados corresponden al seguimiento realizado durante los primeros dos meses del ciclo del cultivo y forman parte de un estudio longitudinal cuyo objetivo final es evaluar el efecto de diferentes proporciones de biosólido sobre la dinámica nutrimental, el rendimiento, la calidad e inocuidad del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de agricultura protegida.

Literatura citada

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Food and Agriculture Organization.

Bosland, P. W., & Votava, E. J. (2012). *Peppers: Vegetable and Spice Capsicums* (2nd ed.). CABI.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.

Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. INCAPA.

Food and Agriculture Organization. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses*. FAO.

Food and Agriculture Organization. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. FAO.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (8th ed.). Pearson.

Jones, J. B. (2005). *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower* (2nd ed.). CRC Press.

Jones, J. B. (2012). *Plant Nutrition and Soil Fertility Manual* (2nd ed.). CRC Press.

Littell, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W. W., Wolfinger, R. D., & Schabenberger, O. (2006). *SAS for Mixed Models* (2nd ed.). SAS Institute.

Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.

National Research Council. (2002). *Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practices*. The National Academies Press.

Pinheiro, J. C., & Bates, D. M. (2000). *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer.

Raviv, M., Lieth, J. H., & Bar-Tal, A. (2019). *Soilless Culture: Theory and Practice* (2nd ed.). Elsevier.

Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production* (7th ed.). CRC Press.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). *NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental—Lodos y biosólidos—Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Diario Oficial de la Federación.

Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.

United States Environmental Protection Agency. (1994). *A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule*. U.S. Environmental Protection Agency.

United States Environmental Protection Agency. (2003). *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*. U.S. Environmental Protection Agency.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science, 37*(1), 29–38.

Evaluación agronómica del chiltepin (*Capsicum annuum var. Glabriusculum*) en fibra de coco y suelo en invernadero

Santos Emiliano Mendoza-Rodríguez[8], José Luis Rodríguez-Chávez

Resumen

El chiltepín (*Capsicum annuum var*. glabriusculum) es un recurso de importancia económica y cultural cuyo aprovechamiento depende principalmente de poblaciones silvestres. Debido a la necesidad de generar alternativas de producción bajo condiciones controladas, el objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento agronómico del chiltepín cultivado en dos tipos de sustratos: suelo forestal y fibra de coco, bajo condiciones protegidas. El estudio se realizó en el municipio de Colón, Querétaro. Se emplearon semillas utilizadas obtenidas de frutos silvestres colectados en Ímuris, Sonora, y germinadas bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. Posteriormente, se estableció un experimento con 30 plantas por tratamiento, distribuidas mediante un diseño completamente al azar. Se implementó un sistema de riego por goteo y se evaluaron variables morfológicas (altura de planta, diámetro de tallo, longitud y ancho de hoja) y productivas (peso total, diámetro, longitud y peso individual del fruto). La tasa de germinación obtenida fue de 95%, indicando alta viabilidad del material vegetal empleado. Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos; las plantas cultivadas en suelo forestal presentaron mayores valores en las variables de crecimiento evaluadas. Asimismo, el rendimiento de frutos maduros fue mayor en suelo agrícola. Bajo las condiciones específicas del experimento, el suelo forestal favoreció un mayor desarrollo vegetativo y producción de frutos en comparación con la fibra de coco.

Palabras clave: agroforestería; plantas silvestres; conservación de recursos fitogenéticos; propagación vegetal.

Abstract

Chiltepin (*Capsicum annuum* var. glabriusculum) is a resource of economic and cultural

[8] Centro Universitario Ceickor, Carretera Bernal, Acceso a Ezequiel Montes Km. 3, Los Benitos, 76299 Qro. santos.mendoza@centrouniversitarioceickor.edu.mx, jose.rodriguez@centrouniversitarioceickor.edu.mx

importance whose exploitation relies mainly on wild populations. Given the need to develop alternative production strategies under controlled conditions, the objective of this study was to evaluate the agronomic performance of chiltepin grown in two substrate types: forest soil and coconut fiber, under protected conditions. The study was conducted in the municipality of Colón, Querétaro, Mexico. Seeds obtained from wild fruits collected in Ímuris, Sonora, were used and germinated under controlled temperature and relative humidity conditions.Subsequently, an experiment was established with 30 plants per treatment, arranged in a completely randomized design. A drip irrigation system was installed, and morphological variables (plant height, stem diameter, leaf length, and leaf width) and productive variables (total fruit weight, fruit diameter, fruit length, and individual fruit weight) were evaluated.

The germination rate was 95%, indicating high viability of the plant material used. Statistically significant differences were observed among treatments; plants grown in agricultural soil showed higher values for the evaluated growth variables. Likewise, mature fruit yield was higher in forest soil. Under the specific conditions of this experiment, agricultural soil promoted greater vegetative development and fruit production compared with coconut fiber.

Keywords: agroforestry; wild plants; conservation of plant genetic resources; plant propagation.

Introducción

Los parientes silvestres de las plantas cultivadas representan un componente esencial de la biodiversidad debido al reservorio genético que conservan y a su capacidad de adaptación a condiciones ambientales diversas. A diferencia de las especies domesticadas, que han sido modificadas mediante procesos de selección dirigidos hacia características productivas específicas, las poblaciones silvestres mantienen una variabilidad genética asociada con mecanismos de tolerancia a factores bióticos y abióticos adversos, así como características fisiológicas que pueden ser aprovechadas en programas de mejoramiento genético y conservación de recursos fitogenéticos (Jiménez, 2022; Mastretta-Yanes et al., 2019). Además de su importancia biológica, estas especies forman parte del patrimonio biocultural de diversas comunidades, donde históricamente han sido utilizadas con fines alimenticios, medicinales, ornamentales y productivos (Boege, 2008; Munguía-Lino, Vázquez-García y López-Sandoval, 2010).

La conservación de las plantas silvestres adquiere mayor importancia ante los procesos actuales de transformación del paisaje, expansión agrícola, cambio climático y aprovechamiento extractivo no regulado. Estas presiones han ocasionado la reducción de hábitats naturales y la pérdida de diversidad genética en numerosas especies de interés agrícola (Tobón-Niedfeldt et al., 2022). En este contexto, la conservación de poblaciones silvestres no solo representa una estrategia para mantener la biodiversidad, sino también una alternativa para fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos frente a escenarios ambientales cambiantes (Retes-Manjarrez et al., 2018). Por ello, el desarrollo de estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*, así como la incorporación de especies silvestres en sistemas productivos sustentables, constituye una estrategia para preservar estos recursos.

Dentro de este grupo de especies destaca el género *Capsicum*, cuyo centro de diversificación es la región de Mesoamérica, en regiones donde las culturas mesoamericanas tuvieron un papel fundamental en su manejo, selección y domesticación (Aguilar-Meléndez, 2009; Perry y Flannery, 2007). El chile forma parte de la identidad cultural y alimentaria de México; su presencia en la gastronomía nacional se relaciona con tradiciones ancestrales, conocimientos locales y una amplia diversidad de formas de consumo. Además de su importancia culinaria, los frutos de *Capsicum* han sido utilizados en prácticas medicinales tradicionales y representan un recurso económico importante para diversas comunidades rurales (Aguilar-Meléndez et al., 2021). La diversidad de chiles cultivados y silvestres existente en México refleja la estrecha relación entre los recursos naturales y las prácticas culturales desarrolladas a lo largo del tiempo.

Entre los chiles silvestres de mayor relevancia consumidos en México se encuentra el chiltepín (*C. annuum var. glabriusculum*), considerado el progenitor silvestre de la mayoría de los chiles cultivados (Medina-Martínez et al., 2010). Esta variedad se distribuye ampliamente en México, desde la región noroeste hasta el sureste del país, asociada principalmente con ambientes cálidos y ecosistemas como selvas bajas caducifolias, matorrales y zonas serranas (Figura 1). Su presencia ha sido documentada en diversos estados, incluyendo Sonora, Tamaulipas, Querétaro, Puebla y regiones de la costa del Pacífico y Golfo de México (Martínez-Ávalos et al., 2018; Luna-Ruiz, Nabhan y Aguilar-Meléndez, 2018).

El valor del chiltepín trasciende su importancia como ingrediente culinario. En distintas regiones de México constituye un elemento importante de la gastronomía tradicional, particularmente en el norte del país, donde es apreciado por su sabor, aroma y nivel de

pungencia. Su recolección y comercialización representan una fuente complementaria de ingresos para comunidades rurales, especialmente en Sonora, donde forma parte de la identidad regional y del conocimiento transmitido entre generaciones (Bañuelos, Salido y Gardea, 2008; Puebla, 2013). Asimismo, el chiltepín ha sido utilizado con fines medicinales, como parte del conocimiento que diversas comunidades han conservado sobre sus propiedades y formas de uso. Estas características, junto con su valor gastronómico y cultural, han contribuido al aumento de su demanda comercial en mercados nacionales e internacionales (Villalón-Mendoza et al., 2016).



Figura 1. a) Planta de chiltepín con frutos verdes y maduros, b) frutos cosechados (Rodríguez-Chávez, 2026)

A pesar de su importancia, las poblaciones silvestres de chiltepín enfrentan diversos riesgos asociados con la extracción intensiva de frutos, la modificación de los ecosistemas y la pérdida de hábitat. La recolección tradicional depende directamente de plantas que crecen en condiciones naturales y, cuando se realiza sin prácticas adecuadas de manejo, puede

afectar la capacidad de regeneración de las poblaciones y reducir su disponibilidad a largo plazo (Medina-Martínez et al., 2010). Ante esta problemática, el cultivo del chiltepín bajo diferentes sistemas de producción se ha planteado como una alternativa para disminuir la presión sobre las poblaciones naturales y asegurar su disponibilidad para fines alimentarios y comerciales. En México se han realizado investigaciones encaminadas a evaluar su cultivo mediante sistemas tradicionales, agroforestería

y producción bajo condiciones protegidas, con resultados variables dependiendo del ambiente y manejo empleado (Mares-Quiñones y Valiente-Banuet, 2019). En Sonora se han establecido cultivos en diferentes regiones productoras, mientras que en Puebla se han evaluado sistemas bajo invernadero donde se ha observado un incremento en la producción por planta respecto a poblaciones manejadas sin control agronómico (Bañuelos, Salido y Gardea, 2008; Morales-Guzmán et al., 2018). Estas investigaciones evidencian el potencial del cultivo como una alternativa complementaria de conservación; sin embargo, aún es necesario generar información sobre los requerimientos agronómicos de la especie, particularmente en aspectos relacionados con su establecimiento, crecimiento y productividad bajo diferentes condiciones de manejo y regiones del país.

Evaluar alternativas para el cultivo del chiltepín permite generar información que facilite su incorporación a sistemas de producción sustentables, sin poner en riesgo sus poblaciones silvestres. Conocer su comportamiento agronómico ayuda a identificar las condiciones más adecuadas para su cultivo y aporta información útil para promover el aprovechamiento responsable y la conservación de una especie de gran valor económico, cultural y biológico para México. Sin embargo, a pesar del creciente interés por el cultivo del chiltepín como alternativa para disminuir la presión sobre las poblaciones silvestres, la información sobre su comportamiento agronómico bajo diferentes sustratos en condiciones protegidas sigue siendo limitada. En particular, existe poca evidencia que permita establecer si el uso de sustratos alternativos, como la fibra de coco, puede ofrecer un desempeño comparable al del suelo en términos de crecimiento y rendimiento. Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento agronómico del chiltepín cultivado en fibra de coco y suelo bajo condiciones de invernadero, mediante el análisis de variables de crecimiento vegetativo, calidad física del fruto y rendimiento. Se planteó la hipótesis de que el uso de fibra de coco como sustrato para el cultivo de chiltepín (*C. annuum* var. glabriusculum) en invernadero no genera diferencias en el crecimiento vegetativo ni en el rendimiento con respecto al suelo.

Materiales y Métodos

Se realizó una investigación experimental, prospectiva, longitudinal y analítica para evaluar el comportamiento agronómico del chiltepín (*C. annuum var. glabriusculum*) cultivado en dos sustratos bajo condiciones de invernadero. El experimento se desarrolló de septiembre de 2024 a abril de 2025 en un invernadero de mediana tecnología ubicado en el municipio de Colón, Querétaro, México.

Como material biológico se utilizaron semillas de un genotipo de chiltepín obtenidas de frutos maduros recolectados en Ímuris, Sonora, durante 2022. La germinación se realizó en charolas de 200 cavidades utilizando cepellones de lana de roca Grodan Groplug® (Rockwool B.V., Holanda), cubiertos con vermiculita para favorecer la retención de humedad y una emergencia uniforme de las plántulas. A los 45 días después de la siembra, las plántulas fueron trasplantadas a macetas de polipropileno de 45 × 30 × 15 cm, previamente desinfectadas con desinfectante oxigenado DRK (Diken International, Puebla, México). Se evaluaron dos sustratos como tratamientos: suelo

forestal (tierra de monte), utilizado como testigo, y fibra de coco (Galuku, Sri Lanka), compuesta por una mezcla de 70 % chip y 30 % polvo (v/v). Antes del trasplante, ambos sustratos fueron hidratados hasta alcanzar una conductividad eléctrica cercana a 2.0 dS m^{-1}, con el fin de homogenizar las condiciones iniciales de establecimiento. El riego se aplicó mediante un sistema por goteo equipado con una bomba de ½ HP (Evans, México) y emisores autocompensados de 3 L h^{-1}, colocando dos goteros por maceta. La fertirrigación se realizó tres veces por semana utilizando la solución nutritiva universal de Steiner (1984), preparada con sales grado agrícola y micronutrientes quelatados. La solución se ajustó a una conductividad eléctrica de 1.25 dS m^{-1} y un pH de 6.0, valores verificados con un medidor de pH Hanna HI98100 y un conductímetro Hanna HI98331 (Hanna Instruments, Rumania). Durante los primeros 10 días posteriores al trasplante se aplicó la solución al 25 % de su concentración, posteriormente al 50 % durante 20 días y, a partir de entonces, al 100 % hasta concluir el experimento. Ambos tratamientos recibieron el mismo programa de riego y nutrición, de modo que la única fuente de variación correspondiera al tipo de sustrato.

Las plantas se condujeron a dos tallos mediante la eliminación de los brotes laterales situados por debajo de la primera bifurcación. No se realizaron podas de hojas ni raleo de frutos. La cosecha se efectuó semanalmente, recolectando únicamente frutos con color rojo intenso, tamaño aproximado de 5 mm de longitud y diámetro, y libres de daños o deformaciones.

Durante el ciclo del cultivo se evaluaron variables de crecimiento vegetativo: altura de planta, diámetro del tallo, largo de hoja y ancho de hoja. La altura se determinó con cinta métrica desde la base del tallo hasta el ápice; el diámetro del tallo se midió semanalmente con un calibrador digital (Steren, México), mientras que las dimensiones foliares se registraron sobre una hoja representativa ubicada en la parte media de cada planta. La calidad física del fruto se determinó en una muestra de 20 frutos maduros por tratamiento. Se registraron la longitud y el diámetro con un calibrador digital de precisión (Steren, México), y el peso individual mediante una balanza analítica. El rendimiento se estimó a partir del peso acumulado de los frutos cosechados semanalmente por unidad experimental.

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con dos tratamientos, tres repeticiones por tratamiento y diez plantas por repetición como unidad experimental. Las variables de crecimiento se analizaron mediante un análisis de varianza con medidas repetidas (ANOVA-MR). Las variables de calidad del fruto se compararon mediante la prueba t de Student, mientras que el rendimiento se analizó con la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney. En todos los casos se utilizó un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Adicionalmente, la dinámica temporal de las variables de crecimiento se describió mediante análisis de regresión no lineal. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa GraphPad Prism versión 8 (GraphPad Software, California, EUA).

Resultados y discusión

La germinación de las semillas de chiltepín alcanzó 95 % después de 45 días, sin la aplicación de tratamientos pregerminativos, y las plántulas presentaron una altura promedio de 6.5 ± 0.7 cm. Este porcentaje es superior al reportado en diversos estudios donde fue necesario emplear ácido

giberélico, escarificación o priming para superar la latencia (Torres, 2019; Brondo-Ricárdez et al., 2020). La elevada germinación observada sugiere que las semillas presentaban alta viabilidad fisiológica y un bajo grado de dormancia, condición que probablemente estuvo asociada a la madurez del material vegetal y a las condiciones controladas de germinación, como también señalan Morales-Guzmán et al. (2018).

La altura de planta mostró un incremento continuo durante todo el periodo experimental en ambos sustratos (Figura 2), ajustándose a un modelo de crecimiento de Gompertz con las

ecuaciones Y_{coco}=77.39*(7.092/77.39)^(exp(-0.06660*X)) y Y_{Suelo}=65.57*(6.703/65.57) ^ (exp(-0.1014*X)), con un valor de R^2= 0.8955 y R^2=0.9345 para el tratamiento con fibra de coco y suelo respectivamente. Aunque durante las primeras semanas no se observaron diferencias importantes, las plantas cultivadas en suelo superaron gradualmente a las establecidas en fibra de coco y alcanzaron alturas finales de 37.7 ± 4.29 y 35.6 ± 5.55 cm, respectivamente. El análisis de varianza evidenció efectos significativos del tiempo, del sustrato y de la interacción entre ambos factores ($p < 0.01$), lo que indica que el efecto del sustrato cambió conforme avanzó el desarrollo del cultivo. Este comportamiento coincide con lo reportado por Megchún-García et al. (2024), quienes describen un crecimiento continuo del chiltepín bajo condiciones protegidas, aunque con alturas superiores debido a diferencias en el manejo agronómico y el ambiente de cultivo. La ligera ventaja observada en el suelo puede atribuirse a una mayor disponibilidad de nutrientes, particularmente nitrógeno, elemento estrechamente relacionado con el crecimiento vegetativo (Salazar-Jara y Juárez-López, 2013).

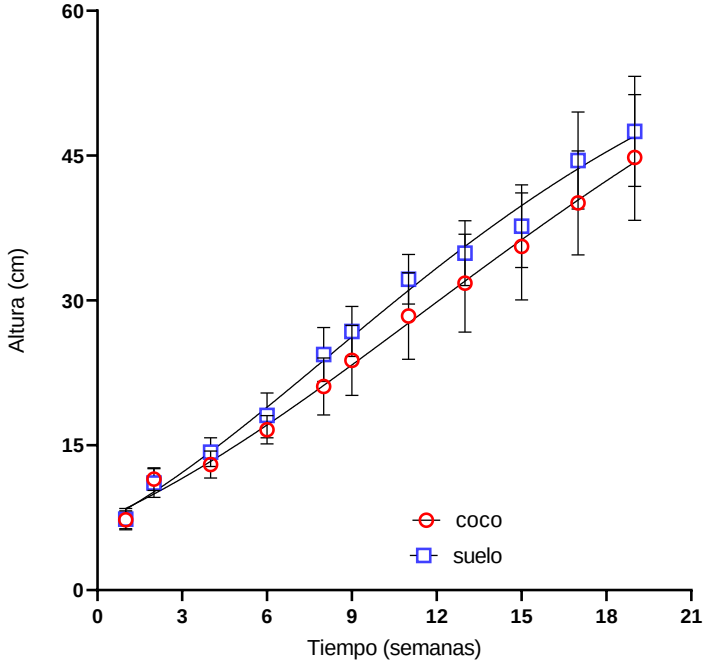


Figura 2. Efecto del sustrato en la altura de planta

El diámetro del tallo presentó un incremento sostenido en ambos tratamientos y alcanzó

valores finales de 1.037 ± 0.13 cm en suelo y 0.96 ± 0.12 cm en fibra de coco. Los datos se ajustaron al modelo de Gompertz: Y_{coco}=77.39*(7.092/77.39)^(exp(-0.06660*X)) y Y_{Suelo}=65.57*(6.703/65.57) ^ (exp(-0.1014*X)), con un valor de R^2= 0.8955 y R^2=0.9345 para el tratamiento con fibra de coco y suelo respectivamente. El análisis de varianza indicó que el efecto del sustrato no fue significativo (p = 0.3026). Estos resultados indican que ambos medios proporcionaron condiciones similares para el desarrollo estructural de la planta. Resultados semejantes fueron reportados por Megchún-García et al. (2024) y Osuna-Ávila (2025), quienes encontraron diámetros cercanos a 1 cm en plantas cultivadas bajo condiciones protegidas. De acuerdo con Sun et al. (2019), un mayor diámetro del tallo refleja una mayor capacidad para transportar agua y fotoasimilados, por lo que constituye un indicador confiable del vigor de la planta.

El largo y el ancho de la hoja presentaron una dinámica similar en ambos tratamientos (Figura 3). Ambas variables aumentaron hasta la semana 11 y posteriormente disminuyeron conforme inició la etapa reproductiva, patrón que fue descrito adecuadamente mediante un modelo gaussiano (Figura 4). En el caso del largo de fruto, las ecuaciones ajustadas fueron $Y_{coco=}$7.296*exp(-0.5*((X-10.41)/ 5.795)^2) para el tratamiento con fibra de coco y Y_{suelo}=8.477*exp(-0.5*((X-9.960)/ 5.409)^2) para el cultivo en suelo, con coeficientes de correlación de R = 0. 7087 y R = 0. 0.7407, respectivamente, mientras que el comportamiento del ancho de la hoja fue descrito mediante un modelo gaussiano. Las ecuaciones ajustadas fueron Y_{coco} = 3.502*exp(-0.5*((X-10.68)/ 5.558)^2) para fibra de coco y Y_{suelo} = 3.813*exp(-0.5*((X-10.53)/ 5.262)^2) para suelo, con coeficientes de determinación de R^2 = 0.6805 y R^2 = 0.7835, respectivamente. El análisis estadístico mostró efectos significativos del tiempo, del sustrato y de la interacción entre ambos factores tanto para el largo como para el ancho foliar (p < 0.01). Las plantas cultivadas en suelo desarrollaron hojas ligeramente más grandes que las establecidas en fibra de coco. Esta respuesta coincide con lo señalado por Azofeifa y Moreira (2004), quienes describen que el máximo desarrollo foliar ocurre antes de que la planta destine una mayor proporción de fotoasimilados hacia la formación de frutos. Asimismo, Flores-Margez et al. (2022) indican que las propiedades físicas y químicas del sustrato influyen directamente en la expansión foliar, al modificar la disponibilidad de agua y nutrientes.

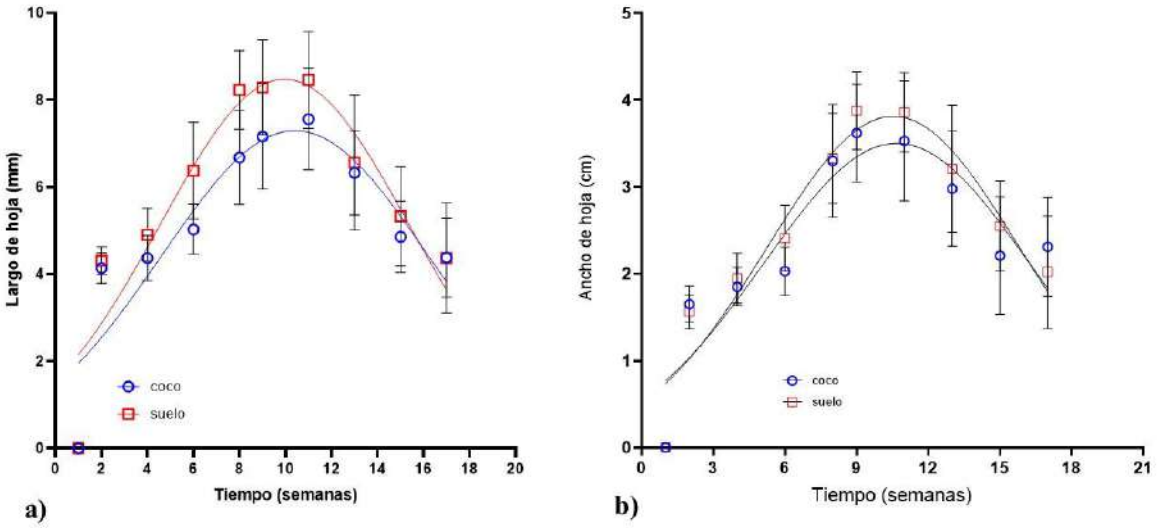


Figura 3. Efecto del sustrato en el a) largo de hoja y b) ancho de hoja

Las dimensiones físicas del fruto también fueron afectadas por el tipo de sustrato (Figura 4). Las plantas cultivadas en suelo produjeron frutos con mayor diámetro (0.88 ± 0.13 cm), longitud (0.88 ± 0.13 cm) y peso (0.503 ± 0.05 g) que las cultivadas en fibra de coco, cuyos valores fueron de 0.69 ± 0.09 cm, 0.68 ± 0.12 cm y 0.364 ± 0.03 g, respectivamente. En los tres casos, la prueba t confirmó diferencias altamente significativas ($p < 0.0001$). Los valores obtenidos se encuentran dentro del intervalo reportado para la especie por Molina, Morales y Márquez (2013); sin embargo, la superioridad del suelo sugiere que una mayor disponibilidad nutrimental favoreció el crecimiento y llenado del fruto. Ramírez et al. (2018) también documentaron que las características morfológicas del fruto presentan una elevada plasticidad y responden tanto al ambiente como al manejo agronómico.

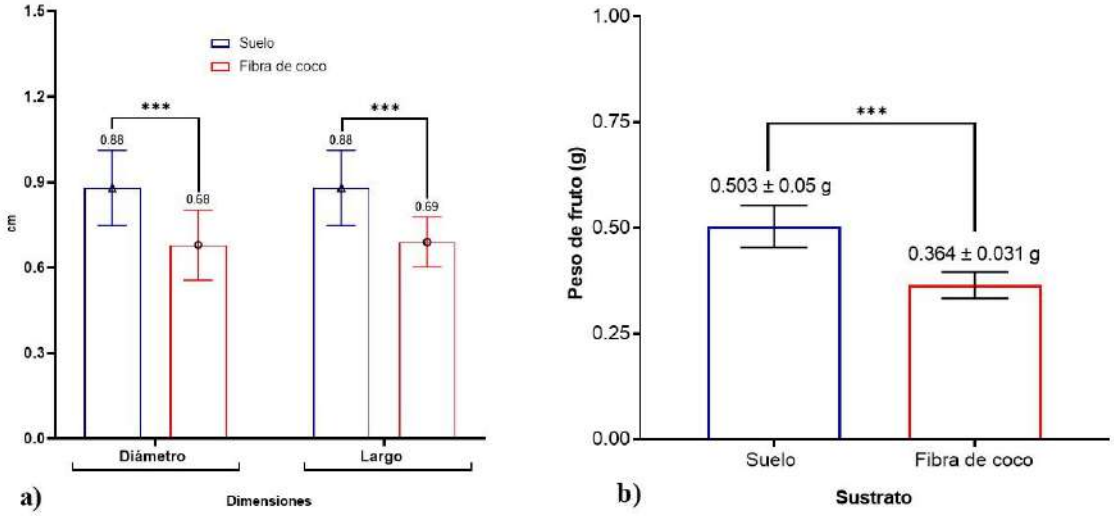


Figura 4. Efecto del sustrato en a) dimensiones y b) peso del fruto

La variable que mostró la mayor diferencia entre tratamientos fue el rendimiento. Las plantas establecidas en suelo produjeron 17.8 g por planta, mientras que las cultivadas en fibra de coco alcanzaron únicamente 4.0 g por planta. La prueba de Mann-Whitney confirmó que esta diferencia fue estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$). Aunque ambos rendimientos fueron inferiores a los reportados por Márquez-Quiroz et al. (2013) y Mc Caughey-Espinoza et al. (2020), la tendencia observada coincide con lo descrito por Chan-Cupul et al. (2025), quienes encontraron mayor productividad del chiltepín en suelo que en mezclas a base de fibra de coco. Es probable que el suelo proporcionara un ambiente radicular más estable y una mayor disponibilidad de nutrientes, mientras que la fibra de coco, por ser un sustrato prácticamente inerte, dependió totalmente de la eficiencia del manejo de la fertirrigación, condición que pudo limitar la expresión de su potencial productivo.

Los resultados permiten rechazar la hipótesis planteada. Aunque la fibra de coco permitió un desarrollo vegetativo comparable al del suelo en variables como el diámetro del tallo, presentó un desempeño inferior en altura de planta, desarrollo foliar, calidad física del fruto y, principalmente, en rendimiento. Bajo las condiciones de este estudio, el suelo forestal constituyó el sustrato que favoreció el mejor comportamiento agronómico del chiltepín en invernadero.

Conclusiones

El tipo de sustrato influyó en el comportamiento agronómico del chiltepín (Capsicum annuum var. glabriusculum) cultivado en invernadero. Bajo las condiciones evaluadas, el suelo forestal presentó un mejor desempeño que la fibra de coco, por lo que representa una alternativa adecuada para el establecimiento del cultivo. Esta investigación aporta información sobre el manejo del chiltepín en sistemas protegidos y contribuye al conocimiento de las condiciones necesarias para su incorporación a esquemas de producción agrícola. El cultivo de chiltepín bajo condiciones de invernadero representa una alternativa para disponer de frutos, reduciendo la dependencia de la recolección en poblaciones silvestres, favoreciendo un aprovechamiento más sustentable de la especie y contribuyendo a la conservación de sus poblaciones silvestres.

Literatura citada

Aguilar-Meléndez, A., Morrell, P. L., Roose, M. L. y Kim, S. C. (2009). Genetic diversity and structure in semiwild and domesticated chiles (*Capsicum annuum*; Solanaceae) from Mexico. American Journal of Botany, 96(6), 1190-1202. https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.3732/ajb.0800155

Aguilar-Meléndez, A.; Vásquez-Dávila, M.A.; Manzanero-Medina, G.I.; Katz, E. (2021). Chile (*Capsicum spp.)* as Food-Medicine Continuum in Multiethnic Mexico. Foods 2021, 10, 2502. https://www.mdpi.com/2304-8158/10/10/2502

Azofeifa, Á. y Moreira, M. A. (2004). Análisis de crecimiento del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot), en Alajuela, Costa Rica. Agronomía Costarricense, 28(1), 57-67. https://www.redalyc.org/pdf/436/43628106.pdf

Bañuelos, N., Salido, P. L. y Gardea, A. (2008). Etnobotánica del chiltepín: Pequeño gran señor en la cultura de los sonorenses. Estudios Sociales (Hermosillo, Son.), 16(32), 177-205. https://www.redalyc.org/pdf/417/41703206.pdf

Boege, E. (2008). El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México. Hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrodiversidad en los territorios indígenas. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. México. https://patrimoniobiocultural.com/archivos/publicaciones/libros/El_patrimonio_biocultural.pdf

Brondo-Ricárdez, R., Domínguez-Angulo, S., Pérez-Hernández, I. y D'Artola-Barceló, A. L. (2020). Pregerminative seed treatments and seedling initial development of amashito chilli (*Capsicum annuum L. var. glabriusculum*). Agroproductividad, 13 (2), 53-59. https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/es/article/view/1589

Chan-Cupul, W., Juárez-Cuevas, A., Gutiérrez-Campos, J. M. y Macedo-Barragán, R. J. (2025). Calidad de fruto y rendimiento de chile habanero Chocolate (*Capsicum chinense* Jacq.) en dos sistemas de cultivo: Calidad y rendimiento de chile habanero Chocolate. Scientia Agricolis Vita, 2(1), 41-45. https://agricolis.uanl.mx/index.php/revista/article/view/26

Flores-Margez, J.P., Herrera-Arias, L. P., Covarrubias-Rangel, V., Corral-Díaz, B., Osuna-Avila, P. (2022). Respuesta de chile chiltepín (*Capsicum annuum L.* var. *glabriusculum*) a tipos de sustrato en condiciones de invernadero. En: Alternativas para el manejo sostenible de la producción agroecológica en México. E. González Pérez, A. V. Ayala Garay, e I. Orona Castillo compiladores. Libro Técnico 2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Celaya, México. https://cathi.uacj.mx/handle/20.500.11961/25364?show=full

Jiménez, E.A. (2022). Uso de parientes silvestres de la papa para aumentar la diversidad genética dentro de los cultivos. Journal of the Selva Andina Biosphere, 10(2), 66-67. https://portal.amelica.org/ameli/journal/71/713755001/713755001.pdf

Luna-Ruiz, J. D. J., Nabhan, G. P. y Aguilar-Meléndez, A. (2018). Shifts in plant chemical defenses of chile pepper (Capsicum annuum L.) due to domestication in Mesoamerica. Frontiers in Ecology and Evolution, 6, 48. https://www.frontiersin.org/journals/ecology-and-evolution/articles/10.3389/fevo.2018.00048/full

Mares-Quiñones, M. D. y Valiente-Banuet, J. I. (2019). Horticultural aspects for the cultivated production of piquín peppers (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) a review. HortScience, 54(1), 70-75. https://journals.ashs.org/view/journals/hortsci/54/1/article-p70.xml

Márquez-Quiroz, C., López-Espinosa, S. T., Cano-Ríos, P. y 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.

https://www.redalyc.org/pdf/609/60929307002.pdf

Martínez-Ávalos, J. G., Venegas-Barrera, C. S., Martínez-Gallegos, R., Torres-Castillo, J. A., Santibáñez, F. E. O., Mora-Olivo, A., Guerra-Pérez, A., Arellano-Méndez, L. y Ocañas, F. G. (2018). A review on the geographical distribution, fruit production and concentration of capsaicinoids in *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* in the northeastern region of Mexico. Preprints. https://doi.org/10.20944/preprints201811.0517.v1

Mastretta-Yanes, A., Bellon, M. R., Acevedo, F., Burgeff, C., Piñero, D. y Sarukhán, J. (2019). Un programa para México de conservación y uso de la diversidad genética de las plantas domesticadas y sus parientes silvestres. Revista Fitotecnia Mexicana, *42*(4), 321-334. https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/55

Mc Caughey-Espinoza, M., Miriam, D., Buitimea-Cantúa, G. V., Buitimea-Cantúa, N. E., Ayala-Astorga, G. I. y Ochoa-Meza, A. (2020). Propiedades fisicoquímicas y rendimiento de frutos de chile chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum* Dunal) cultivados bajo diferentes condiciones de crecimiento. Idesia (Arica), 38(3), 77-86. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292020000300077

Medina-Martínez, T., Villalón-Mendoza, H., Pérez-Hernández, J. M., Sánchez Ramos, G. y Salinas-Hernández, S. (2010). Avances y perspectivas de investigación del chile piquín en Tamaulipas, México. CienciaUAT, 4(4), 16-21. https://www.redalyc.org/pdf/4419/441942920006.pdf

Megchún-García, J. V., Rebolledo-Martínez, A., Ángel-Pérez, A. L. D., Nataren-Velázquez, J. y Capetillo-Burela, Á. (2024). Chile piquín (*Capsicum annuum var. Aviculare*) establecido en un revestimiento de plástico y arreglos espaciales. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 11(3), e3984. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282024000300103

Molina, M.C., Morales, C.A. y Márquez, C.A. (2013). Técnicas para el establecimiento y producción de chiltepín silvestre, bajo un sistema agroforestal en Sonora, México. *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser y Pickersgill. Comisión Nacional Forestal, México. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/tecnicas-chiltepin.pdf

Morales-Guzmán, V., Morales-Calva, E., Gallardo-Sandoval, A. y Ortega-Rangel, L. (2018), Evaluación de Chiltepín (*Capsicum annum* L.) producido bajo condiciones de invernadero en Xicotepec de Juárez, Puebla. Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales. 4-14: 37-40. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol4num14/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V4_N14_6.pdf

Munguía-Lino, G. Vázquez-García, L. M. y López-Sandoval, J. A. (2010). Plantas silvestres ornamentales comercializadas en los mercados de la flor de Tenancingo y Jamaica, México. Polibotánica, (29), 281-308. https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/824

Osuna-Ávila, P., Aldana-Galvez, S.A., Rodrigo-García, J., Flores-Márgez, J.P. y Corral-Díaz, B. (2026). Influencia de los consorcios micorrícicos arbusculares y la fertilización fosfórica en los componentes del rendimiento de chile piquín. Agronomía Mesoamericana, 37, Artículo 5n9xzz35, 2026. https://doi.org/10.15517/5n9xzz35

Perry, L. y Flannery, K. V. (2007). Precolumbian use of chili peppers in the Valley of Oaxaca, Mexico. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(29), 11905-11909. https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0704936104

Puebla, G.M. A. (2013). Intermediación en el mercado de chiltepín de la región Río Sonora. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, Sonora, México. https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/410/1/PUEBLA-GUTIERREZ-MA13.pdf

Ramírez, N.U.I., Cervantes, O.F., Montes, H.S., Raya, P.J. C., Cibrián, J.A. y Andrio, E.E. (2018). Morphological diversity of piquín chilli (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) from Querétaro and Guanajuato, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9(6), 1159-1170. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342018000601159

Retes-Manjarrez, J. E., Hernández-Verdugo, S., Pariaud, B., Hernández-Espinal, L. A., Parra-Terraza, S., Trejo-Saavedra, D. L. y Garzón-Tiznado, J. A. (2018). Resistance to Pepper huasteco yellow vein virus and its heritability in wild genotypes of *Capsicum*

annuum. Botanical Sciences, 96(1), 52-62. https://www.botanicalsciences.com.mx/index.php/botanicalSciences/article/view/1029

Salazar-Jara, J.L. y Juárez- López, P. 2013. Requerimiento macronutrimental en plantas de chile (*Capsicum annuum* L.) Revista Biociencias. 2 (2): 27-34. https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/32

Sun, J., Wang, M., Lyu, M., Niklas, K. J., Zhong, Q., Li, M. y Cheng, D. (2019). Stem diameter (and not length) limits twig leaf biomass. Frontiers in Plant Science, 10(185), 1-10. https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.00185/full

Tobón-Niedfeldt, W., Mastretta-Yanes, A., Urquiza-Haas, T., Goettsch, B., Cuervo-Robayo, A. P., Urquiza-Haas, E., y Koleff, P. (2022). Incorporating evolutionary and threat processes into crop wild relatives conservation. Nature Communications, 13(1), 6254. https://www.nature.com/articles/s41467-022-33703-0

Torres, T.J. E. (2019). Germinación de semilla de chile chiltepín (*Capsicum annuum* L. *var. Glabriusculum*) sometido a diferentes concentraciones de ácido giberélico. Tesis, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Unidad Laguna. Torreón, México.

Villalon-Mendoza, H., Ramírez-Meraz, M., Garza-Ocanas, F. y Maiti, R. (2016). Value chain of chile Piquín wild chili (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) from Northeastern Mexico. International Journal of Bio-resource and Stress Management, 7(3), 455-460. https://indianjournals.com/article/ijbsm-7-3-017

Evaluación en las modificaciones de los componentes del rendimiento de papa cv. Fianna inducidas por podas foliares y florales

Santa Lucía Quintero Bastida[9], Emanuel Arias Rojas[10], José Antonio López Sandoval, José Alberto Salvador Escalante Estrada

Resumen

En el cultivo de papa, la poda de hoja e inflorescencia puede mejorar el rendimiento al redirigir la materia seca de la reproducción hacia los tubérculos. El objetivo de general del estudio fue: evaluar el efecto de la poda de hojas y la poda de inflorescencias sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). El experimento se realizó en el ciclo agrícola primavera-verano 2022. Se evaluaron tres tratamientos: T1 (testigo): plantas sin ningún tipo de poda, T2 (poda de hoja): eliminación manual de dos hojas por planta y T3 (poda de inflorescencia): eliminación manual de la inflorescencia completa. Las variables medidas fueron: número de rizomas, número de tubérculos, número de hojas, área foliar, peso fresco de hoja y peso fresco de tubérculo. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los datos de cada fecha de muestreo (60 y 90 días después de la plantación), se analizaron de forma independiente mediante un análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba de comparación de medias Tukey (α=0.05). La poda de inflorescencia aumentó el rendimiento de tubérculos, mostrando valores superiores en número de rizomas, área foliar y peso fresco de tubérculos. Se observó una correlación positiva entre el área foliar y el rendimiento de tubérculos (R^2 = 0.86). Los resultados de este estudio abren líneas de investigación orientadas a implementar la poda de inflorescencia como práctica agronómica en papa.

Palabras clave: poda, rendimiento, *Solanum tuberosum* L.

Abstract:

[9] Colegio de Postgraduados. Posgrado en Botánica. Campus Montecillo. Montecillo,Texcoco, Estado de México, México.quinterolucia632@gmail.com, jasee@colpos.mx.
[10] Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario "El Cerrillo", el Cerrillo Piedras Blancas, C. P. 50200 Toluca, Estado de México. jalopezsa@uaemex.mx, ariasrojasemanuel99@gmail.com

In potato cultivation, inflorescence pruning can improve tuberization by redirecting dry matter from reproduction toward the tubers. The general objective of the study was to evaluate the effect of leaf pruning and inflorescence pruning on the growth, development, and yield of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). The experiment was conducted during the 2022 spring-summer growing season. Three treatments were evaluated: T1 (control): plants without any pruning; T2 (leaf pruning): manual removal of two leaves per plant; and T3 (inflorescence pruning): manual removal of the entire inflorescence. The variables measured were number of rhizomes, number of tubers, number of leaves, leaf area, fresh leaf weight, and fresh tuber weight. The experiment was set up using a randomized complete block design with four replications. Data from each sampling date (60 and 90 days after planting) were analyzed independently using analysis of variance (ANOVA) and the Tukey mean comparison test (α=0.05). Inflorescence pruning increased tuber yield, showing higher values for the number of rhizomes, leaf area, and fresh tuber weight. A positive correlation was observed between leaf area and tuber yield (R^2 = 0.86). The results of this study open lines of research aimed at implementing inflorescence pruning as an agronomic practice for potatoes.
Keywords: pruning, yield, *Solanum tuberosum* L.

Introducción

En México, cada año se establecen 65,000 hectáreas de papa (*Solanum tuberosum* L.), que alcanzan una producción de 1.8 millones de toneladas. El rendimiento anual oscila entre 27 y 31 t ha^{-1} (SIAP, 2024). En el campo mexicano este cultivo involucra a 8,700 productores y generan más de 17,500 empleos directos (ASERCA, 2024). El cultivo de papa tiene importancia económica y social, ya que produce más alimento por unidad de superficie en comparación con la mayoría de los principales cereales **(**FAO, 2025).

En la producción agrícola es necesario mejorar la rentabilidad y rendimiento de los cultivos, además de optimizar su manejo agronómico. En este sentido, la poda es una técnica que permite modificar la arquitectura de las plantas, para aumentar la cantidad y/o calidad de sus frutos o estructuras de interés económico. Hoy en día, la mayoría de los cultivos son sometidos a esta técnica, aunque los objetivos pueden variar según la especie **(**Noda-Leyva y Martín-Martín, 2016**).**

En el cultivo de pepino Ayala et al. (2019) evaluaron la influencia de la poda apical de tallo principal sobre el crecimiento de la planta y rendimiento de frutos. Se observó que la biomasa seca de tallo y hojas disminuyó en plantas con un solo tallo (sin poda), mientras que, en aquellas sometidas a poda apical, que generó dos tallos por planta, se incrementó en 19.6 %; así mismo el manejo a dos tallos promovió mayor producción de flores (56.9 %) en comparación con plantas de un solo tallo.

Para el caso de *Jaltomata procumbens* (Cav.) J.L. Gentry, una especie arvense semidomesticada de uso alimenticio, Flores-Sánchez et al. (2021) evaluaron los efectos de poda, mediante la eliminación de brotes laterales y basales, y de un tratamiento sin poda sobre diversos caracteres agronómicos en condiciones de invernadero. El tratamiento con poda presentó incrementos en la altura de planta (38.6 %) número de flores por racimo (18.6 %), número de frutos por racimo (17.8 %) y peso de frutos (39.6 %); en comparación con el tratamiento sin poda.

En el cultivo de papa, la poda hojas e inflorescencias puede influir en la formación y el llenado de tubérculos, así como en el rendimiento. Bautista-Condori et al. (2018) observaron que la poda floral incrementó el rendimiento hasta 18.5 t ha^{-1}, en comparación con 13.7 t ha^{-1} registrado en el testigo. Este efecto se atribuyó a que la eliminación de las inflorescencias reduce la demanda de fotosintatos asociada con la reproducción sexual, lo que favorece su redistribución para el crecimiento y llenado de tubérculos.

Con base en lo anterior, el objetivo del estudio fue evaluar las modificaciones en los componentes del rendimiento de la papa cv. Fianna inducidas por podas foliares y florales. Se plantea que la eliminación de hojas e inflorescencias incrementará significativamente el rendimiento de tubérculos en comparación el testigo sin poda, debido a una redistribución de fotoasimilados hacia los órganos de almacenamiento subterráneos.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El experimento se llevó a cabo, durante el ciclo agrícola primavera-verano 2022, bajo condiciones de cielo abierto en Santa Cruz Pueblo Nuevo, en el municipio de Tenango del Valle, el cual está ubicado a 19°05' N, 99°39' O, y 2280 m de altitud, en clima templado subhúmedo, con lluvias en verano y poca precipitación en invierno Cb(w2)(i')g, la precipitación anual es de 900 mm, y temperatura media de 12.8°C (García, 2005).

Plantación

Se plantaron los tubérculos a una densidad de cinco tubérculos por metro cuadrado, en surcos con una separación de 75 cm.

Manejo del cultivo

Se realizó barbecho a 30 cm de profundidad. La fertilización de fondo se efectuó con la dosis 150N–250P–70K, además de 2 000 kg ha^{-1} de composta, la cual se distribuyó de manera uniforme en el terreno. Se emplearon como fuentes de fertilización superfosfato de calcio simple, sulfato de amonio, cloruro de potasio, sulfato de magnesio y fertilizantes compuestos triple 16 y triple18. La segunda fertilización se aplicó durante la escarda, con 150 kg ha^{-1} de fertilizante triple 16, 150 kg ha^{-1} de cloruro de potasio y 150 kg ha^{-1} de nitrato de magnesio. La fertilización foliar se suministró a los 30 ddp (después de la plantación) y cada 15 días hasta los 120 ddp.

Manejo de plagas y enfermedades

Para el control de plagas del suelo durante la siembra se aplicó terbufos a una dosis de 25 kg ha^{-1} y al inicio de la brotación de los tubérculos se aplicaron fungicidas e insecticidas de manera preventiva semanalmente hasta los 45 dds. Una vez establecida la plantación, se aplicó enraizador (Raizal) a 2 kg ha^{-1}, bactericida Kukulkán (kasugamicina) a 500 mL ha^{-1}, fungicida Dominus (carbendazim) a 1 kg ha^{-1}, fungicida Soul (azoxistrobin) a 1 L ha^{-1} e insecticida Regent (fipronil) a 500 mL ha^{-1} con una mochila aspersora de 25 L.

Tratamientos

Se evaluaron tres tratamientos: T1 (testigo): plantas sin poda, T2 (poda de hoja): eliminación manual de dos hojas maduras del estrato intermedio de cada planta y T3 (poda de inflorescencia): eliminación de la inflorescencia completa.

Podas, muestreos y variables evaluadas

Las podas se hicieron a los 30 y 60 ddp (días después de la plantación), lo que generó dos fechas de muestreo a los 60 y 90 ddp. En cada fecha de muestreo se registró por planta el número de rizomas (NRI), número de tubérculos (NTU), número de hojas (NH), área foliar sin incluir el pecíolo (AF, cm^2), la cual se midió con un integrador marca LI-COR 3100 (Lincoln, Nebraska, USA). El peso fresco de tubérculo (PFTU, g) y peso fresco de hoja (PFH, g) se pesaron con una balanza granataria.

Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

Análisis estadístico

Los datos de cada fecha de muestreo se analizaron de forma independiente mediante un análisis de varianza (ANDEVA) y prueba de comparación de medias Tukey (α=0.05). Para evaluar el efecto del muestreo y de los tratamientos de poda sobre las variables morfológicas y de rendimiento, se realizó un análisis de varianza considerando como factores muestreo (M), tratamiento (T) y su interacción (M × T). La significancia estadística se evaluó con un nivel de probabilidad de $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$, con el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2013).

Análisis de correlación y regresión

Se aplicó correlación de parcial de Pearson entre las variables morfológicas, fisiológicas y de rendimiento, utilizando los datos de ambos muestreos, donde se controló el efecto del tiempo de evaluación. Se determinaron los coeficientes de correlación (r) y su significancia estadística se evaluó a un nivel de probabilidad de $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$., con el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2013).

Se realizó análisis de regresión lineal para área foliar, número de rizomas y peso fresco de los tubérculos. Se incluyó la ecuación del modelo y el coeficiente de determinación (R^2), con el programa Microsoft Excel (Microsoft corporation, 2019).

Los análisis de correlación de Pearson y regresión se efectuaron integrando los tratamientos de poda y ambos muestreos, para identificar las relaciones funcionales fuente–sumidero que gobiernan el rendimiento de tubérculos, independientemente del efecto específico de cada tratamiento.

Resultados y discusión

Condiciones climáticas

El cultivo se estableció durante el ciclo agrícola primavera-verano 2022, con una duración aproximada de 120 días después de la plantación (ddp), que comprende del día juliano ~130 al 250. Durante el ciclo del cultivo la temperatura media osciló entre 15 y 18 °C, mientras que las temperaturas máximas se mantuvieron principalmente entre 22 y 30 °C y las mínimas entre 6 y 12 °C (Figura 1). Las condiciones térmicas antes mencionadas, coinciden con el rango óptimo reportado para el cultivo de papa. Rodríguez-Pérez, (2010) señala que la tasa máxima de asimilación neta en papa ocurre entre 15 y 18 °C, lo cual coincide con la temperatura media observada durante gran parte del ciclo del cultivo en este estudio. Esto indica que las plantas se desarrollaron bajo condiciones favorables para la fotosíntesis y la acumulación de biomasa.Por otro lado, la temperatura óptima para la tuberización se sitúa entre 18 y 23 °C (Gautam et al., 2024). Durante el ciclo fenológico del presente estudio, las temperaturas medias se ubicaron cerca del límite inferior de este rango, lo cual favorece la inducción y el crecimiento de los tubérculos. Cabe destacar que no se registraron heladas

(temperaturas menores a 0 °C) durante el ciclo del cultivo, lo cual es relevante, ya que temperaturas entre −2 y −9 °C provocan daños severos en papa, como reducción en la absorción de agua, alteraciones en la fotosíntesis y daño celular por formación de cristales de hielo (Stegner, 2022). La ausencia de estos eventos permitió que el cultivo completara su ciclo sin estrés térmico extremo. Los requerimientos hídricos del cultivo de papa oscilan entre 600 y 1 000 mm por ciclo de producción (Zuñiga et al., 2017), por lo que la precipitación durante el ciclo del cultivo fue suficiente, lo que permitió un desarrollo fisiológico favorable del cultivo. Un suministro adecuado de agua es especialmente crítico desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica, ya que en esta etapa se define el número, tamaño y calidad de los tubérculos (Haverkort et al., 1990; Rodríguez-Pérez, 2010).

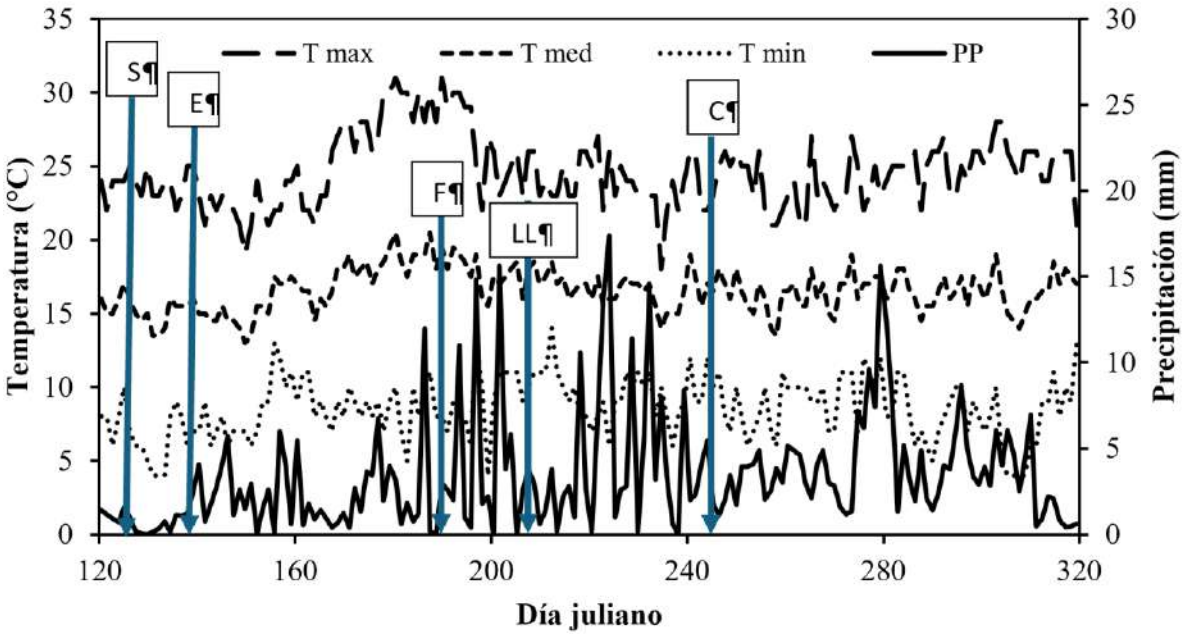


Figura 1. Temperatura máxima, media y mínima, y precipitación durante el ciclo fenológico de la papa en el ciclo agrícola primavera–verano 2022, bajo condiciones de cielo abierto en Santa Cruz Pueblo Nuevo, Tenango del Valle, Estado de México. S= siembra, E= emergencia, F= floración, LL= llenado, C= cosecha

Análisis de varianza de las variables de crecimiento y rendimiento

El análisis de varianza mostró que los tratamientos de poda tuvieron un efecto altamente significativo ($p \leq 0.01$) sobre el número de rizomas (NRI), área foliar (AF), peso fresco de hojas (PFH) y peso fresco de tubérculos (PFT), en ambos muestreos (Cuadro 1). El peso fresco del tubérculo es clave ya que influye de forma directa en el rendimiento total de la

papa, los tubérculos más pesados y grandes incrementan la biomasa inicial y suelen elevar el rendimiento por hectárea (Asnake et al., 2023).

En un estudio sobre la distribución de fotoasimilados hacia los órganos vertederos en papa, se evaluaron diferentes niveles de defoliación (relación fuente/vertedero) aplicados en diferentes etapas fenológicas del cultivo de papa. Se determinó que las plantas defoliadas en un 40% durante la formación de los tubérculos, aumento el rendimiento en 10 t ha^{-1} (Burgos et al., 2021). Al respecto Tekalign y Hammes et al. (2005) indican que el rendimiento total de materia seca de los cultivos depende del tamaño del dosel foliar, de la tasa de funcionamiento de las hojas (eficiencia) y del tiempo que dicho dosel permanece activo (duración). La producción de asimilados por parte de las hojas (fuente) y la medida en que estos pueden acumularse en los órganos de destino (demanda) influyen significativamente en el rendimiento del cultivo.

Cuadro 1. Análisis de varianza para las variables evaluadas en papa bajo tratamientos de poda en dos fechas de muestreo.

Variable	Muestreo 1		Muestreo 2	
	F	Significancia	F	Significancia
NRI	25.04	**	38.54	**
NH	1.97	NS	3.07	NS
AF	155.85	**	27.85	**
PFH	342.67	**	7.99	**
PFT	142.33	**	73.25	**

NRI = número de rizomas; NH = número de hojas; AF = área foliar; PFH = peso fresco de hoja; PFT= peso fresco de tubérculos. NS = no significativo; ** $p \leq 0.01$.

Comparación de medias de las variables de crecimiento y producción en el muestreo 1

En el primer muestreo, realizado 60 días después de la siembra, la poda de inflorescencia presentó los valores más altos con respecto al testigo. Se indican los porcentajes de ganancia para cada variable: de NRI (20.4 %), AF (3.8%), PFH (33.8) y PFT (37.1%) (Cuadro 2). Este comportamiento indica que la eliminación temprana de la inflorescencia redujo la competencia por asimilados entre órganos reproductivos y órganos de almacenamiento, favoreciendo el peso fresco de los tubérculos. Al respecto Abebe y Geleta (2025) mencionaron en un estudio sobre la respuesta del crecimiento y rendimiento de la papa a la eliminación de inflorescencias y al tamaño del tubérculo-semilla, se encontró que la interacción entre un tamaño grande de tubérculo-semilla y la eliminación de los botones florales dio lugar al mayor rendimiento total de tubérculos (34.6 t ha^{-1}). En otro estudio con

Arabidopsis, la poda de inflorescencias y ramas laterales cambió la arquitectura del tallo y aumentó el tamaño y peso de los frutos a costa de un menor número de sitios reproductivos, lo que sugiere que la redistribución de fotoasimilados desde los sumideros reproductivos hacia otros órganos puede favorecer la acumulación de reservas (Bennett, Roberts & Wagstaff, 2011).

La poda de hoja generó incrementos moderados en algunas variables de crecimiento y rendimiento en comparación con el testigo, NRI (11.9%), AF (4.8%), PFH (6.3%), PFT (7.1%). Una revisión del análisis de la importancia de la defoliación en el crecimiento, la compensación fotosintética y las relaciones fuente-sumidero, se menciona que la defoliación influye en el crecimiento, la ganancia de carbono, la removilización de nutrientes y las relaciones fuente-sumidero. La respuesta de las plantas a la defoliación depende de la especie, la posición de la hoja, el momento de la defoliación y las condiciones ambientales. El crecimiento y la capacidad fotosintética de las plantas después de la defoliación están asociados con la síntesis de auxinas, ácido abscísico y etileno. La defoliación también podría utilizarse para aumentar el crecimiento y la tasa fotosintética en plantas (Iqbal et al., 2012). En este sentido, la poda de hoja estimula la demanda por fotoasimilados para renovar el aparato fotosintético y se dinamiza la movilización de fotoasimilados a vertederos reproductivos (flores y frutos). La eliminación de hojas maduras (fuente) puede forzar la producción y translocación de fotoasimilados de las hojas presentes (Leiva-Rojas et al., 2019).

Cuadro 2. Comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0.05$) de las variables evaluadas en papa bajo tratamientos de poda en el muestreo 1.

Tratamiento	NRI	NH	AF (cm²)	PFH (g)	PFT (g)
Testigo	8.25c	9.25a	1450.0c	44.80b	106.0b
Poda de hoja	9.37b	9.50a	1523.68b	47.43b	114.18b
Poda de inflorescencia	10.37a	9.87a	1588.81a	67.68a	168.56a
DMS	0.83	0.88	21.96	2.67	11.25
CV (%)	4.55	4.70	0.73	2.53	4.39

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). DMS = Diferencia Mínima Significativa ($\alpha = 0.05$); CV = Coeficiente de variación. NRI = número de rizomas; NH = número de hojas; AF = área foliar; PFH = peso fresco de hoja; PFT= peso fresco de tubérculos.

Comparación de medias de las variables de crecimiento y producción en el muestreo 2

En el segundo muestreo, a los 90 dds, la poda de inflorescencia mantuvo su efecto positivo, registrando los valores más altos. Se indican las ganancias porcentuales de cada variable con respecto al testigo: de NRI (20.2%), AF(11.6%), PFH(9.7%) y PFT(37.9%) (Cuadro 3), los datos anteriores, confirman que la redirección de asimilados hacia los órganos subterráneos se sostuvo durante la fase de llenado de tubérculos. Los resultados de esta investigación indican que la inflorescencia actúa como un sumidero competitivo durante la fase reproductiva y que su eliminación favorece el rendimiento del cultivo (Bennett, Roberts & Wagstaff, 2011). El rendimiento de un cultivo está determinado tanto por la capacidad de la fuente para producir asimilados como por la capacidad del sumidero para acumularlos. Cuando existen sumideros competitivos, como órganos reproductivos, estos pueden limitar la cantidad de fotoasimilados que llegan a los órganos cosechados. En una investigación donde se analizaron los efectos del tamaño del tubérculo semilla y la eliminación de la inflorescencia en los componentes del rendimiento y el rendimiento de la papa, se encontró que el tamaño grande de tubérculo-semilla (46-55 mm) y la eliminación de la inflorescencia produjeron el mayor rendimiento de tubérculos comerciales (28.5 t ha^{-1}) (Abebe y Geleta, 2025).

En esta etapa, a los 90 dds el tratamiento de poda de hoja mostró valores intermedios, superiores al testigo, pero inferiores a la poda de inflorescencia. Se indican las ganancias porcentuales de cada variable con respecto al testigo: de NRI (14.4%), AF(4.6%), PFH(4.5 %) y PFT(19.6%) En un estudio donde se analizó como la eliminación del follaje se considera uno de los factores principales que afectan la calidad y el tamaño de los tubérculos, se encontró que la eliminación del follaje influye significativamente en el rendimiento de los tubérculos-semilla, en la calidad poscosecha del tubérculo de papa y en la protección de las plantas frente a enfermedades y plagas. Se determinó que el peso del tubérculo fue de 384.2 g cuando el follaje se cortó a los 65 días después de la siembra (dds), observándose un aumento significativo (533.0 g) cuando el corte se realizó a los 80 dds (Upadhyay y Bashyal, 2020).

Cuadro 3. Comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0.05$) de las variables evaluadas en papa bajo tratamientos de poda en el muestreo 2.

Tratamiento	NRI	NH	AF (cm^2)	PFH (g)	PFT (g)
Testigo	13.0b	11.0a	1562.5b	82.5b	225.0c
Poda de hoja	15.2a	11.8a	1639.4b	86.43ba	280.1b
Poda de inflorescencia	16.3a	12.3a	1768.0a	91.37a	362.6a
DMS	1.07	1.55	77.67	6.21	31.95
CV (%)	3.66	6.73	2.37	3.62	5.59

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). DMS = Diferencia Mínima Significativa ($\alpha = 0.05$); CV = Coeficiente de variación. NRI = número de rizomas; NH = número de hojas; AF = área foliar; PFH = peso fresco de hoja; PFT= peso fresco de tubérculos.

Análisis de varianza para los factores muestreo (M) y tratamiento (T) e interacción (M × T)

El análisis de varianza factorial mostró efectos altamente significativos ($p \leq 0.01$) tanto para el muestreo como para el tratamiento en todas las variables evaluadas, excepto en la interaccion M x T en la variable NH **(**Cuadro 4). La interacción significativa muestreo × tratamiento para variables clave como número de rizomas, área foliar, peso fresco de hojas y tubérculos indica que la respuesta a la poda no fue constante a lo largo del ciclo, sino que dependió de la fase de desarrollo de la planta. Esto concuerda con estudios que han mostrado que las actividades fuente y sumidero varían conforme avanza el ciclo fenológico de la papa, con una máxima actividad fuente antes de la máxima actividad del sumidero, lo que explica por qué los tratamientos pueden tener efectos distintos según el momento de evaluación (Liu et al., 2023).

Cuadro 4. Análisis de varianza para los factores muestreo (M) y tratamiento (T) e interacción (M × T)

Variable	Muestreo (M)	Tratamiento (T)	M × T
NRI	**	**	*
NH	**	*	NS
AF	**	**	*
PFH	**	**	**
PFT	**	**	**

NRI = número de rizomas; NH = número de hojas; AF = área foliar; PFH = peso fresco de hoja; PFT= peso fresco de tubérculos. NS = no significativo ($p > 0.05$); * = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$.

Correlación entre las variables morfológicas y fisiológicas y de producción de papa controlada por el efecto del tiempo de evaluación.

El análisis de correlación parcial de Pearson, controlado por el efecto del tiempo de evaluación, mostró asociaciones positivas y significativas entre las variables morfológicas y el peso fresco de los tubérculos en papa (Cuadro 5). El área foliar (AF) fue la variable que mostró la relación más fuerte con el PFT ($r = 0.95$, $p < 0.01$), este resultado indica que la capacidad fotosintética de la planta es el principal determinante de la acumulación de biomasa en los tubérculos. Un mayor desarrollo del dosel vegetal implica una mayor interceptación de radiación y producción de fotoasimilados, los cuales son translocados hacia los órganos de reserva. Asimismo, el AF se correlacionó estrechamente con el NRI ($r = 0.90$, $p < 0.01$), lo que sugiere una coordinación entre el crecimiento aéreo y subterráneo, donde una mayor área fotosintética favorece la formación y el crecimiento de rizomas (Li et al., 2016).

El número de rizomas (NRI) tambien presentó una correlación alta con el peso fresco de tubérculos (PFT) ($r = 0.88$, $p < 0.01$), lo que evidencia que la formación de tubérculos está estrechamente relacionada con el número de estructuras subterráneas activas **(**Kondhare et al., 2021). El peso fresco de hojas (PFH) se asoció significativamente con el PFT ($r = 0.66$, $p < 0.01$), lo que confirma que un mayor desarrollo vegetativo no solo incrementa la fuente de asimilados, sino que también se refleja en una mayor acumulación de biomasa en los tubérculos (Sandaña et al., 2012). En un estudio sobre la relación fuente-sumidero en la papa durante la etapa de engrosamiento del tubérculo reportó que características morfológicas vegetativas se asocian positivamente con rendimiento (Li et al., 2016), lo que respalda fisiológicamente las relaciones observadas entre área foliar, número de rizomas y peso de tubérculos Este resultado es consistente con la fisiología del cultivo de papa, ya que la producción de biomasa y el rendimiento están fuertemente regulados por la radiación interceptada por el dosel, la cual depende directamente del índice de área foliar y de la eficiencia en el uso de la radiación (Sandaña et al., 2012).

Cuadro 5. Matriz de correlación parcial de Pearson entre variables morfológicas y de producción en papa, controlada por el efecto del tiempo de evaluación.

Variable	NRI	NH	AF	PFH	PFT
NRI	1.00				
NH	0.66**	1.00			
AF	0.90**	0.72**	1.00		
PFH	0.61**	0.45*	0.67**	1.00	
PFT	0.88**	0.65**	0.95**	0.66**	1.00

Los valores representan coeficientes de correlación de Pearson. *p < 0.05, **p < 0.01. NRI = número de rizomas, NH = número de hojas, AF = área foliar, PFH = peso fresco de hojas, PFT = peso fresco de tubérculos.

Análisis de regresión entre las variables de crecimiento y producción en el muestreo 2

La Figura 2 muestra la relación entre el área foliar (AF) y el peso fresco de los tubérculos (PFT), expresada mediante una regresión lineal simple. Con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.86, el valor positivo de la pendiente indica que el peso fresco de los tubérculos aumenta conforme se incrementa el área foliar. El valor de R^2=0.86 indica que el 86 % de la variación observada en el peso fresco de los tubérculos es explicada por el área foliar. Esto sugiere que plantas con mayor área foliar tienen una mayor capacidad para interceptar radiación, producir asimilados y translocarlos hacia los órganos de almacenamiento, favoreciendo la acumulación de biomasa en los tubérculos (Sandaña et al., 2012).

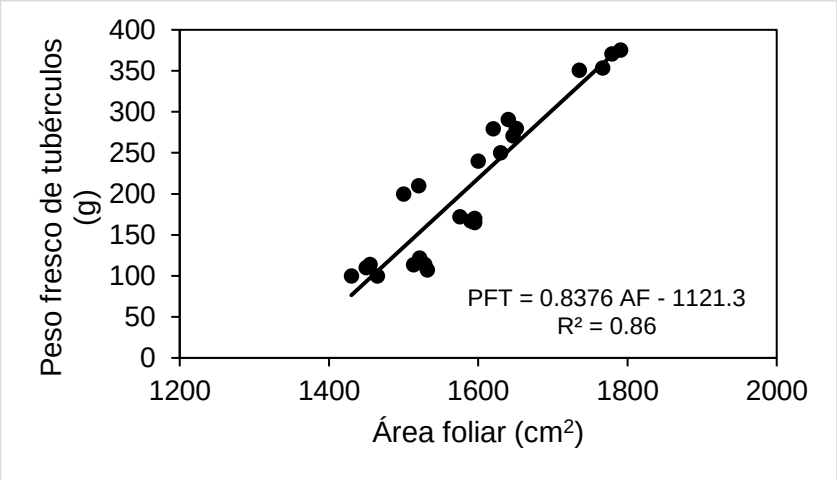


Figura 2. Correlación entre el peso fresco de los tubérculos y el área foliar

La Figura 3 muestra la relación entre el área foliar (AF) y el número de rizomas (NR) con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.77, lo que indica que el 77 % de la variación en el número de rizomas es explicada por el área foliar. Esto confirma que el crecimiento vegetativo, particularmente la expansión foliar, controla en gran medida el potencial de emisión de rizomas, los cuales posteriormente pueden diferenciarse en tubérculos (Sandaña et al., 2012).

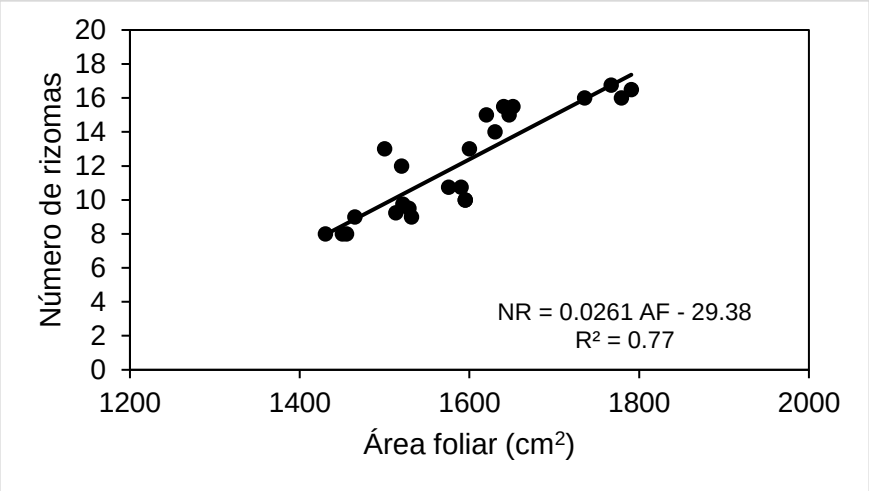


Figura 3. Correlación entre el número de rizomas y el área foliar

La Figura 4 muestra la relación entre el número de rizomas (NR) y el peso fresco de los tubérculos (PFT), descrita mediante una regresión lineal, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.94, esto indica que el 94 % de la variación en el peso fresco de los tubérculos es explicada por el número de rizomas, lo que evidencia una estrecha relación entre ambas variables. Este comportamiento es consistente con el papel fisiológico de los rizomas como estructuras precursoras de los tubérculos, ya que en ellos se originan los órganos de almacenamiento. Por lo tanto, un mayor número de rizomas implica un mayor número de sitios potenciales de tuberización y, en consecuencia, una mayor capacidad de acumulación de biomasa en los tubérculos Kondhare et al. (2021). Desde el punto de vista fisiológico, este patrón confirma que una mayor emisión de rizomas refleja una mayor disponibilidad de asimilados y una mayor dominancia de los órganos de almacenamiento, lo que se traduce en un incremento del rendimiento del cultivo Kondhare et al. (2021).

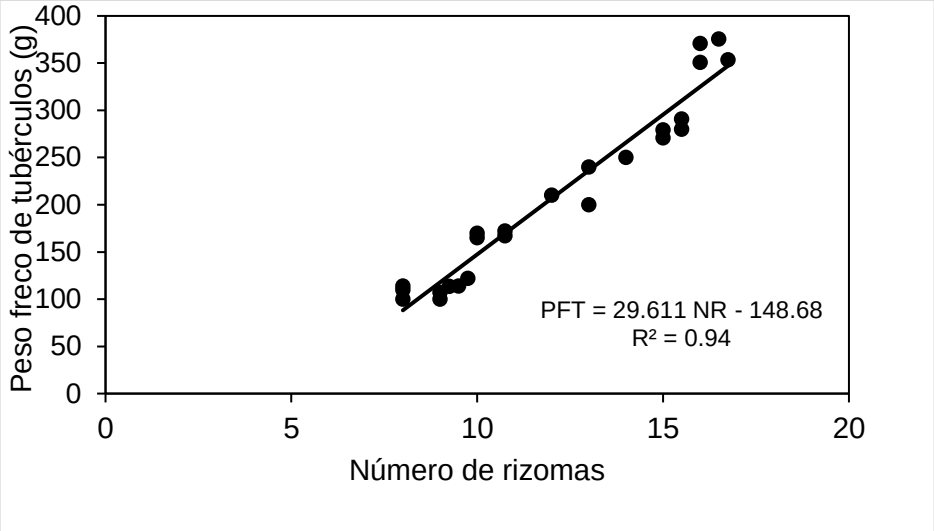


Figura 4. Correlación entre el peso fresco de los tubérculos y el número de rizomas

Conclusiones

La respuesta del cultivo a las podas varió en función de la estructura podada y del momento de aplicación. La poda de inflorescencia realizada a los 30 y 60 días después de la plantación mantuvo un efecto superior sobre las variables de crecimiento y producción, mientras que la poda de hoja mostró un impacto menor que la poda de inflorescencia, pero mayor que el del testigo. En esta investigación, en contraste, el número de hojas (NH) no presentó diferencias significativas entre tratamientos en ninguna de las fechas de evaluación. Los resultados de este estudio abren líneas de investigación futura orientadas a implementar la poda de inflorescencia como práctica agronómica en papa. Se recomienda evaluar su efecto en otras variedades comerciales, bajo diferentes regímenes hídricos y nutricionales, así como en sistemas de alta densidad de población. Dado que el estudio se limitó a una sola temporada y ubicación, se requiere más investigación para formular recomendaciones viables.

Literatura citada

Libros

García, E. (2005). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México, D. F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 90 p.

Revistas

Abebe, B. T., & Geleta, G. M. (2025). Potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield response to inflorescence removal and seed tuber size in Girar Jarso District, Central Ethiopia. *Romanian Journal of Horticulture*, *6* (125-132). doi: 10.51258/RJH.2025.11.

Asnake, D., Alemayehu, M., & Asredie, S. (2023). Growth and tuber yield responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties to seed tuber size in northwest highlands of Ethiopia. *Heliyon*, *9*(3).

Ayala-Tafoya, F., López-Oroña, C. A., Yañez-Juárez, M. G., Díaz-Valdes, T., Velazquez-Alcaraz, T. De J., y Parra-Delgado, J. M. (2019). Densidad de plantas y poda de tallos en la producción de pepino en invernadero**.** *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *10* (1), 79-90. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1211.

Bautista-Condori, F. A., Mita-Quisbert, V. F. y Mamani-Reynoso, F. F. (2018). Efecto de la decapitación floral en el rendimiento de tres variedades de papas nativas en el altiplano norte boliviano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, *5* (1), 47-58.

Bennett, E. J., Roberts, J. A., & Wagstaff, C. (2011). The role of the pod in seed development: strategies for manipulating yield. *New Phytologist*, *190*(4), 838-853. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03714.x

Burgos, A. F. L., Cortes, G. Y. B., Pérez, A. L. B., & López, H. E. B. (2021). Distribución de fotoasimilados en los órganos vertederos de plantas Solanaceas, caso tomate y papa. Una revisión. *Revista Ciencia y Agricultura*, *18*(3), 1. DOI: https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.13566.

Flores-Sánchez, D.,Sandoval-Villa, M.,Alcantar-González, E. G., Sánchez-García, P.Soto-Hernández, R. M. y Uscanga-Mortera, E.(2021). Caracteres agronómicos de dos

poblaciones de *Jaltomata procumbens* (Cav.) J. L. Gentry. *Agronomía Mesoamericana* 32(3):733-749 https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/index

Gautam, S., Scheuring, D. C., Koym, J. W., & Vales, M. I. (2024). Assessing heat tolerance in potatoes: Responses to stressful Texas field locations and controlled contrasting greenhouse conditions. Frontiers in Plant Science, 15, 1364244. doi: 10.3389/fpls.2024.1364244

Haverkort, A.J.; M. Van de Waart y K.B. A. Bodlaeader. 1990. The effect of early drought stress on numbers of tubers and stolons of potato in controlled and field conditions. *Pot.*

Iqbal, N., Masood, A., & Khan, N. A. (2012). Analyzing the significance of defoliation in growth, photosynthetic compensation and source-sink relations. *Photosynthetica*, *50*(2), 161-170.

Kondhare, K. R., Kumar, A., Patil, N. S., Malankar, N. N., Saha, K., & Banerjee, A. K. (2021). Development of aerial and belowground tubers in potato is governed by photoperiod and epigenetic mechanism. *Plant Physiology*, 187(3), 1071-1086. https://doi.org/10.1093/plphys/kiab409.

Leiva-Rojas, E. I., Gutiérrez-Brito, E. E., Pardo-Macea, C. J., & Ramírez-Pisco, R. (2019). Comportamiento vegetativo y reproductivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) por efecto de la poda. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 137-146. https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v42n2/0187-7380-rfm-42-02-137.pdf

Liu, K., Meng, M., Zhang, H., Chen, Y., Haotiano, Y., & Su, T. (2023). Quantitative analysis of source–sink relationships in two potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars under different nitrogen application rates. Agronomy, 13(4), 1083. https://doi.org/10.3390/agronomy13041083

Noda-Leyva Y., y Martín-Martín, G. J. (2016). Preliminary results of the pruning and application of FitoMas-E on the yield of *Jatropha curcas* and associated crops. *Pastos y Forrajes*, *39* (4) 229-233.

Peñaloza Monroy, J., Reyes Ramírez, A. K., González Huerta, A., Pérez López, D. D. J., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2019). Fertilización orgánica con tres niveles de gallinaza en cuatro cultivares de papa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *10*(5), 1139-1149. DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1759

Ponce Valerio, J. J., Peña-Lomeli, A., Rodríguez-Pérez, J. E., Mora-Aguilar, R., Castro-Brindis, R., & Magaña Lira, N. (2012). Densidad y poda en tres variedades de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) cultivado en invernadero. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 18(3), 325-332. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2010.08.028

Rodríguez-Pérez, L. (2010). Ecofisiología del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 4(1), 97-108.

Rozentsvet, O., Bogdanova, E., Nesterov, V., Bakunov, A., Milekhin, A., Rubtsov, S., & Dmitrieva, N. (2022). Physiological and biochemical parameters of leaves for evaluation of the potato yield. *Agriculture*, *12*(6), 757. https://doi.org/10.3390/agriculture12060757

Sandaña, P., Lizana, C. X., Pinochet, D., Santana, J., & Carrera, R. (2012). Eco-physiological determinants of tuber yield in response to potato genotype and nitrogen availability. *Field Crops Research*, *134*, 45–54. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.012

Stegner, M., Buchner, O., Schäfernolte, T., Holzinger, A., & Neuner, G. (2022). Responses to ice formation and reasons of frost injury in potato leaves. *Crops*, *2* (4), 378-389. https://doi.org/10.3390/crops2040026

Tekalign, T., & Hammes, P. S. (2005). Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth: II. Growth analysis, tuber yield and quality. *Scientia horticulturae*, *105*(1), 29-44.

Upadhyay, A., & Bashyal, S. (2020). Effects of dehaulming in potato (Solanum tuberosum) cultivation: a review. *International Journal of Environment Agriculture and Biotechnology*, *5*(4), 0994-1000.

Volkov, D., Kim, I., Gisyuk, A. A., & Klykov, A. G. (2022). Evaluating potato varieties for their suitability for processing into potato chips and french fries under the conditions of Primorsky kray. *Vegetables of Russia*, (*3*), 113-119. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-3-113-119

Zuñiga Chila, S., Morales Espinoza, C., & Estrada Martínez, M. (2017). Cultivo de la papa y sus condiciones climáticas. *Gestión Ingenio y Sociedad*, *2* (2), 140-152. Recuperado de http://gis.unicafam.edu.co/index.php/gis/article/view/60

Referencias electrónicas

Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (ASERCA). (2024). Datos abiertos ASERCA. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. http://www.agricultura.gob.mx/datos-abiertos/aserca. (Consultado el 4 de octubre del 2024).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAO. (2025). Las papas: tan familiares y tanto por descubrir sobre ellas. FAO. https://www.fao.org/publications/news-archive/detail/potatoes-so-familiar-so-much-more-to-learn/es

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADR). (2019). La papa un alimento con historia y cultura. https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/programas-sader-2019-194732. Consultado 5 de diciembre del 2024.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). https://www.gob.mx/siap. Consultado 2 de octubre del 2024.

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [SENASICA]. (2020). Plagas reglamentadas del cultivo de papa en México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.gob.mx/senasica

Statista Research Department. (2023). Food industry in Mexico: statistics and facts. https://www-statista-com. Consultado 15 de noviembre del 2023.

Software

Microsoft Corporation. (2019). Microsoft Excel (versión 1808). Microsoft Corporation.

SAS Institute (2013). SAS/STAT User's Guide, Software version 9.4. Cary, N.C., USA. 4424 p.

Influencia de los períodos de competencia de malezas sobre el contenido relativo de clorofila y el NDVI en maíz del Valle de Mexicali

Luis Santiago Valenzuela Muñoz[11], Andrés González Ruiz, Carlos Enrique Ail Catizim, Henry López López

Resumen

El cultivo de maíz (*Zea mays* L.) constituye una alternativa productiva para Mexicali; sin embargo, la competencia de malezas limita su producción cuando compiten con el cultivo. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar el impacto de los periodos de competencia de las malezas en el contenido relativo de clorofila (SPAD) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). La investigación se realizó en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas en el ciclo primavera-verano bajo un diseño de bloques completamente al azar con tratamientos a los 16, 24, 32, 40, 48 y 54 días después de la germinación con y sin arvenses, y dos testigos, con y sin manejo durante todo el ciclo del maíz con cuatro repeticiones. Se contabilizó las plantas de arvenses emergidas por metro cuadrado. Se midió el contenido relativo de clorofila con el medidor portátil SPAD y el NDVI con el GreenSeeker. Para ambas variables, se efectuó un análisis de varianza y una comparación de medias mediante Tukey ($P \leq 0.05$). El contenido de clorofila no experimento modificaciones debido a los distintos periodos de competencia de malezas. Para la evaluación del NDVI, los tratamientos que presentaron mayores valores fueron T2, T3, T4, T5, T6 y T14 ($P \leq 0.05$). Las especies predominantes de arvenses fueron *A. palmeri* y *C. murale*. El NDVI abre una posibilidad de utilizarse como una herramienta para el monitoreo de competencia entre el maíz y las arvenses. Estudios futuros deberán validar su desempeño bajo diferentes sistemas de producción, especies de arvenses y condiciones ambientales.

Palabras claves: GreenSeeker, agricultura de precisión, interferencia de malezas, *Amaranthus palmeri* S. swat, *Chenopodium murale* L.

Abstract

[11] Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, Carretera a Delta s/n, C.P. 21705, Ejido Nuevo León, Baja California, México. santiago.valenzuela@uabc.edu.mx; andres.gonzalez18@uabc.edu.mx; carlos.ail@uabc.edu.mx; henry.lopez.lopez@uabc.edu.mx

Corn (*Zea mays* L.) cultivation is a productive alternative for Mexicali; however, weed competition limits its yield. Therefore, the objective was to evaluate the impact of weed competition periods on relative chlorophyll content (SPAD) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The research was conducted at the experimental field of the Institute of Agricultural Sciences during the spring-summer growing season using a completely randomized block design with treatments at 16, 24, 32, 40, 48, and 54 days after germination, with and without weeds, and two controls, with and without weed management throughout the corn growing season, with four replicates. Emerged weed plants per square meter were counted. Relative chlorophyll content was measured using a portable SPAD meter, and NDVI was measured using a GreenSeeker. For both variables, an analysis of variance and a Tukey's test for mean comparison were performed ($P \leq 0.05$). Chlorophyll content did not change due to the different weed competition periods. For the NDVI evaluation, the treatments with the highest values were T2, T3, T4, T5, T6, and T14 ($P \leq 0.05$). The predominant weed species were *A. palmeri* and *C. murale*. NDVI suggests the possibility of using it as a tool for monitoring competition between corn and weeds. Future studies should validate its performance under different production systems, weed species, and environmental conditions.

Key words: GreenSeeker, Precision agriculture, weed interference, *Amaranthus palmeri* S. swat, *Chenopodium murale* L

Introducción

El cultivo de maíz (*Zea mays* L.) representa una alternativa productiva importante para la región de Mexicali, Baja California, donde durante los ciclos otoño-invierno y primavera-verano de 2025 se establecieron 1,515 ha con un rendimiento promedio de 11.7 t ha^{-1} (SIAP, 2025). El cultivo está expuesto a diversos factores bióticos que limitan su productividad, entre ellos la competencia con malezas, considerada una de las principales causas de pérdidas en el rendimiento (Barros et al., 2017). En la región predominan especies de hoja ancha como *Amaranthus palmeri* S. Wats., *Chenopodium album* L., *Chenopodium murale* L., *Atriplex halimus* L., *Sisymbrium irio* L., *Sonchus oleraceus* L. y *Convolvulus arvensis* L.; además de gramíneas como *Cynodon dactylon* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv. y *Sorghum halepense* (L.) Pers., así como ciperáceas como *Cyperus rotundus* L. y *Cyperus esculentus* L., las cuales predominan durante primavera y verano. (Ávilas et al., 2014).

Las malezas reducen significativamente el rendimiento del maíz al competir por recursos esenciales como luz, agua, nutrientes y espacio. Alteración en estas respuestas fisiológicas

pueden traducirse en disminuciones importantes del rendimiento, lo que resalta la importancia de mantener el cultivo libre de malezas durante el período crítico de competencia (Horvath et al., 2023; Menalled et al., 2024). Adamič Zamljen y Leskovšek (2023) indican que el maíz presenta su mayor susceptibilidad a la interferencia de malezas durante las primeras etapas de desarrollo.

En los últimos años, el empleo de herramientas de agricultura de precisión ha permitido evaluar de manera rápida y no destructiva el estado fisiológico y nutricional de los cultivos. Entre ellas, el medidor de verdor de plantas en unidades SPAD, constituye una alternativa para estimar el contenido relativo de clorofila y detectar alteraciones ocasionadas por la competencia de malezas en etapas tempranas del cultivo (Shah et al., 2017). Por otro lado, el sensor óptico GreenSeeker permite estimar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), ampliamente utilizado para evaluar el vigor vegetativo y la respuesta espectral de los cultivos. Al respecto, Gutiérrez-Soto et al. (2011) señalaron que este sensor constituye una herramienta útil para evaluar el comportamiento de la vegetación y determinar cómo las infestaciones de malezas afectan los valores de reflectancia en el cultivo de maíz. En otra investigación realizada por Lou et al. (2023) al utilizar el GreenSeeker, demostraron que la presencia de malezas modifica significativamente la reflectancia del dosel y los índices de vegetación, permitiendo detectar el estrés ocasionado por la competencia.

A pesar de estos avances, en el Valle de Mexicali son limitados los estudios que evalúen el efecto de los períodos de competencia de malezas sobre el estado fisiológico y nutricional del cultivo de maíz mediante el uso de sensores ópticos como el clorofilómetro SPAD y el sensor GreenSeeker. A partir de lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de los períodos de competencia de malezas sobre el contenido relativo de clorofila (SPAD) y el NDVI en el cultivo de maíz.

Materiales y métodos

Se realizó una investigación en los campos experimentales del Instituto de Ciencias Agrícolas en el ciclo primavera-verano en marzo de 2025. Para esto se estableció un experimento bajo un diseño de bloques completamente al azar con 14 tratamientos propuestos por Blanco et al., (2014) y cuatro repeticiones (Cuadro 1).

Cuatro 1. Tratamientos para evaluar la competencia de maleza en maíz

Tratamiento	Descripción
T1	16 días con arvenses y después sin arvenses (CA 16)
T2	24 días con arvenses y después sin arvenses (CA 24)
T3	32 días con arvenses y después sin arvenses (CA 32)

T4	40 días con arvenses y después sin arvenses (CA 40)
T5	48 días con arvenses y después sin arvenses (CA 48)
T6	54 días con arvenses y después sin arvenses (CA 54)
T7	Sin arvenses todo el ciclo (SA TC)
T8	16 días sin arvenses y después con arvenses (SA16)
T9	24 días sin arvenses y después con arvenses (SA24)
T10	32 días sin arvenses y después con arvenses (SA32)
T11	40 días sin arvenses y después con arvenses (SA40)
T12	48 días sin arvenses y después con arvenses (SA48)
T13	54 días sin arvenses y después con arvenses (SA54)
T14	Con arvenses todo el ciclo (CATC)

Fuente: elaboración propia.

La superficie experimental fue de 1200 m^2 y la unidad experimental fue una parcela de tres surcos a un metro de separación y 9.27 m de largo (27.81 m^2). La textura de la parcela experimental fue tipo franco arcilloso. El híbrido simple de maíz blanco utilizado fue A7573 (Asgrow) con una densidad de cuatro plantas por metro lineal. Se utilizo sistema de riego por goteo y se fertilizo de acuerdo con lo recomendaciones de Bahena, (2017). Para el control de insectos plaga se realizaron tres aplicaciones de los insecticidas dimetoato, bifentrina y z-cipermetrina, según la dosis comercial recomendada por el fabricante, con una pulverizadora manual para el control de *Epitrix cucumeris* Para el manejo de gusano cogollero *Spodoptera frugiperda*, se utilizó feromonas (Pherocom®) distribuidas en los cuatro puntos cardinales. El control de maleza se realizó de forma manual.

Conteo de malezas

Se contabilizaron el número de plantas de malezas emergidas por metro cuadrado mediante el uso de un marco de pvc de 0.25 m x 1 m, el cual se lanzó de forma aleatoria en cuatro puntos de muestreo en el centro de la unidad experimental para determinar la densidad de especies de maleza en los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6 y T14 (BurriL *et al*., 1977). Se muestreo cada tratamiento cuando finalizó el periodo de competencia de arvenses descrito en el cuadro 1.

Período de competencia de malezas

Se midió el índice de verdor a través del contenido relativo de clorofila con el medidor portátil SPAD (Konica Minolta) al azar al finalizar cada tratamiento mediante la toma de lecturas en la segunda hoja verdadera a partir del meristemo apical de diez plantas. Para el Índice de

Vegetación Normalizada (NDVI) se utilizó el GreeSeeker (PTx Trimble), se efectúo la medición a 50 centímetros del dosel del cultivo de maíz y se recorrió tres metros en el centro de la unidad experimental en dos puntos sitios de muestreo al finalizar cada tratamiento.

Análisis estadístico

La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro–Wilk ($P > 0.05$), mientras que la homogeneidad de varianzas se verificó con la prueba de Levene ($P > 0.05$). Una vez comprobado el cumplimiento de estos supuestos, las variables NDVI y contenido relativo de clorofila se analizaron mediante un análisis de varianza para un diseño de bloques completos al azar. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SAS versión 9.0 (SAS 2002).

Resultados y discusión

Abundancia de especies de maleza en el cultivo de maíz

La mayor densidad correspondió a *A. palmeri* (Cuadro 2), siendo el tratamiento T5 el que presentó la mayor infestación, mientras que T1 registró la menor densidad. Por su parte, *C. murale***,** T1 tuvo la mayor densidad y T5 con la menor. Las especies *M. leprosa*, *E. colona* y *S. oleraceus* presentaron densidades considerablemente menores. *M. leprosa* se registró únicamente en los tratamientos T1, T4 y T14, con una densidad máxima de 3.75 plantas m^{-2} en T4**.** En el caso de *E. colona*, las densidades oscilaron entre 0.50 y 11.25 plantas m^{-2}**,** alcanzando su mayor valor en T3**.** Finalmente, *S. oleraceus* estuvo ausente en varios tratamientos y su densidad máxima fue en T14.

Cuadro.2. Densidad de especies de malezas en el cultivo de maíz en el valle de Mexicali, Baja California.

Tratamiento	*Amaranthus palmeri* S.Wats m^{-2}	*Chenopodium murale* L m^{-2}	*Malvella leprosa* (Ortega) Krapov m^{-2}	*Echinochloa* colonum (L.) Link m^{-2}	Sonchus oleraceus L m^{-2}
T1	139.50	201.00	0.75	2.75	0.00
T2	179.25	111.75	0.00	2.25	1.50
T3	141.75	156.25	0.00	11.25	0.00
T4	176.00	152.75	3.75	0.50	0.00
T5	311.00	67.67	0.00	3.50	4.00
T6	172.50	114.00	0.00	2.50	1.00

T14	155.75	107.50	1.50	6.75	11.00

T1=16 días con arvenses y después sin arvenses, T2=24 días con arvenses y después sin arvenses, T3=32 días con arvenses y después sin arvenses, T4=40 días con arvenses y después sin arvenses, T5=48 días con arvenses y después sin arvenses, T6=54 días con arvenses y después sin arvenses y T14= Con arvenses todo el ciclo.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados evidencian que la comunidad de malezas estuvo constituida principalmente por dos especies dominantes (*A. palmeri* y *C. murale*), mientras que las demás especies presentaron una baja representación dentro de la población total. La mayor abundancia de *A. palmeri* puede atribuirse a su elevada capacidad adaptativa, rápido crecimiento, alta producción de semillas, emergencia escalonada y características que favorecen su establecimiento y dominancia en sistemas agrícolas de maíz (Salas et al., 2018). Por su parte, *C. murale* presenta características biológicas únicas, que incluyen una alta capacidad reproductiva, latencia de las semillas, alta persistencia en el banco de semillas del suelo, la capacidad de germinar y crecer bajo una amplia gama de condiciones ambientales y tolerancia al estrés abiótico, por lo que ayuda a esta especie a infestar diversos sistemas de cultivo por mucho tiempo (Bajwa et al., 2019). Estas especies de arvenses antes mencionadas ya habían sido reportadas por González et al., (2022) en un estudio de efectividad biológica de herbicidas preemergentes en el cultivo de maíz en el valle de Mexicali Baja california como especies importantes. Por otro lado, estudios realizados por Barrera et al., (2025) reportan *A. palmeri* y *C. murale* como principales especies arvenses en un estudio de efectividad de los herbicidas pentoxamida y piroxasulfone+ flutiacet metil en maíz.

Efecto de los periodos de competencia de maleza en el contenido de clorofila y el índice de vegetación normalizada (NDVI).

En el cuadro 3, se observa que no presentaron diferencia estadística significativa en los 14 tratamientos, por lo que no fue afectado el contenido relativo de clorofila. Para el NDVI los tratamientos que presentaron mayores valores fueron T2, T3, T4, T5, T6 y T14. El tratamiento sin arvenses todo el ciclo registró valores similares a los tratamientos antes descritos.

Cuadro 3. Periodos de competencia de maleza sobre el contenido de clorofila y el índice de vegetación normalizada en el cultivo de maíz en el valle de Mexicali B.C.

Tratamiento	SPAD	NDVI
T1	40.02±0.28a	0.45±0.01cde
T2	40.49±0.70a	0.67±0.03ab
T3	35.39±2.68a	0.68±0.03a

T4	37.49±1.66a	0.65±0.02abc
T5	38.06±2.06a	0.63±0.03abcd
T6	34.19±3.49a	0.64±0.04abcd
T7	35.45±2.85a	0.61±0.05abcd
T8	41.49±0.47a	0.36±0.03e
T9	40.29±0.70a	0.40±0.03e
T10	35.99±1.93a	0.51±0.04abcde
T11	36.84±3.33a	0.43±0.08de
T12	38.42±1.52a	0.49±0.07abcde
T13	40.88±0.67a	0.47±b0.09cde
T14	34.62±2.29a	0.64±0.05abc

T1=16 días con arvenses y después sin arvenses, T2=24 días con arvenses y después sin arvenses, T3=32 días con arvenses y después sin arvenses, T4=40 días con arvenses y después sin arvenses, T5=48 días con arvenses y después sin arvenses, T6=54 días con arvenses y después sin arvenses , T7=Sin arvenses todo el ciclo , T8=16 días sin arvenses y después con arvenses, T9=24 días sin arvenses y después con arvenses, T10= 32 días sin arvenses y después con arvenses, T11= 40 días sin arvenses y después con arvenses, T12=48 días sin arvenses y después con arvenses, T13=54 días sin arvenses y después con arvenses y T14= Con arvenses todo el ciclo.

Fuente: elaboración propia.

El contenido relativo de clorofila no fue afectado por los diferentes tratamientos de competencia de arvenses en el cultivo de maíz. Esto probablemente pudo estar influenciado por las densidades bajas de las especies de arvenses *A. palmeri* y *C. murale*. Esto coincide con los estudios descritos por Massinga et al. (2003) quienes demostraron que las densidades bajas de *A. palmeri* no modificaron significativamente la intercepción total de luz del maíz, por lo que el cultivo mantuvo una disponibilidad adecuada de radiación para la fotosíntesis. Esto sugiere que, bajo una presión competitiva baja, es poco probable que ocurra una reducción del contenido de clorofila. Por otro lado, Simkó y Veres (2019) demostraron que el contenido de clorofila (SPAD) del maíz está estrechamente relacionado con su estado nutricional, especialmente con la disponibilidad de nitrógeno. Si la competencia de las malezas es insuficiente para reducir la disponibilidad de este nutriente, los valores de SPAD tienden a mantenerse sin cambios.

En cuanto a los valores de NDVI fueron afectados por competencia de arvenses. Esto se debe probablemente al incremento de la cobertura vegetal, por lo que el dispositivo GreeSeeker se saturo y emitió lecturas altas en los periodos donde permaneció por más tiempo la convivencia de arvenses y cultivo (Thomasi et al., 2021). Por otra parte, la competencia inicial de arvenses modifica la calidad de luz, la arquitectura del dosel, la intercepción de la radiación, por lo esto afecta los índices espectrales como el NDVI (Rajcan y Swanton, 2001).

Por el caso contrario el tratamiento sin arvenses todo el ciclo registró valores altos a los tratamientos donde el GreenSeeker se saturo, esto probablemente pudo deberse a la etapa fenológica del maíz, ya que el cultivo de maíz se encontraba en activo crecimiento (V10-VT) con bastante biomasa vegetal antes de la aparición de espigas. Esto coincide con lo reportado por Martín, (2005) quien mostró que el NDVI medido con GreenSeeker aumenta con la progresión de las etapas de crecimiento vegetativo hasta V10, donde se encontró una meseta, seguida de una disminución en el NDVI después de la etapa de crecimiento VT. Sin embargo, este dispositivo podría representar una herramienta útil para la evaluación de la competencia de maleza y cultivos con ciertas limitaciones.

Conclusiones

Las especies de malezas predominantes en la producción de maíz fueron *Amaranthus palmeri* S. Wats. y *Chenopodium murale* L., las cuales constituyeron la mayor proporción de la comunidad de malezas durante el ciclo de evaluación. Las diversas etapas de interferencia de malezas no alteraron de manera significativa el contenido relativo de clorofila, lo que señaló que esta variable fisiológica mostró una respuesta estable bajo las condiciones experimentales evaluadas. En contraposición, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) respondió a los períodos de interferencia, documentando valores superiores cuando la presencia de malezas se extendió por un período más extenso, debido al aumento de la biomasa y la cobertura vegetal detectada por el sensor óptico.

Los hallazgos obtenidos indicaron que el NDVI demostró ser un indicador más sensible que el contenido relativo de clorofila para detectar alteraciones relacionadas con la interferencia de malezas en el cultivo de maíz. Esto evidencia su potencial como instrumento de apoyo para la supervisión del cultivo en programas de agricultura de precisión y manejo integrado de malezas. Se sugiere examinar la conducta de otros índices espectrales menos susceptibles a la saturación del dosel, además de incorporar plataformas de percepción remota basadas en vehículos aéreos no tripulados o imágenes satelitales.

Literatura citada

Adamič Zamljen, S., & Leskovšek, R. (2023). Critical period of weed control in maize as influenced by soil tillage practices and glyphosate application. Agronomy, 14(1), 93. https://doi.org/10.3390/agronomy14010093

Ávila, C. E; Alvarado, P. J. I; Camarillo, P. M; y Morales, M. A. (2014). Guía para producir maíz para grano en el Valle de Mexicali, B. C. y San Luis Río Colorado, Son. ISBN: 978-607-37-0377-2. Edición #1. p.20. Disponible en: https://isbnmexico.indautor.cerlalc.org/catalogo.php?mode=detalle&nt=160482

Burril, L. C., Cárdenas, J., & Locatelli, E. (1977). Manual de campo para investigación en control de malezas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Bajwa, A. A., Zulfiqar, U., Sadia, S., Bhowmik, P., & Chauhan, B. S. (2019). A global perspective on the biology, impact and management of *Chenopodium album* and *Chenopodium murale*: two troublesome agricultural and environmental weeds. Environmental Science and Pollution Research, 26(6), 5357-5371. https://doi.org/10.1007/s11356-018-04104-y

Barros, R. E., Faria, R. M., Tuffi Santos, L. D., Azevedo, A. M., & Governici, J. L. (2017). Physiological response of maize and weeds in coexistence. *Planta Daninha*, *35*, e017158134. 10.1590/s0100-83582017350100027

Blanco Valdés, Y., Leyva Galán, Á., & Castro Lizazo, I. (2014). Determinación del período crítico de competencia de arvenses en el cultivo del maíz (Zea mays, L.). *Cultivos Tropicales*, *35*(3), 62-69.

Bahena-Delgado, G. (2017). Niveles de fertilización y eficiencia de agua en la producción de maíz elotero (*Zea mays* L.). Agro Productividad, 10(3). Disponible en: https://www.revistaagroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/960

Barrera-Aguirre, A. J., González-Ruiz, A., & Ail-Catzim, C. E. (2025). Efectividad biológica de pentoxamida y piroxasulfune+ flutiacet metil en el control preemergente de malezas en maíz. Avances en Investigación Agropecuaria, 29 (Especial), ágs-59. Disponible en: https://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/agropecuaria/article/view/2490

González, R.A., López, U. G. A., Ail, C.C. E., Cruz, H.H.E, López, O. C. A., & Medina, L.R. (2022). EFECTIVIDAD BIOLOGICA DE ASGARD 600 CE (PETOXAMIDA), ANTHEM

MAX (PIROXASULFONE+ FLUTIACET METIL) Y SUS MEZCLAS EN EL CONTROL PREEMERGENTE DE MALEZAS EN EL CULTIVO DE MAÍZ EN EL VALLE DE MEXICALI. SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DE LA MALEZA, 95, 59. Disponible en:https://somecima.com/wpcontent/uploads/2022/11/Memoria_SOMECIMA_2022.pdf#page=59

Horvath, D. P., Clay, S. A., Swanton, C. J., Anderson, J. V., & Chao, W. S. (2023). Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges. Trends in Plant Science, 28(5), 567-582. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.12.014

Lou, Z., Quan, L., Lv, X., Sun, D., Xia, F., Li, H., & Sun, W. (2023). Multimodal remote sensing application for weed competition time series analysis in maize farmland ecosystems. Journal of Environmental Management, 344, *118376*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118376

Menalled, U. D., Bybee-Finley, K. A., Smith, R. G., DiTommaso, A., Darby, H. M., Pethybridge, S. J., & Ryan, M. R. (2024). Legacy effects of crop diversity on weed-crop competition in maize production. npj Sustainable Agriculture, 2, 28. https://doi.org/10.1038/s44264-024-00036-y

Martin, K. L. (2005). Expression of spatial variability in corn (Zea mays L.) as influenced by growth stage using optical sensor measurements. Oklahoma State University. Disponible en: https://www.nue.okstate.edu/Index_Publications/Kent_Spatial_Variability_Corn.htm?utm_source=chatgpt.com

Massinga, R. A., Currie, R. S., & Trooien, T. P. (2003). Water use and light interception under Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) and corn competition. *Weed Science*, *51*(4), 523-531. DOI: http://dx.doi.org/10.1614/0043-1745(2003)051 [0523: WUALIU]2.0.CO;2

Rajcan, I., & Swanton, C. J. (2001). Understanding maize–weed competition: resource competition, light quality and the whole plant. Field crops research, 71(2), 139-150. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00159-9

SIAP. (2025). Sistema de información agropecuaria. Consultado el día 19 de junio de 2026. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/agroprograma/

Simkó, A., & Veres, S. (2019). Evaluation of the correlation between SPAD readings and absolute chlorophyll content of maize under different nitrogen supply conditions. *Acta Agraria Debreceniensis*, (2), 121-126. DOI:10.34101/actaagrar/2/3689

Salas-Perez, R. A., Saski, C. A., Noorai, R. E., Srivastava, S. K., Lawton-Rauh, A. L., Nichols, R. L., & Roma-Burgos, N. (2018). RNA-Seq transcriptome analysis of *Amaranthus palmeri* with differential tolerance to glufosinate herbicide. PLoS One, 13(4), e0195488. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195488

Thomasi, R. M., Lúcio, A. D., Amado, T. J., Pott, L. P., Zanon Junior, A., Werle, I. S., & Ulguim A. R. (2021). Relationship of vegetation indices with herbicide phytotoxicity in winter cereals. Advances in Weed Science, 39, Article e02100050. https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2021;39:00017

La agricultura protegida mexicana en el contexto actual: cultivos, estructuras y tendencias

Aurelio Bastida Tapia[12]

Resumen

El crecimiento de la agricultura protegida en México ha sido exponencial. En 1970 existían 100 hectáreas de invernaderos. En las últimas décadas se experimentó un crecimiento de 1,550 hectáreas anuales. Para el 2022, la agricultura ocupaba 23,014,446.27 hectáreas; 22,937,029.20 a cielo abierto y 77,417 en agricultura protegida, 0.34% de la superficie agrícola. El cultivo protegido se realizaba en 10,724 unidades de producción, más del 75% eran de 0.1 a 5 hectáreas. Siendo los principales cultivos; jitomate, pepino, chiles, fresa, arándano, zarzamora y manzana. El Occidente concentraba el 48.9%, el Noroeste otro 29.9%, al Centro le correspondía el 14.51%, con 4.61% el Noroeste y en el Sur Sureste el 2.43% restante. En los últimos dos años se reportaron 57,586.51 hectáreas con invernaderos, 22,497.83 en mallas sombra y 19,758.78 en túneles altos, con un total de 99,843 hectáreas de agricultura protegida, de ellas 976.68 hectáreas en agricultura orgánica. Con el crecimiento anual experimentado por el sector, actualmente se estiman unas 100 mil hectáreas protegidas. Más del 82 % de tomate, pepino y pimiento se exportan, el 96 % a Estados Unidos y Canadá. Así mismo más del 90% de las berries se exportan a más de 38 países, Estados Unidos es el principal mercado seguido de Canadá, Japón, Países Bajos, Reino Unido y otras naciones. Así el principal motor del desarrollo de este sector es la exportación de productos agrícolas que se realiza en unidades empresariales grandes, utilizando técnicas y estructuras de la agricultura protegida para obtener altos rendimiento y productos de alta calidad.

Abstract

The growth of controlled environment agriculture in Mexico has been exponential. In 1970, there were 100 hectares of greenhouses; in recent decades, the sector has experienced growth of 1,550 hectares annually. By 2022, agricultural land use was 23,014,446.27 hectares: 22,937,029.20 hectares were open field, and 77,417 hectares were under protected agriculture (representing 0.34% of the total agricultural area). Protected agriculture operations were

[12] Profesor investigador. Departamento de Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Correo; abastidat@chapingo.mx

distributed across 10,724 production units, with more than 75% ranging from 0.1 to 5 hectares in size. Key crops included tomatoes, cucumbers, chili peppers, strawberries, blueberries, blackberries, and apples. Geographically, the Western region accounted for 48.9% of this activity, the Northwest for 29.9%, the Central region for 14.51%, the Northeast for 4.61%, and the South-Southeast for the remaining 2.43%. On the last couple of years, reports indicate a total of 99,843 hectares dedicated to protected agriculture, comprising 57,586.51 hectares of greenhouses, 22,497.83 hectares of shade houses, and 19,758.78 hectares of high tunnels; of this total, 976.68 hectares are dedicated to organic production. Given the sector's annual growth, current estimates place the total protected area at approximately 100,000 hectares. More than 82% of tomatoes, cucumbers, and peppers are exported, with 96% of these shipments going to the United States and Canada. Similarly, over 90% of berries are exported to more than 38 countries; the United States is the primary market, followed by Canada, Japan, the Netherlands, the United Kingdom, and other nations. Thus, the primary driver of this sector's development is the export of agricultural products, carried out by large-scale business units employing protected agriculture techniques and structures, to achieve high yields and high quality produce.

Palabras clave: Agricultura protegida mexicana, cultivos protegidos, invernaderos, estructuras de protección.

Key words: Mexican protected agriculture, protected crops, greenhouses, protective structures.

Introducción

En 1970 en México existían unas 100 hectáreas de agricultura protegida, hoy las estadísticas más optimistas indican que existen cerca de cien mil hectáreas, con un crecimiento promedio de entre 700 a 1500 hectáreas anuales. debido a la amplia diversidad climática de nuestro país que permite la producción de hortalizas, frutales y ornamentales todo el año, situación que permite la exportación de estos productos a los países desarrollados. Sin embargo, también enfrenta amenazas como el cierre de la frontera del norte debido a problemas derivados de las difíciles relaciones entre México y Estados Unidos, ya que este país es destino de más del 70% de la producción de la agricultura protegida. En este trabajo se hace un recuento de lo más relevante de la agricultura protegida mexicana hasta la actualidad y se exploran algunas ideas de cómo se vislumbra el futuro de esta actividad.

Materiales y métodos

Para este trabajo se utilizó el método de investigación documental, el cual consiste en la búsqueda, sistematización e interpretación de los datos obtenidos (Vargas, 2022 y 2023). Con información que procede de fuentes oficiales del Censo Agropecuario 2022 del INEGI, de la SADER, el SIAP y el Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de la DGSIAP, 2024, además de otras fuentes. El enfoque para el análisis es cuantitativo en base a los datos de las fuentes consultadas.

Resultados y discusión

Los referentes de la agricultura protegida mexicana indican que en los años setenta del siglo pasado se tenían registradas unas 100 hectáreas de invernaderos. Para los años noventa, inició un crecimiento sostenido, con unas 790 hectáreas registrada a finales del siglo pasado, desarrollo que se consolido en la primera década de este siglo y posteriormente se experimentaron crecimientos promedios de 700 a 1500 hectáreas anuales. Para el inicio de la presente década ya se contaba con cerca de 50 mil hectáreas de diferentes tecnologías y estructuras (Bastida, 2024).

La agricultura protegida mexicana, su desarrollo y evolución reciente

El Censo Agropecuario 2022 del INEGI, reporto 4.6 millones de unidades productivas (UP), de ellas el 56% eran pequeños productores, con menos de dos hectáreas. En el sector primario trabajaban más de 26.9 millones de personas; el 84% hombres y el 16% mujeres (INEGI, 2023a). Se censaron 10,724 unidades de producción en agricultura protegida, una tercera parte de las que existían, que represento solo el 0.23% del total de las UP. Se cubrieron más de 102 millones de hectáreas con uso agropecuario o forestal: La agricultura se realizó en 23,014,446.27 hectáreas, de ellas 22,937,029.20 estaban a cielo abierto y 77,417.07 en algún tipo de agricultura protegida, que representan el 0.34% del total (INEGI, 2023a; Piña, 2024).

Para el año 2024, la SADER indican que la superficie de agricultura protegida en México era de 86,777 hectáreas con diferentes tipos de cubiertas (SIAP/SADER, 2024). Ese mismo año la DGSIAP, reporto 57,586.51 hectáreas con invernaderos, 22,497.83 en mallas sombra y 19,758.78 en túneles altos, con un total de 99,843 hectáreas de agricultura protegida, de ellas 976.68 hectáreas en agricultura orgánica (DGSIAP;2024). Con el crecimiento anual

experimentado en años anteriores para el sector, actualmente se estiman unas 100 mil hectáreas protegidas en la agricultura mexicana.

Las principales tecnologías son invernaderos, casas sombra, túneles altos y bajos y viveros, con sistemas de riego por goteo o microaspersión, en fertirriego e hidroponía con sustratos, con o sin acolchados. El nivel tecnológico de los invernaderos varía desde rústicos hasta completamente automatizados con sistemas computacionales para controlar temperatura, humedad ambiental, apertura y cierre de ventilas y sistemas de riego. Las otras estructuras son de niveles tecnológicos medios y rústicos o básicos (Bastida, 2022). El tipo de instalaciones, por superficie, fue: invernadero (54.5 %), micro túnel (36.8 %), macro túnel (6.1 %), vivero (0.7 %), casa sombra (0.4 %), malla sombra (0.3 %), techo sombra (0.1 %), pabellón (0.1 %) y otros tipos de estructuras (0.4%) (INEGI, 2023a).

Las estructuras, los cultivos y su ubicación por entidades

Por agricultura protegida el INEGI (2023ª), considera los cultivos que se realizan bajo invernaderos, macro túneles, micro túneles, casas sombra, mallas sombra, techos sombra, viveros y pabellones. Estructuras a las que se agregan las mallas antigranizo para proteger frutales como la manzana y el durazno, a las que el INEGI (s/f) les llaman mallas sombra. En este trabajo no se incluyen los acolchados, el fertirriego y la hidroponía, que son técnicas de la agricultura protegida, solo se incluyen técnicas o estructuras que cubren completamente a los cultivos. Los datos, por estados, para cada tipo de estructura (INEGI, 2023b), se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Agricultura protegida por estados año 2022

Entidad	Unidades producción	Superficie (ha)	Distribución por tipo de estructura en porcentaje (%)								
			Invernaderos	Mallas sombra	Viveros	Macro túnel	Casa sombra	Micro túnel	Pabellón	Techo sombra	Otro
Aguascalientes	83	525	31.3	37.6	1.5	20.7	0.6	1.7	sd	0.1	1.5
Baja California	201	5680	14.0	44.0	0.1	44.3	03	3.1	sd	sd	sd
B. C. Sur	59	2650	47.9	54.5	0.1	0.1	4.2	sd	sd	sd	sd
Campeche	128	84	5.1	31.7	40.8	29.7	6.3	1.2	1.2	0.6	10.5
Chihuahua	432	9950	1.6	77.5	0.8	sd	0.6	0.2	1.3	4.3	15.6
Chiapas	1611	1702	21.3	36.7	23.8	0.1	11.8	0.1	11.1	0.3	16.5
Coahuila	129	1656	24.1	59.1	1.2	0.2	1.7	7.8	0.5	sd	5.6
C. México	1083	240	57.4	33.0	3.9	1.0	0.7	13.4	1.0	0.8	2.9
Colima	130	334	33.5	46.2	14.9	2.5	3.1	sd	5.4	sd	0.4
Durango	128	389	36.4	39.7	18.5	0.1	10.7	sd	0.4	0.3	0.5
Guanajuato	444	3897	54.2	2.0	1.7	26.1	0.0	8.4	0.1	0.0	9.3
Guerrero	0	0	0	0	0	0	00	0	0	0	0

Hidalgo	1981	976	86.6	1.8	4.2	0.6	0.1	3.1	0.04	0.5	0.6
Jalisco	655	7102	34.9	1.8	1.1	48.3	0.3	5.3	0.3	1.6	1.3
México	10724	6406	54.5	0.3	0.7	6.1	0.4	36.8	0.1	0.1	0.4
Michoacán	1434	9993	13.9	1.7	4.5	77.0	0.1	2.5	0.0	1.2	0.4
Morelos	sd	794	70.4	11.7	35.8	1.1	0.8	0.6	sd	0.1	0.3
Nayarit	72	472	15.4	15.9	2.1	1.2	0.2	0.2	sd	8.5	1.0
Nuevo León	50	246	64.1	20.2	5.4	sd	4.9	sd	sd	0.8	0.8
Oaxaca	1829	710	75.9	8.9	7.4	2.9	2.3	1.5	0.5	0.3	1.6
Puebla	3828	2830	57.0	26.9	5.2	3.9	1.1	4.3	0.1	0.2	0.5
Querétaro	384	1346	60.2	0.1	0.9	8.8	sd	0.6	sd	sd	0.2
Quintana Roo	22	14	23.7	15.8	38.6	sd	sd	sd	sd	2.8	36.5
S. Luis Potosí	400	1831	43.8	31.4	5.7	0.4	22.1	0.2	sd	0.2	0.4
Sinaloa	197	10339	18.2	39.4	sd	sd	43.2	sd	sd	sd	0.4
Sonora	109	4115	13.0	17.1	sd	sd	58	sd	sd	sd	0.2
Tabasco	55	102	73.3	11.4	19.8	sd	3.0	sd	sd	1.7	0.5
Tamaulipas	17	126	58.3	6.8	5.2	sd	sd	sd	sd	5.1	sd
Tlaxcala	452	238	71.4	9.8	4.3	3.2	0.1	sd	sd	sd	0.8
Veracruz	1129	726	13.9	47.0	sd	0.6	1.2	1.2	4.8	1.9	sd
Yucatán	327	308	7.5	54.8	sd	7.10	19.8	8.4	sd	8.1	sd
Zacatecas	211	975	36.2	32.0	0.6	3.0	4.1	1.2	sd	0.7	14.0
Totales	28,304	76,756	39.28	26.34	9.21	12.04	7.57	4.63	1.68	1.83	4.71

Fuente: INEGI, 2023b. Resultados definitivos del Censo Agropecuario 2022 por estados.

Nota: Para es estado de Guerrero no se presentan datos de la agricultura protegida, en el Censo Agropecuaro del 2022. En el año 2024 se reportaban 102.5 hectareas de agricultura protegida (DGSIAP, 2024).

Las superficie de agricultura protegida por tipo de tecnología

La superficie total bajo agricultura protegida, en el año 2022, fue de 77,417 hectáreas y se realizaba en 30,179 unidades de producción, que representaba el 0.66% de los 4.6 millones de unidades de producción existentes en México. Sinaloa, Michoacán, Chihuahua, Jalisco, México y Baja California concentraban el 63.9 % de la superficie (INEGI, 2023a). En porcentaje por tipo de instalaciones fueron; invernaderos, 28.1%; malla sombras, 27.9%; macro túneles, 20.1%; casa sombras 10.4%; micro túneles 5.1%), viveros (3.0%), techo sombra (1.0%) y pabellónes (0.5%) (INEGI, 2023a).

Principales cultivos por estados

Los cultivos de los cuales se reportaron datos fueron; jitomate, pepino, chiles, fresa, arándano, zarzamora y manzana (tabla 2). La mayor superficie de manzana protegida con mallas antigranizo se concentraba en Chihuahua y la Sierra de Arteaga en Coahuila (INEGI, 2023ª; Bastida, 2024).

Tabla 2. Cultivos en agricultura protegida por estados en el año 2022

Estado	Cultivos	Superficie sembrada (hectáreas)			Producción (toneladas)		
		Total	En AP	Porcentaje (%)	Total	En AP	Porcentaje (%)
Aguascalientes	Jitomate	817	184	22.5	52 013	24 973	48.0
	Fresa	121	84	69.5	4 725	3 548	75.1
	Pepino	152	16	10.7	9 426	3 500	37.1
	Chile	561	13	2.2	9 776	1 224	12.5
B. California	Jitomate	2 312	1 451	62.7	198 810	165 140	83.1
	Pepino	1 271	1 063	83.6	103 935	93 601	90.1
	Fresa	3 349	963	28.8	116 921	33 571	28.7
	Chile	1 323	167	12.6	45 539	5 160	11.3
	Arándano	638	452	70.9	4 911	4 849	98.7
	Zarzamora	50	47	94.0	779	707	90.8
B. California S.	Jitomate	3 329	1 910	57.4	258 236	170 009	65.8
	Chile	1 400	690	49.3	568 58	37 902	66,7
	Pepino	323	75	23.2	10 163	9 291	91.4
	Fresa	533	2	0.4	25 899	87	0.3
Campeche	Jitomate	572	1.70	0.30	20 740	94.25	0.45
	Chile	1 321	2.79	0.21	8 968	63.51	0.71
	Pepino	149	0.02	0.01	934	1.00	0.11
Chihuahua	Jitomate	230	29	12.6	9 578	4 062	42.4
	Manzana	28 843	9 749	33.8	503 388	213 408	42.4
Chiapas	Jitomate	1 112	649	58.4	51 375	33 882	66.0
	Chile	748	71	9.5	3 741	1 714	45.8
	Pepino	432	71	16.5	3 159	958	30.3
	Fresa	33	17	52.9	982	821	83.7
Coahuila	Jitomate	788	504	64.0	65 742	54 902	83.5
	Manzana	3 422	467	13.6	15505	4 056	26.2
	Pepino	476	335	70.3	35 682	29 569	82.9
	Chile	926	118	12.7	24 637	5 638	22.9
Ciudad de México	Jitomate	15.4	9.2	59.6	820.7	764.4	93.1
	Fresa	1.3	1.2	93.6	48.2	47.8	99.1
	Chile	7.0	1.1	15.2	41.8	26.2	62.7
	Manzana	106.1	0.1	0.1	19.9	1.3	1.1
	Zarzamora	1.9	0.0	1.6	2.2	0.5	20.0
	Arándano	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Colima	Jitomate	242	87	35.9	14 843	9 170	61.8
	Pepino	531	16	2.9	13 355	1 240	9.3
	Arándano	132	8	6.1	110	27	24.8
	Zarzamora	298	3	1.0	2 241	42	1.9
Durango	Jitomate	265	151	57.0	27 012	22 742	84.2
	Chile	1 844	104	5.6	19 958	6 731	33.7
	Manzana	4 474	39	0.9	7 878	61	0.8
	Pepino	4	1	27.0	23	22	95.0
	Fresa	2	1	50.0	71	65	91.5
	Zarzamora	0.1	0	0.0	0	0	0
Guanajuato	Chile	4 261	760	17.8	152 287	105 420	69.2
	Jitomate	2 053	876	42.7	137 044	100 734	73.5
	Fresa	2 381	823	34.6	78 492	45 149	57.5
	Pepino	617	190	30.8	54 240	42 477	78.3
	Arándano	355	255	71.9	3 791	3 777	99.6
	Zarzamora	29	16	56.1	313	242	77.3
Guerrero	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Hidalgo	Jitomate	1 802	679	37.7	100 155	78 435	78.3
	Chile	2 172	51	2.3	9 816	2 697	27.5
	Pepino	29	14	47.7	1 317	1 144	86.9
	Manzana	1 232	2	0.1	566	9	1.6
	Fresa	24	8	32.6	388	354	91.2
Jalisco	Jitomate	4 563	1 326	29.1	297 154	172 261	58.0
	Chile	4 665	390	8.4	119 348	22 217	18.6
	Fresa	1 522	596	39.2	44 287	15 292	34.5
	Zarzamora	4 801	631	13.1	13 468	10 543	78.3
	Arándano	2 661	996	37.4	9 917	9 689	97.7
	Pepino	954	130	13.6	15 976	3 526	22.1
	Manzana	15	12	80.0	126	123	97.6
México	Jitomate	2 691	1 465.2	54.5	222 268	193 291	87.0
	Fresa	714	279.5	39.2	11 319	7 406	65.4
	Pepino	229	149.3	65.2	8 390	7 272	86.7
	Chile	294	85.6	29.1	5 058	4 179	82.6
	Manzana	310	0.7	0.2	334	6	1.9
	Arándano	2	0.3	14.6	3	3	92.7
	Zarzamora	42	0.1	0.2	142	2	1.1
Michoacán	Jitomate	3 658	989	27.0	248 755	160 732	64.6
	Fresa	11 104	3 564	32.1	393 135	142 794	36.3
	Zarzamora	10 757	1 558	14.5	219 143	34 555	15.8
	Pepino	1 288	196	15.2	49 993	22 912	45.8
	Chile	2 178	275	12.6	60 000	21 855	36.4
	Arándano	2 742	868	31.7	12 567	12 318	98.0
	Manzana	385	3.8	0.1	210	2	0.9%
Morelos	Jitomate	1 397	275	19.7	67 618	40 380	59.7
	Pepino	699	228	32.6	32 671	25 421	77.8
	Chile	382	16	4.2	4 204	984	23.4
Nayarit	Chile	1,134	58	5.1	12,139	934	7.7
	Jitomate	604	48	8.0	17,070	2,105	12.3
	Arándano	30	18	60.8	65	64	98.0
	Pepino	551	5	0.9	6,225	372	6.0
Nuevo León	Jitomate	283	158	55.6	33 341	29 645	88.9
	Manzana	482	40	8.3	732	500	68.3
	Pepino	8	7	84.6	1 267	1 260	99.4
	Chile	417	1	0.2	6 152	2	0.03
	Arándano	0.25	0.25	100.0	2	2	100.0%
Oaxaca	Jitomate	1 199	471	39.3	46 325	36 838	79.5
	Pepino	220	41	18.4	3 375	2 454	72.7
	Chile	1 959	38	1.9	2 918	232	8.0
	Fresa	46	10	22.2	567	492	86.8
Puebla	Jitomate	2 243	1 133	50.5	163 999	132 128	80.6
	Pepino	263	165	62.7	17 423	16 066	92.2
	Arándano	1 279	68	5.3	732	513	70.1
	Manzana	5 371	62	1.1	7 003	568	8.1
	Fresa	69	23	32.7	1 117	605	54.2
	Chile	1 887	11	0.6	5 977	38	0.6
	Zarzamora	179	3	1.7	240	85	35.4
Querétaro	Jitomate	541.1	372.7	68.9	74 330.9	69 369.1	93.3
	Chile	836.9	243.6	29.1	49 588.3	40 472.2	81.6
	Pepino	70.2	66.9	95.3	9 525.3	9 506.9	99.8
	Arándano	49.9	46.0	92.1	475.0	475.0	100.0
	Fresa	9.5	8.0	83.8	419.1	414.0	98.8

	Manzana	228.9	0.1	0.04	135.5	0.3	0.2
Quintana Roo	Chile	688	4	0.5	3 867	36	0.9
	Jitomate	115	1	0.9	1 715	15	0.9
San Luis Potosí	Jitomate	3 245	1 228	37.8	296 628	224 465	75.7
	Pepino	415	355	85.5	43 135	41 970	97.3
	Chile	13 290	176	1.3	115 010	25 866	22.5
	Arándano	16	8	49.4	45	45	100.0
	Manzana	271	1	0.2	76	4	5.4
Sinaloa	Jitomate	15 151	3 558	23.5	991 403	447 683	45.2
	Chile	21 926	3 362	15.3	64 842	265 311	34.7
	Pepino	4 254	2 132	50.1	293 784	238 778	81.3
	Arándano	3 070	73	2.4	2 385	576	24.1
	Zarzamora	47	29	61.7	829	433	52.3
Sonora	Jitomate	2 397	1 281	53.4	198 213	141 578	71.4
	Pepino	2 099	1 040	49.5	142 828	102 459	71.7
	Chile	6 121	1 000	16.3	206 808	73 537	35.6
	Manzana	47	5	10.6	414	85	20.5
	Arándano	6	6	100.0	82	82	100.0
Tabasco	Jitomate	82.6	0.10	0.12	220.9	0.1	0.04
	Chile	679.2	0.74	0.10	3 553.1	5.73	0.16
	Pepino	420.9	0.37	0.089	1 026.3	0.0050	0.0005
Tamaulipas	Jitomate	338	71	20.8	18 836	4 827	25.6
	Chile	4 039	3	0.1	117 833	21	0.017
Tlaxcala	Jitomate	116	75	64.7	10 911	9 866	90.4
	Pepino	9	5	52.8	1 019	889	87.2
	Fresa	10	5	50.0	295	172	58.4
	Manzana	108	1	0.7	112	16	13.9
	Zarzamora	2	1	50.0	15	15	99.8
	Arándano	1	1	100.0	1	1	100.0
	Chile	6	0	6.8	33	1	2.1
Veracruz	Jitomate	519.67	38.10	7.3	11,837.07	4,735.71	40.0
	Chile	3,993.80	18.74	0.5	8,360.31	190.32	2.3
	Pepino	520.59	5.55	1.1	3,288.71	383.80	11.7
	Fresa	25.77	1.86	7.2	209.70	126.93	60.5
Yucatán	Chile	1 248	129	10.37	7 506	4 215	56.16
	Jitomate	254	9	3.68	3 197	333	10.41
	Pepino	1 488	1	0.05	7 369	9	0.13
Zacatecas	Jitomate	3 040	422	13.9	178,153	61 283	34.4
	Chile	23 507	139	0.6	188,671	2 596	1.4
	Pepino	216	41	18.9	8,273	4 397	53.2
	Fresa	55	1	1.9	530	34	6.3

Fuente: INEGI, 2023b. Resultados definitivos del Censo Agropecuario 2022 por estados.
Nota: nd = no disponible

En 2022, la superficie censada de estos cultivos sumo 56,271.62 hectáreas de agricultura protegida. De ellas 19,452, el 34.65% eran de jitomate; otras 10,382.7, el 18.45% para la manzana; unas 8,476.57 correspondía a chiles, el 15%; para pepino 6,485.14, el 11.52%; la fresa con otro 11.35%, unas 6387.56 hectáreas; mientras el arándano ocupaba 2,799.55, el 4,97% y la zarzamora el 4.6% restante correspondiente a 2,288.1 hectáreas.

Tabla 3. Cultivos y superficie que ocupan por estado

Estado	Cultivo y superficie en agricultura protegida (hectáreas)						
	Jitomate	Chile	Pepino	Fresa	Arándano	Zarzamora	Manzana
Aguascalientes	184	561	152	84	0	0	0
B. California	1,451	167	1,063	963	452	47	0
B. California S.	1,910	690	75	2	0	0	0
Campeche	1.70	2.79	0.02	0	0	0	0
Chihuahua	29	0	0	0	0	0	9,749
Chiapas	649	71	71	17	0	0	0
Coahuila	504	118	335	0	0	0	467
Ciudad de México	9.2	1.1	0	1.2	0	0	0.1
Colima	87	0	16	0	8	3	0
Durango	151	104	1	1	0	0	39
Guanajuato	876	760	190	823	255	16	0
Hidalgo	679	51	14	8	0	0	2
Jalisco	1,326	390	130	596	996	631	12
México	1,465.2	85.6	149.3	279.5	0.3	0.1	0.7
Michoacán	989	275	196	3564	868	1558	3.8
Morelos	275	16	228	0	0	0	0
Nayarit	48	58	5	0	18	0	0
Nuevo León	158	1	7	0	0.25	0	40
Oaxaca	471	38	41	10	0	0	0
Puebla	1,133	11	165	23	68	3	62
Querétaro	372.7	243.6	66.9	8.0	46.0	0	0.1
Quintana Roo	1	4	0	0	0	0	0
San Luis Potosí	1,228	176	355	0	8	0	1
Sinaloa	3,558	3,362	2,132	0	73	29	0
Sonora	1,281	1,000	1,040	0	6	0	5
Tabasco	0.10	0.74	0.37	0	0	0	0
Tamaulipas	71	3	0	0	0	0	0
Tlaxcala	75	0	5	5	1	1	1
Veracruz	38.10	18.74	5.55	1.86	0	0	0
Yucatán	9	129	1	0	0	0	0
Zacatecas	422	139	41	1	0	0	0
Superficie	19,452	8,476.57	6,485.14	6,387.56	2,799.55	2,288.1	10,382.7
Porcentajes	34.56%	15.06%	11.52%	11.35%	4.97%	4.6%	18.45%

Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla 2

Superficie y porcentajes para los principales cultivos

En cuanto a la superficie de cada cutivo y el porcetaje que representa con respecto al total sembrado que incluye campo abierto, se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Superficie sembrada, produción y porcentajes de los principales cultivos en agricultura protegida

Cultivo	Superficie sembrada (hectáreas)			Producción (toneladas)		
	Total	Agricultura protegida		Total	Agricultura protegida	
		Hectareas	Porcentaje		Toneladas	Porcentaje
Jitomate	56,709	19,653	34.7 %	3,835,146	2,405207	62.7 %
Manzana	52,890	10,378	19.6 %	542,967	218,843	40.3 %
Chile	137,321	7,996	5.8 %	2,590,247	629,473	24.3 %
Fresa	20,121	6,397	31.8 %	680,275	251,234	36.9 %
Pepino	18,257	6,360	34.8 %	886,444	660,552	74.5 %
Arándano	11,223	2,803	25.0 %	35,101	32,422	92.4 %
Zarzamora	16,482	2,290	13.9 %	237,329	46,648	19.7 %
Total	313,003	55,877	17.65 %	8,807,509	4,244,379	48.19 %

Fuente: Censo Agropecuario 2022 (INEGI, 2023a).

La sumatoria de total de las hectáreas en las que se siembran los siete productos es de 313,003 hectáreas, de ellas la agricultura protegida corresponde a 55,877 hectáreas, situación que corresponde al 17.65% de la superficie total sembrada en agricultura protegida con esos cultivos, sin embargo, representan el 48.19% de la producción (tabla 4). En ambos aspectos, el mayor porcentaje corresponde al jitomate, con el 34.7% de la superficie sembrada y el 62.7% de la producción obtenida en 19,653 hectáreas, contra el 37.3% de la producción obtenida en 37,056 hectáreas de agricultura a cielo abierto.

La distribución de la agricultura protegida en México

Para el año 2022, la agricultura protegida se concentraba en 15 entidades, con unas 70,472 hectáreas, representando el 91% de las 77,417 hectáreas reportadas con agricultura protegida. En los otros los estados estaba el 9% restante (tabla 6).

Tabla 6. Estados con mayor superficie de agricultura protegida en 2022

Estado	Superfie (ha)	Estado	Superfie (ha)	Estado	Supeficie (ha)

Sinaloa	10 339	B. California	5 680	S.L. Potosí	1 831
Michoacán	9 993	Sonora	4 115	Chiapas	1 702
Chihuahua	9 950	Guanajuato	3 897	Coahuila	1 656
Jalisco	7 102	Puebla	2 830	Querétaro	1 346
México	6 406	B. California Sur	2 650	Zacatecas	975
				Total	70,472

Fuente: INEGI, 2023b. Datos de la tabla 1

Cultivos que experimentaron mayor crecimiento en agricultura protegida

En los últimos quince años la producción de jitomate experimento un incremento alto debido a la producción en agricultura protegida, al igual que la producción de zarzamora que fue otro cultivo cuya producción incrementó debido a su cultivo en la agricultura protegida (INEGI, 2023a) (tablas 5).

Tabla 5. Incremento en la producción de jitomate y zarzamora del 2007 al 2022

Año del Censo Agropecuario		Superficie (hectáreas)	Producción (toneladas)	Rendimiento (toneladas/hectárea)
Jitomate				
Año 2007		53 224	1 958 111	36.8
Año 2022	Superficie total	56 709	3 835 146	
	Agricultura a cielo abierto	35 981	1 429 936	39.7
	Agricultura protegida	19 653	2 405 207	122.4
Zarzamora				
Año 2007		4 190	20 302	4.8
Año 2022	Superficie total	16 482	237 329	
	Agricultura a cielo abierto	14 192	190 682	13.4
	Agricultura protegida	2 290	46 648	20.4

Fuente. INEGI, 2023a.

Cultivos ausentes en las estadísticas y los nuevos cultivos en la agricultura protegida

En los datos oficiales faltan la superficie de agricultura protegida que ocupan cultivos como frambuesa, flores de corte y plantas ornamentales en maceta, además de la superficie con berenjena y lechuga. De frambuesa en Jalisco se reportan 4 mil 500 hectáreas bajo macro túneles (HC, 2025). Las plantas de ornato representaron 5% de la superficie que ocupa la agricultura protegida y 9% del valor total, en 2024 (Cortés, 2025). En este subsector, en la región de Villa Guerrero, estado de México, en el 2023, existían unas 4,247.95 hectáreas de invernaderos y túneles altos dedicadas a la producción de ornamentales (Domínguez, 2024).

En Coatepec Harinas se reportaron otras 950 hectáreas dedicada a la floricultura *(SECAMPO, 2022), en Tenancingo otro municipio de esa región contaba con cerca de otras mil hectáreas de flores (SECAMPO, 2023). En total otras 10,698 hectáreas más, que sumadas a las 77,417 reportadas por el INEGI en el censo Agropecuario 2022, nos darían más 88 mil hectáreas de agricultura protegida para el año 2024. Lo novedoso en el Censo 2022, son las más de 10 mil hectáreas con mallas antigranizo para el cultivo de la manzana, que en datos anteriores no se consideraban (Bastida, 2024).

Situación contemporánea de la agricultura protegida en México

De acuerdo con los datos disponibles, para el año 2023, la superficie con agricultura protegida superaría las 86 mil hectáreas. De ellas cerca del 80% se ubicaba en el Centro Occidente y Noroeste de México, por el contrario, la región Sur Sureste y la región Norte cuenta con poca superficie (Agricultura/DGSIAP, 2024) (Tabla 7).

Tabla 7. La agricultura protegida por regiones

Región	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Región Centro Occidente	42,131.48	48.50
Región Noroeste	25,949.56	29.90
Región Centro	12,587.82	14.51
Región Noreste	3,998.07	04.61
Región Sur Sureste	110.63	02.43
Total	86,777.56	99.95

Fuente: SADER/SIAP, 2024

En 2022 en México existían más de 78,000 hectáreas bajo agricultura protegida (INEGI. 2023ª). De ellas, 46 mil hectáreas correspondían a hortalizas, 29 mil de berries y el resto se distribuye entre ornamentales, flores y viveros (HC, 2025). Para el año 2024, la DGSIAP (2024), indicaba que ese año había 57,586.51 hectáreas de invernaderos; 22,497.83, en mallas sombra y en túneles altos 19,758.78, dando de 99,843 hectáreas de agricultura protegida. De ellas 976.68 hectáreas correspondían a agricultura orgánica. Por lo tanto, las últimas cifras oficiales indican que la superficie de la agricultura protegida se acerca a las 100 mil hectáreas. De los 4.6 millones de unidades de producción que captó el censo 2022, solo 54,289 se consideran unidades de producción de grandes productores agropecuarios (INEGI. 2024). De las 30,179 unidades de agricultura protegida, se estimó que entre el 96.5% y el 98.6% de ellas

era de menos de 5 hectáreas, pequeños y medianos productores. Las unidades de más de 5 hectáreas representan entre 1.4% y el 3.5%, unas 422 a 1,056 unidades mayores de cinco hectáreas y son las que tienen la posibilidad de exportar (INEGI, 2023 a, c). Entre el 60% y el 82% de la producción obtenida en agricultura protegida se exporta y cerca del 96% tienen como destino los Estados Unidos (Vázquez, 2024, el Universal, 2025). Entre ellas están las unidades afiliadas a la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC), que representa a unas 350 empresas ubicadas en 21 estados de la República Mexicana, relacionadas con la producción, empacado, distribución y la comercialización de hortalizas frescas. Entre los socios suman unas 10,000 hectáreas de agricultura protegida (AMPHAC, 2025a). Teniendo como objetivo el incremento de la oferta de productos de alto valor en Estados Unidos de América, se han investigado oportunidades comerciales para flores, situación que, permitirá bajar la saturación de productos hortícolas en el mercado, así como disminuir la dependencia del tomate (AMHPAC, 2025b).

El mapa de distribución de la agricultura protegida se presenta en la siguiente figura, con la aclaración que el color representa unidades de producción, no superficies de agricultura protegida.



Figura 1. Distribución de la agricultura protegida en México. Año 2024.
Fuente: https://nube.agricultura.gob.mx/agriculturaProtegida/

El futuro de la agricultura protegida mexicana

Indudablemente que la superficie con agricultura protegida seguirá incrementándose y diversificando para, junto con otros sistemas de producción, brindar los alimentos necesario

para una población en aumento, además de ser un elemento central para hacer frente a problemas como el calentamiento global, el cambio climático y la escasez de agua, entre otros.

Actualmente la agricultura protegida no es solamente un sistema para proteger a los cultivos del clima, se ha convertido en una plataforma de innovación donde convergen la inteligencia artificial, la automatización, el análisis de datos, la fisiología vegetal, la sostenibilidad y el manejo postcosecha (Agricultura/DGSIAP. 2024).

Los expertos en el tema señalan que el futuro de la agricultura protegida mexicana se perfila como una solución estratégica para combatir la escasez de agua, frenar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad alimentaria ya que permite incorporar herramientas como la automatización de invernaderos, el monitoreo inteligente de cultivos, los sistemas de riego de precisión y las plataformas de análisis de datos apoyadas en inteligencia artificial (Valdelamar, 2026). La agricultura protegida seguirá incrementándose, ya que es una alternativa para la enfrentar el cambio climático y la presión sobre los recursos naturales, para responder a la demanda global de alimentos que exigirá incrementar la producción agrícola entre un 50% y 60% para el año 2050, así la horticultura protegida se consolidará en México como la solución más viable para producir más alimentos con menos recursos (BMEditores, 2026). Los especialistas en este sector coinciden en que la agricultura protegida basada en invernaderos, sistemas hidropónicos y tecnologías de monitoreo será determinante para enfrentar los retos climáticos y de productividad que enfrenta la agricultura mexicana (Carbajal, 2026).

Conclusiones

La agricultura protegida mexicana ha un desarrollo sostenido en las últimas tres décadas entre 700 y 1500 hectáreas por año, mediante diversos tipos de estructuras de protección para cultivos.

El desarrollo experimentado en la agricultura protegida de México tiene como principal motor la exportación de hortalizas, frutillas y flores a Estados Unidos y otros países desarrollados.

Menos del 5% de más unidades de producción de la agricultura protegida son las que participan en las exportaciones.

Las unidades de producción en agricultura protegida que exportan son los que tienen más de cinco hectáreas.

El sector de la agricultura protegida puede verse afecta, debido a las políticas implementadas por Estados Unidos y la negociación del T-mec.

El sector seguirá desarrollándose ya que es una de las alternativas para la producción de alimentos, para minimizar los efectos del cambio climático, el calentamiento global y el uso eficiente del agua.

Se espera que a futuro se desarrollen sistemas de agricultura protegida para la producción de los cultivos básicos que son los alimentos de la población mexicana.

Literatura citada

Agricultura/DGSIAP. 2024. Agricultura Protegida. Gobierno de México. Agricultura. Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. México. En línea; https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/documentos/agricultura-protegida-200653, fecha de consulta; 15/07/2026

AMHPAC. 2025a. AMHPAC, una Asociación unida y fortalecida ante las adversidades. Asociación Mexicana de Horticultura Prelegida A. C. En línea; https://www.amhpac.org/es/index.php/en/14-comunicados/1093-amhpac-una-asociacion-unida-y-fortalecida-ante-las-adversidades, fecha de consulta; 22/07/2026.

AMHPAC. 2025b. Informe anual de actividades. 1 de agosto de 2024 • 31 de julio de 2025. Asociación Mexicana de Horticultura Prelegida A. C. En línea; https://congreso.amhpac.org/25/images/InformeanualAMHPAC2025.pdf, fecha de consulta; 22/07/2026.

Bastida Cañada, O. A. 2024. El desarrollo de la agricultura protegida en México. En línea; https://podcastagricultura.com/episodio-418/.

Bastida Tapia, A. 2012. Los invernaderos y la agricultura protegida en México. Universidad Autónoma Chapingo. En línea; https://horticulturaefectiva.blogspot.com/2012/12/agricultura-protegida-mexico.html. https://es.slideshare.net/slideshow/01-la-agricultura-protegida-y-los-invernaderos/27386629, fecha de consulta; 14/07/2026

Bastida Tapia, A. 2024. La Agricultura Protegida en México, una Historia de Medio Siglo de Desarrollo. In Memoria Mesa 3B Ciencias biológicas y agronómicas. 13° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas. División de Ciencias Económico – Administrativas. Universidad Autónoma Chapino. En línea; https://dicea.chapingo.mx/wp-

content/uploads/publicaciones/congreso-ciema/Memoria-2024-mesa-3B-R.pdf, fecha de consulta; 10/07/2026

Blueberriesconsulting. 2026. Las berries mexicanas consolidan una transformación productiva, tecnológica y exportadora. En línea; https://blueberriesconsulting.com/las-berries-mexicanas-consolidan-una-transformacion-productiva-tecnologica-y-exportadora/, fecha de consulta; 15/07/2026

BMEditores. 2026. Horticultura protegida gana terreno como solución para un campo más resiliente. En línea; https://bmeditores.mx/entorno-pecuario/horticultura-protegida-gana-terreno-como-solucion-para-un-campo-mas-resiliente/, fecha de consulta; 20/07/2026.

Carbajal B. 2026. México puede ser potencia en agricultura mejorada. La Jornada. En línea; https://www.jornada.com.mx/noticia/2026/03/10/economia/mexico-puede-ser-potencia-en-agricultura-mejorada-se. Fecha de consulta; 20/07/2026.

Cortés Sánchez, S. 2025. Agricultura protegida. Saberes y Ciencia. Divulgación Científica. En línea; https://saberesyciencias.com.mx/2025/12/07/agricultura-protegida/, fecha de consulta 12/07/2026

Domínguez Guadarrama, L. G. 2024. Floricultura intensiva y deforestación en Villa Guerrero, Estado de México. Un análisis desde las políticas públicas y la gobernanza. Tesis de maestría. El Colegio de la Frontera Norte. Tijuana, B. C., México. En línea; https://posgrado.colef.mx/wp-content/uploads/2024/08/TESIS-Dominguez-Guadarrama-Luis-Gerardo-MAIA.pdf, fecha de consulta: 20/06/2026

DGSIAP. 2024. Anuario Estadístico de la Producción Agricola. Dirección General del Servicio de información Agroalimentaria y pesquera. Gobierno de México. En línea; https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/, fecha de consulta: 07/07/2026

INEGI. s/f. Glosario. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. En línea; https://www.inegi.org.mx/app/glosario/default.html?p=amcag2016, fecha de consulta: 30/06/2026

INEGI. 2023a. Censo Agropecuario 2022. Resultados Definitivos. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. En línea; https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/, fecha de consulta; 05/07/2026

INEGI, 2023b. Resultados definitivos del censo agropecuario 2022 por estados. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. En línea con el nombre de cada entidad federativa.

INIEGI, 2023c. Resultados definitivos del censo agropecuario 2022. Comunicado de prensa número 667/23. 21 de noviembre de 2023. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. En línea; https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022.pdf, fecha de consulta: 20/07/2026,

INEGI. 2024. Resultados adicionales del censo agropecuario 2022. Comunicado de prensa número 397/24. 2 de julio de 2024. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. En línea; https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/CA_Adic/CA_Adic2024.pdf, fecha de consulta; 22/07/2026.

HC. 2025. Los desafíos de la industria de Agricultura Protegida. Horticultivos. En línea; https://horticultivos.com/articulo/439, fecha de consulta: 04/07/2026

Márquez Colìn, G. 2024. Censo agropecuario: nuevos datos sobre el campo mexicano.

Piña Gutiérrez L. S. 2024. El Censo Agropecuario 2022. Análisis de resultados. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la soberanía Alimentaria (CEDRSSA). Cámara de Diputados. LXV Legislatura. En línea; https://portalhcd. Diputados.gob.mx/PortalWeb/Micrositios/5c2a4fd3-24cf-4970-9d2c-6b8fe51a2c99.pdf, fecha de consulta: 02/07/2026

Portillo Villalobo, A. I.; Macías López, M. G.; Terrazas Gómez, M. I.; Uranga Valencia, L. P. y Valenzuela Arizpe, F. N. 2024. Exploración del mercado de plantas ornamentales de vivero en Delicias, Chihuahua. Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan. Vol. 12 Núm. 1 (2024). En línea; https://revistabioagro.mx/index.php/revista/issue/view/24, fecha de consulta; 20/07/2026.

Rivas, V. 2025. Entrega SDR mallas antigranizo a 214 productores de manzana. En línea; https://oem.com.mx/elheraldodechihuahua/local/entrega-sdr-mallas-antigranizo-a-214-productores-de-manzana-22481581, fecha de consulta: 30/12/2024

SADER. 2023. Una agricultura del futuro. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. En línea; https://www.gob.mx/agricultura/articulos/una-agricultura-del-futuro?idiom=es, fecha de consulta; 22/07/2026.

SADER. 2025. Panorama Agroalimentario 2025. Coordinación General de Información, Inteligencia y Evaluación. Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (DGSIAP). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. En línea; https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_dgsiap/2025.pdf. fecha de consulta; 03/07/2026

SECAMPO. 2022. Coatepec Harinas. Secretaria del Campo – Edomex. En línea; https://secampo.edomex.gob.mx/sites/secampo.edomex.gob.mx/files/files/Produccion_Campo/21CoaHar.pdf, fecha de consulta; 08/07/2026

SECAMPO. 2023. Tenancingo. Secretaria del Campo – Edomex. En línea; https://secampo.edomex.gob.mx/sites/secampo.edomex.gob.mx/files/files/Produccion_Campo/88Tenancingo2023.pdf, fecha de consulta; 08/07/2026

SIAP/SADER. 2024. Distribución de la Agricultura Protegida en México. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Dirección de Soluciones Geoespaciales. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. En línea; https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/documentos/agricultura-protegida-200653; https://www.gob.mx/siap/documentos/agricultura-protegida-200653, fecha de consulta; 18/07/2026

Valdelamar, J. 2026. Horticultura protegida y tecnología, los ejes en la GreenTech Americas 2026. El Financiero. En línea, https://www.elfinanciero.com.mx/economia/2026/03/10/horticultura-protegida-y-tecnologia-los-ejes-en-la-greentech-americas-2026/, fecha de consulta; 22/07/2026.

Vázquez Martínez, A. 2025. Agricultura protegida: el futuro bajo techo. Tierra Fertil. En línea; https://tierrafertil.com.mx/2025/07/03/agricultura-protegida-el-futuro-bajo-techo/ fecha de consulta; 08/07/2026

Manejo agronómico y crecimiento de la flor de margarita (B*ellis sp*.) en Tixtla, Guerrero, México

Yolanda Isabel Escalante Estrada[13], José Alberto Salvador Escalante Estrada[14], Luis Daniel Samper-Escalante[15]

Resumen

La flor de margarita (*Bellis perennis* L.) constituye una especie ornamental de importancia económica para pequeños productores del estado de Guerrero, particularmente durante la temporada asociada a las festividades del Día de Muertos. El objetivo de este estudio fue evaluar el crecimiento y desarrollo de estructuras vegetales de *Bellis perennis* L. bajo condiciones tradicionales de cultivo en Tixtla, Guerrero, México. El experimento se estableció en cuatro parcelas de producción, seleccionándose diez plantas al azar por parcela para el seguimiento de variables de crecimiento durante seis periodos de evaluación posteriores al trasplante. Los resultados mostraron diferencias en el crecimiento de plantas entre parcelas, atribuibles a condiciones de sombreado, disponibilidad de agua y características del suelo. Los mayores valores de altura se observaron en las parcelas 3 y 4, alcanzando promedios finales de 730.1 y 738.4 mm. La parcela 2 favoreció el mayor desarrollo foliar (523.1 cm²/planta), superando significativamente a las parcelas 1, 3 y 4. La parcela 1 promovió la mayor producción floral (37.3 flores/planta), siendo significativamente superior a todas las demás parcelas. La parcela 4 acumuló el mayor peso de planta (85.1 g), en contraste con la parcela 1 que produjo las plantas más ligeras (80.2 g). Esto sugiere una posible compensación entre producción floral y acumulación de biomasa. Ninguna parcela fue superior en todas las variables simultáneamente. Los resultados generan una base técnica para optimizar el manejo agronómico de *Bellis perennis* L., incrementar la productividad y calidad comercial del cultivo en sistemas tradicionales de producción ornamental en Guerrero.

Palabras clave: *Bellis perennis* L., crecimiento vegetal, manejo agronómico.

[13] Instituto de Investigación Científica Área de Ciencias Naturales. Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas s/n. Chilpancingo, Guerrero. México. yolaescalante2013@gmail.com
[14] Postgrado en Botánica Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km 36.5. Montecillo, Mpio. de Texcoco Edo. de Méx. jasee@colpos.mx
[15] Escuela de Graduados e Innovación. Tecnológico de Monterrey Campus Puebla. Vía Atlixcáyotl No. 2301, Reserva Territorial Atlixcáyotl. a01127128@tec.mx

Abstract

The daisy (*Bellis perennis* L.) is an economically important ornamental species for small-scale farmers in the state of Guerrero, particularly during the Day of the Dead festivities. The objective of this study was to evaluate the growth and development of *Bellis perennis* L. plant structures under traditional cultivation conditions in Tixtla, Guerrero, Mexico. The experiment was established in four production plots, with ten plants randomly selected from each plot for monitoring growth variables during six evaluation periods after transplanting. The results showed differences in plant growth among plots, attributable to shading conditions, water availability, and soil characteristics. The greatest height values were observed in plots 3 and 4, reaching final averages of 730.1 and 738.4 mm, respectively. Plot 2 favored the greatest leaf development (523.1 cm²/plant), significantly surpassing plots 1, 3, and 4. Plot 1 promoted the highest flower production (37.3 flowers/plant), significantly exceeding all other plots. Plot 4 accumulated the greatest plant weight (85.1 g), in contrast to plot 1, which produced the lightest plants (80.2 g). This suggests a possible trade-off between flower production and biomass accumulation. No plot was superior in all variables simultaneously. The results provide a technical basis for optimizing the agronomic management of *Bellis perennis* L., increasing the productivity and commercial quality of the crop in traditional ornamental production systems in Guerrero.

Keywords: *Bellis perennis* L., plant growth, agronomic management.

Introducción

La familia Asteraceae constituye uno de los grupos botánicos más diversos y exitosos dentro de las angiospermas, comprendiendo aproximadamente 1,620 géneros y más de 23,000 especies distribuidas en prácticamente todos los ecosistemas terrestres, desde regiones templadas hasta zonas tropicales y ambientes de alta montaña. Su extraordinaria diversidad morfológica y ecológica ha permitido que esta familia ocupe una amplia variedad de nichos ecológicos, desempeñando funciones esenciales en los ecosistemas como fuente de alimento para polinizadores, estabilización del suelo y mantenimiento de la biodiversidad vegetal. Diversos estudios filogenómicos recientes continúan considerando a las Asteraceae como un modelo biológico de gran importancia para comprender los procesos evolutivos, la radiación

adaptativa, la diversificación de las angiospermas y la evolución de caracteres reproductivos especializados, como el capítulo floral, una de las principales innovaciones evolutivas de esta familia (Palazzesi & Funk, 2022; Mandel *et al*., 2022).

Bellis perennis es una especie herbácea perenne de porte bajo que desarrolla una roseta basal de hojas simples, espatuladas y ligeramente pubescentes, mientras que sus inflorescencias se presentan sobre escapos florales individuales que pueden alcanzar entre 5 y 20 cm de altura, dependiendo de las condiciones de cultivo. El capítulo floral está conformado por flores liguladas periféricas de color blanco o rosado y flores tubulares amarillas en el disco central, característica típica de las Asteraceae que favorece la atracción de diversos grupos de insectos polinizadores (Darras, 2020). Esta arquitectura floral contribuye a incrementar la eficiencia reproductiva y la producción de semillas, factores que favorecen su establecimiento en distintos ambientes.

Desde el punto de vista agronómico, la especie presenta un mejor desarrollo en suelos francos o franco-arenosos, con buen contenido de materia orgánica, pH ligeramente ácido a neutro y adecuado drenaje. Asimismo, requiere buena disponibilidad de humedad sin llegar al encharcamiento y una exposición preferentemente a pleno sol o con sombra parcial durante las horas de mayor radiación, condiciones que favorecen la formación de biomasa foliar, el desarrollo radicular y una floración abundante y uniforme (Darras, 2020). La respuesta fisiológica de la planta está estrechamente relacionada con la disponibilidad de nutrientes, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio, elementos que intervienen directamente en la síntesis de clorofila, la actividad fotosintética y el desarrollo reproductivo.

Además de su reconocido valor ornamental, investigaciones recientes han demostrado que *Bellis perennis* posee una importante riqueza fitoquímica. En diferentes órganos de la planta se han identificado flavonoides, ácidos fenólicos, saponinas triterpénicas, antocianinas, taninos y diversos compuestos antioxidantes que participan en mecanismos de protección frente al estrés oxidativo y a condiciones ambientales adversas (Albien & Stark, 2023). Estos metabolitos secundarios también presentan interés farmacológico debido a sus propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas, cicatrizantes y antioxidantes, lo que ha incrementado el interés científico por esta especie como fuente potencial de compuestos bioactivos para las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria (Albien & Stark, 2023).

En el ámbito económico, la producción de plantas ornamentales representa uno de los sectores de mayor crecimiento dentro de la horticultura mundial. La demanda de especies

ornamentales de alta calidad estética ha aumentado considerablemente durante la última década debido al incremento del paisajismo urbano, la jardinería doméstica y la comercialización internacional de flores y plantas en maceta (Darras, 2020). En este contexto, *Bellis perennis* constituye una especie ampliamente utilizada en jardines, parques, viveros y áreas verdes por su prolongado periodo de floración, facilidad de cultivo y elevada aceptación comercial.

Actualmente, uno de los principales desafíos para la floricultura consiste en incrementar la productividad y la calidad comercial mediante sistemas de producción más sostenibles y resilientes frente al cambio climático. Las investigaciones recientes promueven la incorporación de prácticas de manejo sustentable, incluyendo el uso eficiente del agua, fertilización racional, bioestimulantes, microorganismos promotores del crecimiento vegetal y estrategias de agricultura regenerativa que permitan mantener altos niveles de producción reduciendo simultáneamente el impacto ambiental (Rouphael & Colla, 2020; Darras, 2020; FAO, 2022). Estas estrategias resultan particularmente relevantes para pequeños y medianos productores rurales, quienes dependen de la producción ornamental como fuente de ingresos y requieren tecnologías de bajo costo que incrementen la competitividad de sus sistemas productivos.

En consecuencia, el estudio de los factores que influyen sobre el crecimiento, la producción de biomasa y la floración de *Bellis perennis* no solamente posee interés científico desde la perspectiva fisiológica y ecológica, sino también una importante aplicación práctica para optimizar los sistemas de producción ornamental bajo esquemas de agricultura sostenible y conservación de los recursos naturales.

En el estado de Guerrero existe escasa información científica relacionada con el crecimiento y desarrollo de *Bellis sp*. bajo condiciones locales de producción. Por ello, la generación de información agronómica regional contribuye al establecimiento de estrategias de manejo orientadas a mejorar el rendimiento y la calidad comercial del cultivo.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en el municipio de Tixtla de Guerrero, ubicado entre los paralelos 17°20' y 17°43' de latitud norte y los meridianos 99°15' y 99°28' de longitud oeste. La región presenta un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La precipitación anual oscila entre 730 y 950 mm, concentrándose principalmente durante los meses de junio a septiembre.

Los suelos predominantes corresponden a tipos aptos para actividades agrícolas y presentan características favorables para el establecimiento de cultivos ornamentales.

Las semillas de *Bellis sp*. fueron sometidas a germinación en condiciones de vivero durante un periodo de siete a diez días. Posteriormente, las plántulas fueron trasplantadas a cuatro parcelas o parcelas de producción bajo manejo tradicional. El ciclo de evaluación comprendió aproximadamente dos meses y medio posteriores al trasplante.

El sistema de riego utilizado fue por gravedad mediante canales interparcelarios abastecidos por agua proveniente de un manantial local. El suministro hídrico fue continuo durante el desarrollo del cultivo.

Se seleccionaron aleatoriamente diez plantas por parcela, obteniéndose un total de cuarenta unidades experimentales. Las plantas fueron identificadas individualmente para realizar el seguimiento de su crecimiento durante seis fechas de evaluación.

La variable principal fue la altura de planta (mm), medida desde la base del tallo hasta el ápice vegetativo. Las evaluaciones se realizaron a los 7, 14, 21, 28, 35 y 42 días posteriores al trasplante.

Adicionalmente, se realizaron observaciones relacionadas con la presencia de síntomas fitosanitarios, condiciones de sombreado, características del suelo y comportamiento general del cultivo.

Se calcularon promedios de altura por parcela y fecha de evaluación. Asimismo, se determinó la tasa media de crecimiento expresada en milímetros por día. Los resultados fueron representados mediante tablas y curvas de crecimiento para describir la dinámica de desarrollo de *Bellis sp*. durante el ciclo productivo.

El experimento también evaluó de manera conjunta cuatro variables de respuesta en plantas de *Bellis perennis* (margarita), relacionadas directamente con la capacidad fotosintética y la producción del cultivo: número de hojas, área foliar por planta (cm²), número de flores por planta y peso de la planta (g). El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar con cuatro parcelas (tratamientos) y diez plantas por parcela (repeticiones), obteniéndose un total de 40 unidades experimentales.

Para cada variable se calcularon las estadísticas descriptivas, incluyendo la media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, valores mínimos y máximos, con el propósito

de caracterizar el comportamiento central y la variabilidad de los datos obtenidos en cada parcela.

Posteriormente, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las parcelas. Este análisis permitió descomponer la variabilidad total en dos fuentes: la variación entre tratamientos (parcelas) y la variación dentro de los tratamientos (error experimental). Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$; por lo tanto, cuando el valor de *p* fue inferior a 0.05, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias entre los tratamientos.

Cuando el ANOVA mostró diferencias significativas para alguna de las variables evaluadas, se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*), la cual permitió comparar todas las posibles parejas de medias e identificar aquellas que diferían significativamente entre sí, controlando el error tipo I experimentwise. Para ello, se empleó el estadístico *q* de la distribución del rango estudentizado, considerando cuatro grupos ($k = 4$) y los grados de libertad correspondientes al error experimental. Asimismo, se calculó la Diferencia Mínima Significativa (DMS) para cada variable analizada. Finalmente, las medias que no presentaron diferencias estadísticas se agruparon mediante la asignación de la misma letra, lo que facilitó la interpretación de las comparaciones entre tratamientos.

Resultados y discusión.

La altura promedio de las plantas aumentó progresivamente durante todo el periodo de evaluación, pasando de 85.8 mm a los 7 días después del trasplante a 683.6 mm a los 42 días, lo que representa un incremento absoluto de 597.8 mm y un incremento relativo de 696.7 %.

Las parcelas 3 y 4 presentaron los mayores valores finales de crecimiento, alcanzando alturas promedio de 730.1 y 738.4 mm, respectivamente. En contraste, la parcela 1 registró la menor altura final (621.4 mm), situación atribuida a condiciones de sombreado parcial y mayor escurrimiento superficial observadas durante el desarrollo del cultivo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Incremento de altura de *Bellis perennis* L. durante el periodo experimental.

Parcela	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Incremento (mm)	Incremento (%)
1	69.8	621.4	551.6	790.3

Parcela	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Incremento (mm)	Incremento (%)
2	69.8	644.3	574.5	823.1
3	92.8	730.1	637.3	686.7
4	110.6	738.4	627.8	567.6

El mayor incremento absoluto se registró en la parcela 3, donde las plantas aumentaron en promedio 637.3 mm durante el periodo de estudio. Sin embargo, el mayor incremento porcentual se observó en La parcela 2 (823.1 %), debido a su menor altura inicial.

La tasa media de crecimiento mostró diferencias entre parcelas. Los valores oscilaron entre 14.78 y 17.57 mm día^{-1}. La parcela 4 presentó la mayor velocidad de crecimiento, seguido de la parcela 3, mientras que la parcela 1 registró la menor tasa de crecimiento 14.78 mm día^{-1}.

El comportamiento temporal del crecimiento mostró una curva sigmoidea característica. Durante los primeros 14 días posteriores al trasplante se observó una fase inicial de establecimiento. Posteriormente, entre los días 21 y 35, ocurrió la fase de crecimiento acelerado, registrándose los mayores incrementos semanales de altura. Finalmente, entre los días 35 y 42 se observó una disminución en la velocidad de crecimiento, coincidiendo con el inicio de la etapa reproductiva y el desarrollo floral.

El patrón sigmoidal observado durante el desarrollo de *Bellis sp*. refleja las fases fisiológicas típicas del crecimiento vegetal. La fase inicial estuvo asociada al establecimiento de las plántulas y al desarrollo del sistema radical después del trasplante. Posteriormente ocurrió una fase de crecimiento exponencial, caracterizada por una elevada actividad meristemática y una intensa elongación celular.

Durante esta etapa, el crecimiento longitudinal probablemente estuvo regulado por una mayor actividad de auxinas y giberelinas, hormonas vegetales relacionadas con la división y elongación celular. Conforme avanzó el ciclo del cultivo, la velocidad de crecimiento

disminuyó gradualmente debido a la transición hacia la etapa reproductiva, donde una mayor proporción de fotoasimilados fue destinada al desarrollo de botones florales e inflorescencias.

La disminución del crecimiento observada en la última semana de evaluación coincide con el inicio de la floración, proceso que implica cambios fisiológicos y metabólicos que modifican la distribución de recursos dentro de la planta.

La altura promedio de las plantas aumentó progresivamente en las cuatro parcelas evaluadas. Las parcelas 3 y 4 presentaron los mayores valores de crecimiento al final del periodo experimental, alcanzando alturas promedio de 730.1 y 738.4 mm, respectivamente. La tendencia observada corresponde a una curva sigmoidea característica del crecimiento vegetal (Fig. 1).

También se determinó el número de hojas, el área foliar, número de flores por planta y por parcela al final del crecimiento de las plantas. Se les realizó el análisis estadístico (ANOVA, $\alpha \geq 0.05$) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comportamiento de las medias y sus desviaciones estándar. Las letras compartidas indican que no existen diferencias significativas entre esos grupos según la prueba de Tukey $\alpha \geq 0.05$).

Variable / Tratamiento	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4	Significación (p-valor)
No. de hojas	78.00 ± 1.56 ^{a}	74.00 ± 1.15 ^{b}	74.00 ± 1.15 ^{b}	70.00 ± 1.15 ^{c}	$p < 0.001$
Área foliar (cm^2)	517.90 ± 2.23 ^{b}	523.10 ± 2.64 ^{a}	518.20 ± 1.48 ^{b}	512.40 ± 1.43 ^{c}	$p < 0.001$
No. de flores	37.30 ± 1.16 ^{a}	34.80 ± 1.03 ^{b}	34.10 ± 0.74 ^{b}	30.10 ± 0.88 ^{c}	$p < 0.001$
Peso planta (g)	80.20 ± 1.81 ^{c}	84.20 ± 1.32 ^{a}	83.20 ± 1.23 ^{ab}	85.00 ± 1.25 ^{a}	$p < 0.001$

El experimento evaluó en conjunto cuatro variables de respuesta en plantas de *Bellis perennis* (margarita) que están relacionadas directamente con la fotosíntesis y producción: número de hojas, área foliar por planta (cm²), número de flores por planta y peso de la planta (g), bajo un diseño completamente al azar con 4 parcelas (tratamientos) y 10 plantas por parcela (repeticiones), dando un total de 40 unidades experimentales.

Para cada variable se calcularon las estadísticas descriptivas (media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimos y máximos), con el fin de caracterizar el comportamiento central y la dispersión de los datos dentro de cada parcela.

Posteriormente se aplicó un Análisis de Varianza de una vía (ANOVA) para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las parcelas. El ANOVA descompone la variabilidad total en dos fuentes: la variación entre tratamientos (entre parcelas) y la variación dentro de los tratamientos (error experimental). Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, si el valor-p resultante era menor a 0.05, se rechazaba la hipótesis nula de igualdad de medias.

Dado que el ANOVA fue significativo en las cuatro variables, se procedió con la prueba de comparación múltiple de Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*), que compara todas las posibles parejas de medias y determina cuáles difieren entre sí, controlando el error tipo I global. Se utilizó el estadístico *q* de la distribución del rango estudentizado con k = 4 grupos y 36 grados de libertad del error, y se calculó la Diferencia Mínima Significativa (DMS = 2.4197 para área foliar; 1.1808 para flores; y 1.7466 para peso). Las medias que no difieren estadísticamente se agrupan bajo la misma letra.

Número de hojas por planta. Esta variable mostró variación entre tratamientos. Las medias oscilaron entre 70 hojas (parcela 4) y 78 hojas (parcela 1). La prueba de Tukey agrupó a las parcelas 2 y 3 juntos (medias de 74 hojas; diferencia = 1.15, no significativa), mientras que La parcela 1 se destacó con la mayor producción de hojas y la parcela 4 fue el de menor producción, significativamente inferior a todos los demás. Este patrón sugiere que la parcela 1 favorece más activamente los procesos de producción de hojas, posiblemente por condiciones de luminosidad, temperatura o composición de sustrato más favorables.

Área foliar (cm²/planta). Las medias variaron entre 512.0 cm² (parcela 4) y 523.1 cm² (parcela 2), una diferencia absoluta de 11.1 cm². El ANOVA resultó altamente significativo ($F = 51.05$, $p < 0.0001$), indicando que al menos una parcela difiere del resto. La prueba de Tukey

reveló que La parcela 2 presentó el área foliar más amplia y fue estadísticamente superior a todos los demás. Las parcelas 1 y 3 no difirieron entre sí (diferencia = 0.60 cm^2, menor que la DMS = 2.42), agrupándose en la misma letra, aunque ambos sí fueron superiores a la parcela 4. La parcela 4 registró el menor desarrollo foliar, significativamente inferior a todas las demás parcelas. Los coeficientes de variación fueron bajos (< 1%), lo que indica una alta homogeneidad dentro de cada parcela y un experimento bien controlado.

Número de flores por planta. Esta variable mostró la mayor discriminación entre tratamientos, con un valor F = 92.71 ($p < 0.0001$), el más alto de las tres variables evaluadas. Las medias oscilaron entre 30.1 flores (parcela 4) y 37.3 flores (parcela 1). La prueba de Tukey agrupó a las parcelas 2 y 3 juntos (medias de 34.8 y 34.0, respectivamente; diferencia = 0.80, no significativa), mientras que la parcela 1 se destacó con la mayor producción floral y la parcela 4 fue el de menor producción, significativamente inferior a todos los demás. Este patrón sugiere que la parcela 1 favorece más activamente los procesos de floración, posiblemente por condiciones de luminosidad, temperatura o composición de sustrato más favorables.

Peso de la planta (g). El peso mostró un patrón inverso e interesante respecto a las otras variables: Las parcelas con mayor peso no coincidieron necesariamente con los de mayor área foliar o más flores. La parcela 4 fue el de mayor peso (85.1 g) y la parcela 1 el de menor peso (80.2 g), siendo esta diferencia significativa (F = 21.57, $p < 0.0001$). La prueba de Tukey indicó que las parcelas 2, 3 y 4 formaron subgrupos solapados —parcelas 2 y 3 no difirieron entre sí (diferencia = 1.0 g), ni las parcelas 2 y 4 (diferencia = 0.9 g)— mientras que la parcela 1 fue el único significativamente más ligero. Este comportamiento podría estar asociado a que una mayor producción floral (como en la parcela 1) implica una mayor inversión de recursos en reproducción, con menor acumulación de biomasa estructural.

Bellis sp. mostró una adecuada adaptación a las condiciones edafoclimáticas de Tixtla, Guerrero, alcanzando alturas promedio finales cercanas a los 70 cm y una tasa media de crecimiento de 16.26 mm $día^{-1}$. Las condiciones de iluminación, disponibilidad hídrica y ubicación de las parcelas influyeron significativamente en el crecimiento de las plantas, observándose un mejor desempeño en Las parcelas con menor sombreado y mejor distribución del agua. El patrón de crecimiento presentó una tendencia sigmoidal, con una fase de crecimiento acelerado entre los 21 y 35 días posteriores al trasplante y una desaceleración asociada al inicio de la etapa reproductiva.

La incidencia de plagas y enfermedades fue baja durante el ciclo de cultivo, permitiendo obtener una producción comercializable superior al 90%, lo que evidencia la viabilidad agronómica de la especie bajo condiciones de manejo tradicional.

La curva de crecimiento observada durante el estudio presentó una tendencia sigmoidal, caracterizada por una fase inicial de establecimiento, seguida por una etapa de crecimiento acelerado y posteriormente una desaceleración asociada al inicio de la floración. Este patrón ha sido ampliamente documentado en especies ornamentales pertenecientes a la familia Asteraceae, donde la transición del crecimiento vegetativo al reproductivo implica cambios fisiológicos relacionados con la distribución de fotoasimilados y la regulación hormonal del desarrollo (Zhang & Elomaa, 2021).

Las diferencias observadas entre parcelas sugieren una influencia importante de las condiciones microambientales sobre el crecimiento de las plantas. Las menores alturas registradas en la parcela 1 estuvieron asociadas a condiciones de sombreado parcial y pérdidas de humedad por escurrimiento superficial. La disponibilidad de luz constituye uno de los factores más importantes para la acumulación de biomasa y el desarrollo morfológico de especies ornamentales, debido a su efecto directo sobre la actividad fotosintética y la producción de foto asimilados.

El elevado porcentaje de producción comercializable obtenido durante el estudio (>90 %) refleja la eficacia del manejo agronómico implementado. Darras (2020) señala que el suministro adecuado de agua, junto con estrategias de manejo fitosanitario preventivo, constituyen factores determinantes para maximizar la calidad comercial en sistemas modernos de producción ornamental.

Asimismo, los resultados adquieren relevancia adicional debido al creciente interés científico por *Bellis perennis* como fuente de compuestos bioactivos. Albien y Stark (2023) reportaron la presencia de más de 300 metabolitos secundarios en esta especie, incluyendo flavonoides y compuestos fenólicos con actividad antioxidante y potencial aplicación farmacológica. Lo anterior amplía las perspectivas de aprovechamiento de *Bellis sp*. más allá de su valor ornamental tradicional.

El fenómeno de la parcela 1: presentó el mayor desarrollo en el número de hojas y flores. El compromiso alométrico (*Trade-off*) de la parcela 4: lo más interesante del análisis estadístico es que la parcela 4 tuvo la menor cantidad de hojas y flores, pero el mayor peso de planta

Finalmente, la adecuada adaptación observada en las condiciones de Tixtla sugiere que *Bellis sp*. representa una alternativa viable para diversificar la producción florícola regional, contribuyendo al fortalecimiento económico de pequeños productores y al desarrollo sostenible de la horticultura ornamental.

Conclusiones.

Los resultados obtenidos constituyen una base técnica para el manejo agronómico de *Bellis sp*. en la región de Tixtla y pueden contribuir al diseño de estrategias orientadas a incrementar la productividad y calidad comercial del cultivo.

La parcela 2 favoreció el mayor desarrollo foliar (523.1 cm^2/planta), superando significativamente a las parcelas 1, 3 y 4.

La parcela 1 promovió la mayor producción floral (37.3 flores/planta), siendo significativamente superior a todas las demás parcelas.

La parcela 4 acumuló el mayor peso de planta (85.1 g), en contraste con la parcela 1 que produjo las plantas más ligeras (80.2 g). Esto sugiere una posible compensación entre producción floral y acumulación de biomasa.

Ninguna parcela fue superior en todas las variables simultáneamente, lo que indica que los diferentes parcelas estimulan distintos aspectos del desarrollo de la planta. La selección de la parcela óptima dependerá del objetivo productivo: si se busca mayor floración, la parcela 1 es el recomendado; si se prioriza mayor área foliar, la parcela 2; y si el objetivo es mayor biomasa, la parcela 4.

Literatura citada

Albien, A.-L., & Stark, T. D. (2023). *(Bio)active Compounds in Daisy Flower (Bellis perennis). Molecules, 28*(23), 7716. https://doi.org/10.3390/molecules28237716

Darras, A. I. (2020). Implementation of sustainable practices to ornamental plant cultivation worldwide: A critical review. Agronomy, 10(10), 1570. https://doi.org/10.3390/agronomy10101570

Food and Agriculture Organization. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022.*

Mandel, J. R., Siniscalchi, C. M., Thapa, R., Watson, L. E., & Funk, V. A. (2022). *Phylogenomics and diversification of the sunflower family (Asteraceae). (Revista especializada en sistemática vegetal).*

Palazzesi, L., & Funk, V. A. (2022). Asteraceae as a model system for evolutionary studies: From fossils to genomes. Botanical Journal of the Linnean Society, 200(2), 143–164. https://doi.org/10.1093/botlinnean/boac032

Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). *Biostimulants in agriculture. Frontiers in Plant Science.*

Zhang, T., & Elomaa, P. (2021). Don't be fooled: False flowers in Asteraceae. Current Opinion in Plant Biology, 59, 101972. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.09.006

Producción de cuatro híbridos de lilis *(lilium spp.)* bajo estructura protegida en la Universidad Tecnológica de la Sierra Sur de Oaxaca

Lucero Jazmin García Cruz[16], Misael Navarro Aparicio, Daniel Alejandro Olivera Reséndiz, Ibeth Cortes Ángeles

Resumen

La producción de Lilium spp. bajo estructura protegida representa una alternativa para diversificar la floricultura en la Sierra Sur de Oaxaca; sin embargo, el comportamiento agronómico y la calidad comercial pueden variar entre híbridos, lo que dificulta la selección de materiales con mayor potencial productivo. El objetivo fue evaluar el comportamiento agronómico y la calidad floral de cuatro híbridos de Lilium spp. (Litowen, Flemington, Bataleon y Brindisi) bajo condiciones de estructura protegida. Se analizaron 480 observaciones, correspondientes a 120 plantas por híbrido, considerando altura de planta, número de botones florales, vida de anaquel, longitud de tallo y número de flores o botones por tallo. Los datos se sometieron a análisis de varianza de una vía y comparación múltiple de medias mediante Tukey (α=0.05). Se registraron diferencias altamente significativas entre híbridos para altura de planta ($F=1111.93$; $p<0.001$), botones florales ($F=260.91$; $p<0.001$), longitud de tallo ($F=752.24$; $p<0.001$) y flores o botones por tallo ($F=175.20$; $p<0.001$); la vida de anaquel no presentó diferencias significativas ($F=0.28$; $p=0.843$). Flemington presentó los mayores promedios de altura (115.14 cm), longitud de tallo (102.76 cm), botones florales (6.56) y flores o botones por tallo (6.58). Se concluye que Flemington mostró el desempeño agronómico y floral más favorable, mientras que Bataleon presentó un comportamiento intermedio. Los resultados evidencian diferencias productivas entre híbridos y permiten identificar materiales con potencial para la floricultura protegida regional.

Palabras clave: Calidad floral, híbridos, *Lilium spp*., estructura protegida.

Abstract.

The production of Lilium spp. under protected structures represents an alternative for diversifying floriculture in the Sierra Sur region of Oaxaca; however, agronomic performance and commercial quality may vary among hybrids, making it difficult to select materials with greater productive potential. The objective of this study was to evaluate the agronomic performance and floral quality of four Lilium spp. hybrids (Litowen, Flemington,

[16] Univeridad Tecnologica de la Sierra Sur de Oaxaca, Calle magnolia S/N, barrio la Soledad, Villa Sola de Vega CP. 71410, Oaxaca. Correo de correspondencia: garjazmin374@gmail.com

Bataleon, and Brindisi) under protected structure conditions. A total of 480 observations were analyzed, corresponding to 120 plants per hybrid, considering plant height, number of flower buds, vase life, stem length, and number of flowers or buds per stem. The data were subjected to a one-way analysis of variance and multiple mean comparison using Tukey's test (α=0.05). Highly significant differences among hybrids were recorded for plant height (F=1111.93; $p<0.001$), number of flower buds (F=260.91; $p<0.001$), stem length (F=752.24; $p<0.001$), and number of flowers or buds per stem (F=175.20; $p<0.001$); vase life showed no significant differences (F=0.28; p=0.843). Flemington presented the highest mean values for plant height (115.14 cm), stem length (102.76 cm), number of flower buds (6.56), and flowers or buds per stem (6.58). It is concluded that Flemington showed the most favorable agronomic and floral performance, while Bataleon exhibited intermediate performance. These results demonstrate productive differences among hybrids and allow the identification of materials with potential for protected floriculture in the region.

Keywords: Floral quality, hybrids, Lilium spp., protected structure.

Introducción.

La floricultura constituye una actividad de importancia dentro del sector agrícola debido a su capacidad para generar ingresos, empleo y oportunidades de diversificación productiva. La creciente demanda de flores ornamentales en los mercados nacionales e internacionales ha impulsado la búsqueda de especies con características comerciales favorables y sistemas de producción eficientes (Singh & Kumar, 2024). Dentro de este sector, el género Lilium destaca por su valor ornamental y comercial, debido a la diversidad de colores, formas, tamaños y a la duración de sus flores después de la cosecha, características que favorecen su aceptación en arreglos florales, eventos y decoración (Morales & Arbeláez, 2020).

El cultivo de Lilium spp. presenta ventajas agronómicas relacionadas con su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y con la posibilidad de obtener producción durante gran parte del año mediante un manejo adecuado. Sin embargo, su comportamiento puede variar de acuerdo con el material genético, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo implementadas. Factores como temperatura, radiación solar, humedad, disponibilidad de agua y nutrientes influyen directamente sobre el crecimiento vegetativo, desarrollo del tallo, formación de botones y calidad de las flores.

En este sentido, el cultivo bajo estructuras protegidas representa una alternativa para mejorar las condiciones de producción, debido a que permite controlar parcialmente variables ambientales como temperatura, humedad y radiación. Estas condiciones pueden favorecer el desarrollo vegetativo y reproductivo de las plantas, además de disminuir los efectos ocasionados por lluvias intensas, vientos, temperaturas extremas y algunos factores

relacionados con la presencia de plagas y enfermedades (Singh & Kumar, 2024; Hasan *et al*., 2025). Por ello, la producción protegida puede contribuir a obtener flores con mayor uniformidad y mejores características comerciales.

No obstante, la utilización de una estructura protegida no garantiza por sí misma una producción de alta calidad. La selección del híbrido constituye uno de los factores más importantes, debido a que existen diferencias genéticas relacionadas con la altura de planta, longitud del tallo, número de botones florales, número de flores por tallo, precocidad y vida de anaquel. Estas características determinan en gran medida la calidad comercial de la flor de corte. Por esta razón, la evaluación comparativa de diferentes híbridos permite identificar aquellos que presentan un mejor comportamiento bajo las condiciones ambientales y de manejo de una región determinada.

En el estado de Oaxaca, particularmente en regiones de clima templado-subtropical como la Sierra Sur, la floricultura protegida representa una oportunidad para diversificar los sistemas agrícolas y generar nuevas alternativas económicas para los productores. En el municipio de Villa Sola de Vega existe una producción limitada de algunas especies ornamentales, por lo que una parte de las flores comercializadas puede provenir de otras regiones. Esta situación representa una oportunidad para establecer cultivos ornamentales con potencial comercial, como Lilium spp., cuya producción local podría contribuir a incrementar la disponibilidad de flores, disminuir costos asociados al transporte y fortalecer el mercado regional.

La incorporación de Lilium spp. a los sistemas productivos de la región requiere conocer previamente qué materiales presentan mejores características agronómicas y comerciales bajo las condiciones locales. Entre las variables más importantes para evaluar se encuentran la altura de planta y la longitud del tallo, debido a su relación con la calidad de la flor de corte; el número de botones y flores por tallo, como indicadores del potencial productivo; y la vida de anaquel, debido a su importancia para la conservación de la calidad durante la comercialización. La evaluación conjunta de estas características permite realizar una selección más objetiva de los materiales con mejores posibilidades de adaptación y aceptación en el mercado.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el desarrollo fenológico, comportamiento agronómico y calidad floral de cuatro híbridos de *Lilium spp*. (Litowen, Flemington, Bataleon y Brindisi) bajo condiciones de cultivo protegido en Villa Sola de Vega, Oaxaca, mediante la evaluación de variables relacionadas con el crecimiento, producción y calidad de las flores. La información obtenida permitirá identificar el híbrido con mayor potencial productivo y comercial para las condiciones de la región, además de generar una alternativa de diversificación agrícola que contribuya al fortalecimiento de la

actividad florícola, al desarrollo económico de los productores y al abastecimiento de flores de calidad en el mercado local.

Materiales y métodos.

Área de estudio

La investigación se realizó bajo condiciones de estructura protegida en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de la Sierra Sur de Oaxaca (UTSSO), ubicada en el municipio de Villa Sola de Vega, región Sierra Sur del estado de Oaxaca, México. El sitio experimental se localiza aproximadamente entre los 16°30′ N y 97°59′ O, a una altitud cercana a 1,440 msnm., con una temperatura media anual aproximada de 18 °C. Estas condiciones corresponden a un ambiente templado-subtropical, en el cual la utilización de estructuras protegidas permite reducir el efecto de variaciones ambientales y favorecer condiciones más estables para el desarrollo del cultivo de *Lilium spp.*

Material vegetal y tratamientos

Se utilizaron bulbos calibre 14/16 de cuatro híbridos comerciales de *Lilium spp*. seleccionados por su importancia ornamental y potencial para la producción de flor de corte. Los tratamientos evaluados fueron: T1 = Litowen, T2 =Flemington, T3 = Bataleon y T4 = Brindisi. Para cada híbrido se evaluaron 120 plantas, obteniéndose un total de 480 unidades experimentales, equivalentes a un 10% en cada tratamiento.

Los bulbos fueron establecidos bajo las mismas condiciones de manejo agronómico y estructura protegida, con el propósito de comparar el comportamiento de los híbridos en un ambiente productivo homogéneo. La evaluación se enfocó en características relacionadas con el crecimiento vegetativo, producción floral y calidad comercial.

Manejo agronómico

El establecimiento del cultivo se realizó en cinco camas de producción de 20 m de longitud, 0.80 m de ancho y 0.20 m de profundidad. Previo al establecimiento se realizó la preparación de las camas y la incorporación de materia orgánica, con el objetivo de mejorar las condiciones físicas y nutrimentales del sustrato o suelo de cultivo.

El suministro de agua se efectuó mediante un sistema de riego por goteo, procurando mantener una disponibilidad adecuada de humedad durante las diferentes etapas fenológicas. Como parte del manejo cultural, se realizó un aporque a los 20 días después del establecimiento, con la finalidad de favorecer el desarrollo y soporte de las plantas. Debido al crecimiento y características morfológicas de Lilium spp., se implementó un sistema de tutoreo para mantener la verticalidad de los tallos y reducir el riesgo de acame.

La nutrición del cultivo se complementó mediante fertirriego con solución nutritiva Steiner, ajustado de acuerdo con las necesidades del cultivo. Durante la etapa de floración se mantuvieron valores de pH entre 5.5 y 6.2 y una conductividad eléctrica de 1.8 a 2.2 dS m^{-1}, con el propósito de mantener condiciones adecuadas para la disponibilidad y absorción de nutrimentos.

Como complemento al manejo nutrimental, se realizaron aplicaciones foliares de fosfitos, Agromil V y calcio, de acuerdo con el manejo establecido para el cultivo. Las actividades de riego, nutrición, tutoreo y manejo general fueron realizadas de manera uniforme para los cuatro híbridos, procurando reducir la influencia de factores externos sobre las variables evaluadas.

Variables evaluadas

El comportamiento agronómico y la calidad floral de los híbridos se determinaron mediante cinco variables:

Altura de planta (cm): se determinó mediante la medición desde la base de la planta hasta el punto de crecimiento o extremo superior del tallo.

Número de botones florales (botones $tallo^{-1}$): se contabilizó el número de botones florales desarrollados por planta o tallo evaluado.

Vida de anaquel (días): se registró como el número de días durante los cuales las flores conservaron características visuales adecuadas para su comercialización después de la cosecha.

Longitud de tallo (cm): se determinó mediante la medición de la longitud del tallo floral, expresada en centímetros.

Flores o botones por tallo (unidades $tallo^{-1}$): se contabilizó el número total de flores o botones presentes en cada tallo evaluado como indicador de productividad y calidad comercial.

Para cada híbrido se analizaron 120 observaciones, obteniéndose una base experimental de 480 registros para el conjunto de variables evaluadas.

Diseño experimental y análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó considerando un diseño completamente al azar, con un factor fijo correspondiente al híbrido y cuatro niveles: Bataleon, Brindisi, Flemington y Litowen. Para cada tratamiento se dispuso de 120 observaciones, para un total de 480 unidades experimentales.

Para cada variable de respuesta se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con el propósito de determinar la existencia de diferencias estadísticas entre los híbridos evaluados.

Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Además, se calcularon estadísticos descriptivos para cada híbrido, incluyendo media, desviación estándar y coeficiente de variación (CV).
Los análisis estadísticos se interpretaron considerando un nivel de significancia de 5 %, y los resultados se expresaron mediante medias y medidas de dispersión, acompañados de las respectivas pruebas de comparación múltiple cuando correspondió.

Resultados y discusión.
Con base en la evaluación agronómica de los cuatro híbridos de Lilium spp. (Litowen, Flemington, Bataleon y Brindisi) bajo condiciones de estructura protegida, se obtuvieron los siguientes resultados:

5.1. Altura total de planta.
De acuerdo con la primera gráfica, se observaron diferencias en el crecimiento vegetativo entre los híbridos evaluados. El híbrido Flemington presentó la mayor altura promedio, alcanzando los 115.4 cm, lo que indica un mayor vigor vegetativo. Le siguió Bataleon con una altura cercana a los 110 cm, mientras que Litowen y Brindisi registraron alturas similares alrededor de los 100–105 cm. Estos resultados muestran que todos los híbridos alcanzaron longitudes de tallo adecuadas para su comercialización como flor de corte, destacando Flemington por su mayor desarrollo.

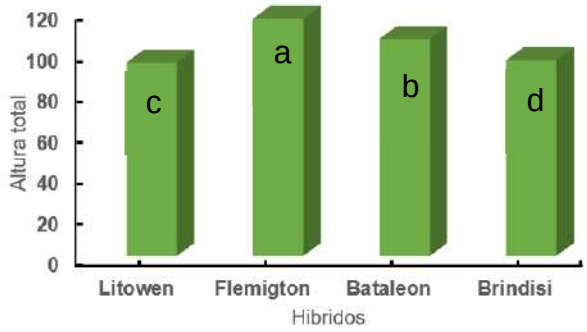


Figura 1 Altura de la planta.

Fuente. Elaboracion propia.

Número de botones florales

En la segunda gráfica se observa que el híbrido Flemington presentó el mayor número de botones florales, con aproximadamente 7 por tallo, seguido de Bataleon con cerca de 7. Litowen mostró un promedio de 5 botones, mientras que Brindisi presentó el menor número con aproximadamente 3 a 4 botones por planta. Este parámetro es clave en la calidad comercial, ya que un mayor número de botones incrementa el valor del producto en el mercado.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Benschop et al. (2010), quienes señalan que el número de flores por tallo en Lilium depende en gran medida del tamaño del bulbo, el potencial genético del cultivar y las condiciones ambientales durante el desarrollo. En su estudio, se menciona que los híbridos asiáticos pueden producir entre 4 y 9 flores por tallo bajo condiciones óptimas, lo cual es consistente con los valores obtenidos en Flemington y Bataleon en este proyecto.

Así mismo, De Hertogh y Le Nard (1993) indican que factores como la nutrición, especialmente el suministro adecuado de nitrógeno y potasio, así como el control de temperatura y luz, influyen directamente en la diferenciación floral y el número de botones. En este sentido, el manejo agronómico aplicado en el presente estudio, particularmente el uso de fertirriego y control ambiental, pudo haber favorecido la expresión del potencial productivo de los híbridos con mayor rendimiento.



Figura 2 Botón floral
Fuente. Elaboracion propia.

Vida de anaquel

Respecto a la vida de anaquel (tercera gráfica), los híbridos Flemington y Bataleon destacaron con una duración aproximada de 15 días, lo cual representa una excelente

capacidad postcosecha. Litowen presentó una vida de anaquel cercana a los 15 días, mientras que Brindisi mostró una menor duración, alrededor de 13 días. Estos resultados indican que la mayoría de los híbridos poseen buena resistencia y calidad postcosecha, características fundamentales para su comercialización.



Figura 3 Vida de anaquel
Fuente. Elaboracion propia

Los valores obtenidos coinciden con lo reportado por De Hertogh y Le Nard (1993), quienes señalan que la vida de florero en *Lilium spp*. puede oscilar entre 10 y 18 días, dependiendo del cultivar, el estado de corte y las condiciones de manejo postcosecha. En este sentido, los híbridos evaluados en el presente estudio se encuentran dentro de los rangos óptimos de calidad comercial, destacando Flemington y Bataleon por su mayor duración.

Asimismo, Reid y Jiang (2012) mencionan que la longevidad de las flores de corte está estrechamente relacionada con la acumulación de reservas en el tallo, la absorción de agua y la sensibilidad al etileno. Un adecuado manejo agronómico, como el suministro balanceado de nutrientes (especialmente calcio) y el corte en estado de botón, contribuye significativamente a prolongar la vida de anaquel. Esto concuerda con las prácticas implementadas en el presente proyecto, donde se aplicaron fertilizaciones específicas y se realizó el corte en el momento adecuado, favoreciendo la calidad postcosecha.

Conclusiones.

El presente proyecto demostró que la producción de Lilium spp. bajo condiciones de estructura protegida en la región de la Sierra Sur de Oaxaca presentó un comportamiento agronómico favorable bajo las condiciones de estructura protegida evaluadas, cumpliendo

satisfactoriamente con los objetivos planteados. La evaluación de los cuatro híbridos (Litowen, Flemington, Bataleon y Brindisi) permitió identificar un comportamiento agronómico favorable en todos los materiales vegetales, destacando su adecuada adaptación a las condiciones ambientales y al manejo implementado.

En términos productivos, los resultados evidenciaron que los híbridos alcanzaron parámetros de calidad competitivos en el mercado, tales como longitud de tallo, número de botones florales y vida de anaquel, clasificándose principalmente en categorías de calidad extra y primera. Flemington y Bataleon sobresalieron en variables clave como altura, número de botones y vida postcosecha, lo que los posiciona como materiales altamente recomendables para su producción comercial. No obstante, los demás híbridos también mostraron características aceptables, lo que amplía las opciones productivas para los floricultores.

Desde el enfoque económico, el proyecto logró una comercialización exitosa, evidenciada por la buena aceptación del producto en el mercado local y regional. Esto permitió no solo la recuperación de la inversión inicial, sino también demostrar el potencial rentable del cultivo bajo un sistema tecnificado, contribuyendo al fortalecimiento de la floricultura como alternativa productiva en la región.
En conclusión, el cultivo de lilis bajo estructura protegida representa una estrategia sustentable y rentable, capaz de generar productos de alta calidad y valor comercial. Asimismo, este estudio aporta información relevante para la toma de decisiones en futuros proyectos, promoviendo la adopción de tecnologías que optimicen la producción y fortalezcan el desarrollo del sector ornamental

Literatura citada.

Soriano, J. (1991). Plantas bulbosas en jardinería. España: Valencia: Floraprint, D.L.

Promesse de Fleurs. Lilium Bataleon — Lirio asiático, Lilium asiático. Descripción de la variedad, características de la flor y datos de cultivo. Disponible en: https://www.promessedefleurs.es/bulbos-de-verano/bulbos-de-verano-por-variedad/lilium-lirios/lirios-hibridos/lilium-bataleon-lirio-asiatico-lilium-asiatico.html

Sistema Integral de Información Agropecuaria y Pesquera. 2007. http//www.siap.sagarpa.gob.mx SIAP. 2011. "La floricultura en México". Publicado 10 agosto de 2012.

SIAP. 2018. "Flores mexicanas: un gran detalle que fortalece el crecimiento económico del país".

Publicado 13 de febrero de 2018.

Rimache A., M. 2009. Floricultura. Cultivo y comercialización. 1ª ed. Ed. Starbook.

España. 163- 181 pp.

Gómez L., R.F. 2008. Manual de producción Lilium asiático. SAGARPA. Fundación Produce Chiapas A.C. Edición: JF Soluciones Estratégicas.

Vidalie, H. 2001. "Producción de flores y plantas ornamentales". 3ª ed. Ed. Mundi Prensa.

España.221-224 pp.

Reyes (2009) explican cómo los invernaderos permiten controlar temperatura, humedad y radiación, reduciendo riesgos climáticos.

Benschop et al. (2010) y De Hertogh & Le Nard (1993) describen la importancia global de los bulbos ornamentales y su mercado.

Benschop, M., Kamenetsky, R., Le Nard, M., Okubo, H., & De Hertogh, A. (2010). The global flower bulb industry: Production, utilization, research. *Horticultural Reviews*, *36*, 1–115. https://doi.org/10.1002/9780470527238.ch1

Reid, M. S., & Jiang, C. Z. (2012). Postharvest biology and technology of cut flowers and potted plants. *Horticultural Reviews*, *40*, 1–5

Producción sostenible de lechuga (*Lactuca sativa* L.) a campo abierto

Mercedes María Cuenca-Condoy[17], Bruno Laureano-Ahuelicán[18], Fidel Carreto-Adame[19]

Resumen

La producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) a campo abierto enfrenta severas limitaciones económicas debido a hongos fitopatógenos de suelo como *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*, *Sclerotinia sclerotiorum* y *Rhizoctonia* sp., los cuales provocan marchitez vascular, mohos y pudriciones radiculares que demeritan el rendimiento y la calidad comercial de la cosecha. Frente a la resistencia química y a la necesidad de la producción sostenible para satisfacer el mercado actual, el uso de herramientas microbiológicas surge como una alternativa eficiente. Esta investigación analizó el impacto del uso de microorganismos fitomejoradores (cepas seleccionadas de *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas protegens*) en el cultivo de lechuga variedad Pedrola bajo el enfoque de doble beneficio: biocontrol y bioestimulación. Por un lado, se detalla el efecto en la protección contra la podredumbre blanca mediante micoparasitismo y antibiosis, logrando una reducción significativa en el porcentaje de mortalidad de las plantas. Por otro lado, se evalúa cómo la colonización radicular optimiza la asimilación de nutrientes, traduciéndose en un incremento directo del peso fresco del producto agrícola.

Palabras clave: Biocontrol, Bioestimulación, *Trichoderma*, *Bacillus* y *Pseudomonas*.

Abstract

Open-field lettuce (*Lactuca sativa*) production faces severe economic constraints due to soil-borne phytopathogenic fungi such as *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*, *Sclerotinia sclerotiorum*, and *Rhizoctonia* sp., which cause vascular wilt, mold and root rot that degrade yield and commercial crop quality. In response to chemical resistance and the demand for sustainable production to satisfy current market needs, the use of microbiological tools emerges as an efficient alternative.

[17] Departamento de Preparatoria Agrícola, Área de Agronomía, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5, Carretera México-Texcoco, 56230, Texcoco, México. mcuencac@chapingo.mx
[18] Departamento de Preparatoria Agrícola, Área de Agronomía, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5, Carretera México-Texcoco, 56230, Texcoco, México. blaurenoa@chapingo.mx
[19] Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5, Carretera México-Texcoco, 56230, Texcoco, México. al21100031@chapingo.mx

This research analyzed the impact of beneficial microorganisms (selected strains of *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas protegens*) on 'Pedrola' variety lettuce cultivation under a dual-benefit approach: biocontrol and biostimulation. On one hand, it details the protective effect against white mold through mycoparasitism and antibiosis, achieving a significant reduction in plant mortality rates. On the other hand, it evaluates how root colonization optimizes nutrient assimilation, resulting in a direct increase in fresh produce weight.

Key words Biocontrol, Biostimulation, *Trichoderma*, *Bacillus* y *Pseudomonas*.

Introducción

La agricultura actual se enfrenta a numerosos retos, entre los que destaca la capacidad de alimentar a la creciente población humana mediante una producción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

En el agroecosistema, los microorganismos endófitos, epífitos y rizosféricos desempeñan roles clave al establecer relaciones mutualistas con la planta. Estas interacciones mejoran la productividad mediante la solubilización de nutrientes, síntesis de fitohormonas, inducción de resistencia sistémica (ISR) y el antagonismo directo contra agentes fitopatógenos. La aplicación exógena y dirigida de estos microorganismos benéficos permite reconfigurar las poblaciones rizosféricas de forma positiva. Aunque géneros como *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp., se han estudiado de forma aislada, su integración en consorcios microbianos ofrece un potencial superior debido a las sinergias metabólicas que surgen entre hongos y bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPM).

El cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) a campo abierto es altamente susceptible a hongos fitopatógenos de suelo como *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*, *Sclerotinia sclerotiorum* y *Rhizoctonia* sp., los cuales provocan marchitez vascular, mohos y pudriciones radiculares que demeritan el rendimiento y la calidad comercial de la cosecha. El Campo Experimental San Ignacio del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo no es la excepción, debido a que el historial de los lotes muestra daños persistentes por complejos fúngicos debido al uso intensivo, a la compactación y a la pérdida de materia orgánica en el suelo. El manejo biológico mediante la inoculación dirigida de *Trichoderma harzianum*, *T. viride*, *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas protegens* representa una alternativa sostenible viable. Al contar con múltiples mecanismos supresores (micoparasitismo, antibiosis, competencia de nicho), estos microorganismos impiden la generación de resistencia en comparación con los fungicidas sintéticos, estimulando al mismo tiempo la arquitectura radicular y optimizando la asimilación de nitrógeno y fósforo.

El objetivo de la investigación consistió en evaluar el efecto de *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viride*, *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas protegens* en el cultivo de lechuga variedad Pedrola.

Materiales y métodos

Ubicación del ensayo e inóculos utilizados

El estudio se realizó en el Lote 7, sección noreste del Campo Experimental San Ignacio del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (19°29'07.1" N, -098°53´17.2" W). Se empleó semilla de lechuga (*Lactuca sativa* L.) de la variedad Pedrola. Los agentes biológicos evaluados consistieron en las cepas fúngicas *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride*, junto con las cepas bacterianas *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas protegens*.

Producción de plántula y trasplante

La fase de semillero se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero empleando un sustrato comercial a base de *peat moss* y vermiculita (proporción 3:1 v/v). La siembra se realizó el 8 de octubre de 2025 en charolas de poliestireno de 200 cavidades (una semilla por cavidad) a una profundidad de 2 mm. Se programaron dos riegos diarios por nebulización empleando una solución nutritiva estándar.

La preparación del lote en campo incluyó barbecho, paso de rastra y surcado a una distancia entre hileras de 85 cm. Previo al trasplante, se acondicionaron las camas eliminando terrones, se colocó cintilla de goteo y se aplicó riego abundante para proporcionar humedad suficiente para el trasplante. El trasplante se realizó a los 30 días de la siembra, a una separación entre plantas de 25 cm y a doble hilera.

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas con 4 repeticiones.

Parcelas grandes (Factores en plántula), correspondieron a cuatro dosis de la mezcla comercial de *Trichoderma harzianum* + *Trichoderma viride* aplicadas por inmersión de charolas durante 15 segundos en 40 L de solución a los 25 días de la siembra:

TA: Testigo absoluto (agua).

TB: 2.5 mL de la mezcla por litro de agua.

TC: 3.5 mL de la mezcla por litro de agua.

TD: 5.0 mL de la mezcla por litro de agua.

Subparcelas / Parcelas pequeñas (Factores en campo): se evaluaron tres estrategias de manejo durante el trasplante y desarrollo vegetativo:

T1 (Fertilización local): Aplicación manual de fertilizante inorgánico convencional (50% N, 100% P y 100% K a los 10 días del trasplante; 50% N restante a los 40 días).

T2 (Microorganismos fitomejoradores): Aplicación en el trasplante mediante inmersión de plántulas en una solución de 5 mL de *Pseudomonas protegens* / 1 L de agua, por 15 segundos. A los 5 días de trasplante en drench solución de 5mL de *Trichoderma harzianum+Trichoderma viride* /1 L de agua, a razón de 50 mL por planta. A los 10 días de trasplante en drench solución de 5mL de *Trichoderma harzianum+Trichoderma viride+ Bacillus megaterium* /1 L de agua, 50 mL por planta. A los 30 días de trasplante en drench solución de 5mL de *Trichoderma harzianum+Trichoderma viride+ Bacillus megaterium* /1 L de agua, 50 mL por planta.

T3 (Fertilización local+Microorganismos fitomejoradores): Combinación secuencial e intercalada de los microorganismos benéficos del T2 junto con las dosis de la fertilización química local del T1.

La unidad experimental para la parcela grande constó de 20 charolas (80 charolas en total en el ensayo), para lograr una densidad poblacional de 12,000 plantas distribuidas en 15 surcos en campo. Para las subparcelas, la unidad experimental se conformó por cinco surcos de 100 m de longitud, con un total de 4,000 plantas por subparcela (800 plantas por surco). Se realizó la aleatorización completa de los tratamientos previo al establecimiento en campo.

Variables para evaluar

Mortalidad de plantas. A los 20 días del trasplante, en cada unidad experimental (UE) se contaron las plantas muertas cuyos síntomas se asociaron a los fitopatógenos de suelo. Además, se tomaron muestras para aislar e identificar los hongos en medio de cultivo PDA en el laboratorio, y se calculó el porcentaje de mortalidad por UE.

Peso de lechuga en fresco. Una vez alcanzada la madurez de cosecha de la lechuga, se realizó el corte con navaja a nivel del suelo y se pesó en bascula granataria, se registró la estimación promedio por pieza por UE.

Análisis de datos

Se realizó análisis estadístico, el análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación múltiple de medias con el método de Tukey (α=0.05) utilizando el software estadístico R.

La eficacia de los tratamientos en el efecto de protección contra hongos fitopatógenos ubicados en el suelo se estimó con la fórmula de Abbott (1),

$$Eficacia\ (\%) = \frac{IT-it}{IT} * 100 \qquad (1)$$

Dónde: IT= % mortalidad del tratamiento local (T1) e it = % mortalidad del tratamiento.

Resultados y discusión

Hongos fitopatógenos

A los 20 días del trasplante se evidenciaron en campo plantas con marchitez, necrosis progresiva y amarillamientos generalizados. Al efectuar cortes longitudinales y transversales en el cuello de la planta, se detectó una marcada coloración rojiza en los haces vasculares, sintomatología estrechamente vinculada a los daños por *Fusarium* sp. reportados recientemente por Aguilar-Anccota et al. (2024) en *Lactuca sativa* L.

El aislamiento en laboratorio de las muestras de tejido vegetal sintomático en medio PDA dio como resultado el desarrollo de colonias algodonosas de micelio blanco con presencia de macroconidios septados y curvados, características distintivas del género *Fusarium* sp. (Tapia y Amaro, 2014).

Mortalidad de Plantas

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) a la variable porcentaje de plantas muertas por UE, el cual registró que las dosis de inoculación profiláctica con *Trichoderma* spp. en plántula (parcela grande), así como la interacción entre los tratamientos de invernadero y de campo (parcela grande \ subparcela), no manifestaron efectos estadísticamente significativos sobre la supervivencia del cultivo. Por el contrario, la aplicación de los microorganismos benéficos programada directamente en campo (subparcelas) registró un efecto significativo en la supresión de la enfermedad ($P < 0.0134$).

La prueba de Shapiro-Wilk confirmó la normalidad en la distribución de los datos de mortalidad. Como se aprecia en la figura 1, la prueba de comparación de medias HSD de Tukey diferenció tres grupos estadísticos: el mayor índice de mortalidad de plantas se concentró en el tratamiento T1 (fertilización convencional sin biológicos) alcanzando un valor promedio de 2.25%.

El tratamiento de microorganismos benéficos sin adición de síntesis química (T2) registró la mayor protección de plantas en campo al observarse menor número de plantas muertas por síntomas asociados a patógenos del suelo, y que mediante diagnostico taxonómico en laboratorio se determinó una gran abundancia de *Fusarium* sp.

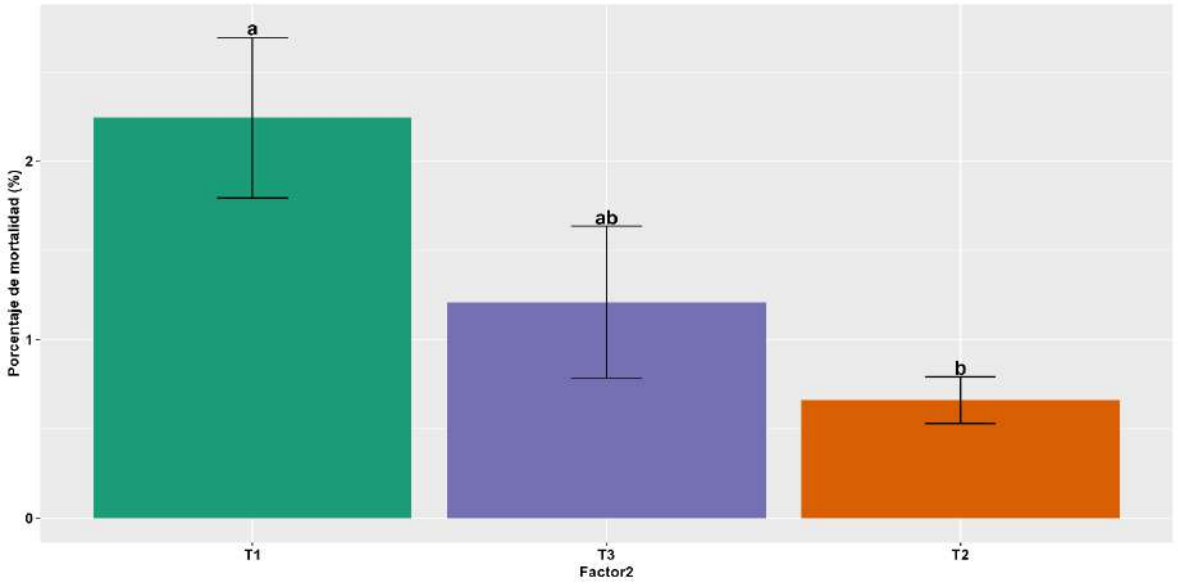


Figura 1. Efecto de los tratamientos en porcentaje de mortalidad de plantas asociados a patógenos de suelo.

Los efectos de control de *T. harzianum* y *T. viride* responden a la multifuncionalidad de las cepas evaluadas. De acuerdo con Oyesola et al. (2024), *T. harzianum* y *T. viride* suprimen el crecimiento del patógeno combinando competencia por espacio y nutrientes, micoparasitismo destructivo, antibiosis y la inducción de las rutas de defensa endógenas de la planta. Manayay *et al*., (2016) demostraron el efecto antagónico de *Trichoderma viridae* y cepa de *Trichoderma* sp., en el crecimiento de *Fusarium* sp., al aplicar estos microrganismos observaron disminución en el número de plantas muertas de jitomate.

Respecto al efecto de protección a hongos fitopatógenos localizados en el suelo, el tratamiento T2, registró el menor número de plantas muertas con una eficacia del 71 % en comparación con el tratamiento local (T1) que correspondió a solo fertilizar el cultivo sin la aplicación de los controladores biológicos. Al combinar estos microrganismos con insumos como los fertilizantes químicos la eficacia disminuye. Por lo anterior, es conveniente analizar el uso de fuentes alternativas en la fertilización como los solubles.

Peso de lechuga en cosecha

Se inoculó de forma dirigida a la bacteria *Pseudomonas protegens* en las raíces de las plántulas durante el trasplante con el propósito de mitigar el estrés post-trasplante y promover el desarrollo radicular, efectos descritos por Mercado-Vargas et al. (2022) en plántulas de Jamaica y calabaza. Adicionalmente, Sánchez y Guerra (2022) concluyen que el género *Pseudomonas* estimula el vigor vegetal mediante la producción de ácidos orgánicos capaces de solubilizar las partículas de fósforo insolubles en el suelo, volviéndolo asimilable para las plantas.

Al alcanzar la madurez fisiológica a los 70 días del trasplante, se evaluó el peso fresco de las lechugas en las UE. Coincidiendo con la variable de mortalidad, las dosis de *T. harzianum* y *T. viride* aplicadas previamente en la etapa de invernadero (parcelas grandes) y su respectiva interacción con el campo no modificaron de forma significativa el rendimiento. Sin embargo, las aplicaciones biológicas directas en las subparcelas de campo indujeron diferencias estadísticas altamente significativas en el peso comercial.

La prueba de comparación múltiple de medias HSD de Tukey (α=0.1) (Figura 2) determinó tres grupos estadísticos. El incremento en peso de lechuga se consolidó en el tratamiento T3, donde se intercalaron aplicaciones programadas de los microorganismos fitomejoradores (*T. harzianum*, *T. viride*, *P. protegens* y *B. megaterium*) con las dosis de fertilización química de uso local. La adición integrada de los microorganismos potenció sustancialmente la biomasa final respecto al testigo convencional químicos puros. Este sinergismo valida la hipótesis de Poveda y Eugui (2022), quienes señalan que los consorcios fúngico-bacterianos optimizan la absorción de nitrógeno y fósforo, activan fitohormonas de crecimiento y sideróforos, traduciéndose en un incremento directo del peso comercial y uniformidad de la lechuga Pedrola en campo abierto.

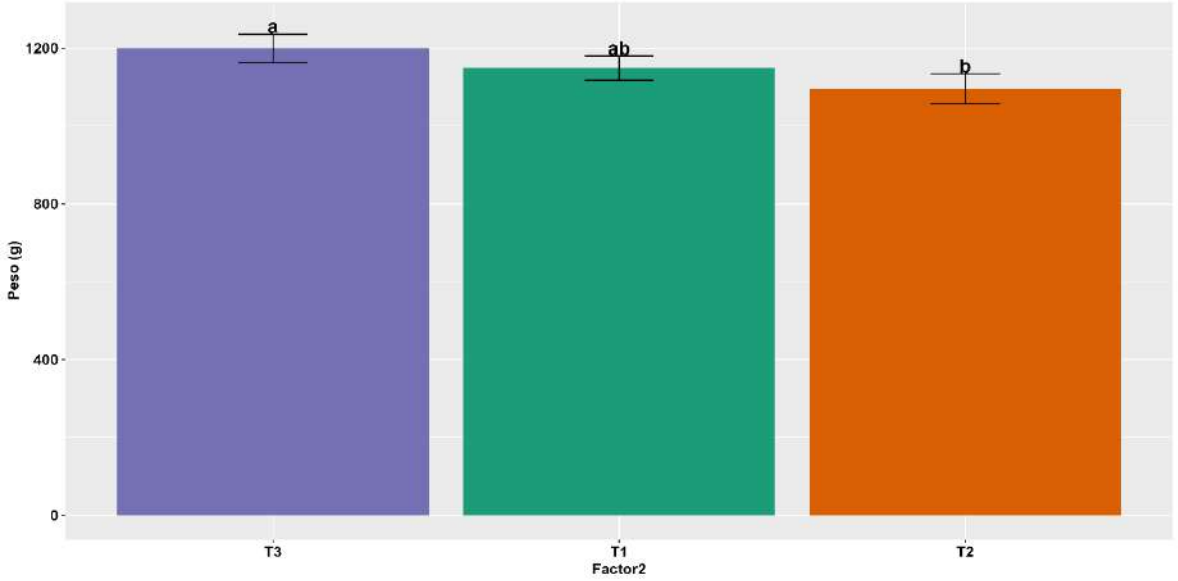


Figura 2. Efecto de los tratamientos en el peso de lechugas cosechadas.

Conclusiones

El uso de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* controló eficazmente al hongo fitopatógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae* en el cultivo de lechuga mediante competencia, micoparasitismo y antibiosis. Asimismo, *Pseudomonas protegens* inhibió el crecimiento del patógeno a través de antibiosis, mientras que *Bacillus megaterium* actuó como bioestimulante, favoreciendo el desarrollo radicular y la fijación de nitrógeno gracias a la producción de enzimas y compuestos antimicrobianos.

La aplicación de estos microorganismos debe ser preventiva en plántula y en las etapas de desarrollo vegetativo del cultivo, otro beneficio que se observó fue el crecimiento de las plantas reflejado en la ganancia en peso fresco en etapa de madurez de cosecha, debido a que promueven diversas sustancias como sideróforos y activación de hormonas de crecimiento, así como promover la tolerancia a condiciones de estrés hídrico o térmico.

Para asegurar la máxima eficacia y colonización de estos microorganismos fitomejoradores en la rizosfera de la lechuga, se sugiere utilizar fertilizantes solubles con bajo índice salino, evitando así la inhibición de su crecimiento.

Literatura citada

Aguilar-Anccota, R., Guillen-Juárez, A. C., Maldonado-Duque, E., Rafael-Rutte, R., Silupú-Masías, J. A., Calle-Cheje, Y. H., & Morales-Pizarro, A. (2024). Enfermedades fungosas asociadas al cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y alternativas de control químico *in vitro* y en condiciones hidropónicas. *Manglar*, *21*(4), 517-527.

Manayay, C. A. L., Córdova, L. M., & García, J. W. (2016). Efecto antagónico de una cepa de *Trichoderma* sp. sobre *Fusarium* sp. en planta de tomate Río Grande (*Solanum lycopersicum*). *UCV-HACER. Revista de Investigación y Cultura*, *5*(1), 64-68.

Mercado-Vargas, T. J., Chávez-Díaz, I. F., Zelaya-Molina, L. X., Aragón-Magadán, M. A., Ceballos-Álvarez, A., & Reséndiz-Venado, Z. (2022). Potencial agrobiotecnológico de *Pseudomonas protegens* en diferentes cultivos mexicanos. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México*, *10*(1), 29-35.

Oyesola, O. L., Tonjock, R. K., Bello, A. O., Taiwo, O. S., & Obembe, O. O. (2024). *Trichoderma*: A review of its mechanisms of action in plant disease control. *Preprints*.

Poveda, J., & Eugui, D. (2022). Fungal-bacterial consortia as advanced tools for plant growth promotion and biocontrol in modern agriculture. *Microbiological Research*, *261*, Article 127071.

Sánchez, C. R., & Guerra, R. P. (2022). *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *13*(4), 715-725.

Tapia, C., & Amaro, J. (2014). Género *Fusarium*. *Revista Chilena de Infectología*, *31*(1), 85-86.

Umesha, S., Singh, P. K., & Singh, R. P. (2018). Microbial endophytes and epiphytes: Mutualistic relations and plant productivity. *Frontiers in Plant Science*, *9*, Article 1102.

Tratamientos pregerminativos en semillas de chile tusta (*Capsicum annuum* L.)

Sagrario Esteva-Martínez[20], Isidro Morales-García[21], Beatriz Quiroz-González[22]

Resumen

El chile tusta (*Capsicum annuum* L.) es un cultivo endémico del estado de Oaxaca y existe limitada información sobre su germinación. El objetivo fue evaluar parámetros de germinación y longitud de hipocótilo y radícula mediante diferentes tratamientos pregerminativos en semillas de chile tusta. Se realizó un diseño completamente aleatorizado; los tratamientos fueron: T1) Control (sin inmersión); T2) Agua destilada; T3) KNO_3 al 0.5%; T4) KNO_3 al 1%; y T5) KNO_3 al 1.5%, la inmersión fue de 24 h. Se tuvieron cuatro repeticiones con diez semillas por unidad experimental. Se evaluó el porcentaje, índice y velocidad de germinación, longitud de hipocótilo y de radícula. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de Tukey ($p < 0.05$). En el porcentaje de germinación hubo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, el T5 mostró mayor germinación (95%) seguido del T4 (92.5%). El índice de germinación fue mayor en T1 (14.83) seguido del T5 (12.8). La velocidad de germinación (semillas.día^{-1}) fue mayor para el T5 (0.38), seguido del T4 (0.37). Para la longitud de hipocótilo y radícula los tratamientos mostraron diferencias estadísticas significativas. El valor mayor en longitud de hipocótilo lo tuvo el T3 (26.54 mm) y para longitud de radícula, el T5 (12.89 mm). La inmersión de semillas en KNO_3 al 1.5% durante 24 h, tuvo los mayores valores de germinación y longitud de hipocótilo y radícula, por lo tanto, su uso es viable para mejorar la germinación de semillas y crecimiento inicial de plántulas de chile tusta.

Palabras clave: *Capsicum annuum* L., chile tusta, germinación, KNO_3, crecimiento inicial.

Abstract

The tusta chili pepper (Capsicum annuum L.) is a crop endemic to the state of Oaxaca, and limited information is available regarding its germination. The objective was to evaluate germination parameters and hypocotyl and radicle length using different pre-germination treatments on tusta chili pepper seeds. A completely randomized design was used; the

[20] Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. sestevam2600@alumno.ipn.mx
[21] Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. imoralesg@ipn.mx
[22] Instituto Politécnico Nacional-SECIHTI. bquirozg@ipn.mx 0000-0002-1573-3202

treatments were: T1) Control (no immersion); T2) Distilled water; T3) 0.5% KNO_3; T4) 1% KNO_3; and T5) 1.5% KNO_3, with a 24-hour immersion period. There were four replicates with ten seeds per experimental unit. Germination percentage, index, and rate, as well as hypocotyl and radicle length, were evaluated. An analysis of variance and a Tukey test ($p < 0.05$) were performed. There were statistically significant differences in germination percentage among treatments; T5 showed the highest germination (95%), followed by T4 (92.5%). The germination index was highest in T1 (14.83), followed by T5 (12.8). The germination rate (seeds·day^{-1}) was highest for T5 (0.38), followed by T4 (0.37). For hypocotyl and radicle length, statistically significant differences were observed among treatments. The highest hypocotyl length was observed in T3 (26.54 mm), and the highest radicle length was also observed in T5 (12.89 mm). Soaking seeds in 1.5% KNO_3 for 24 hours resulted in the highest germination rates and hypocotyl and radicle lengths; therefore, this method is viable for improving seed germination and the early growth of tusta chili seedlings.

Keywords: *Capsicum annuum* L., tusta chili, germination, KNO3, early growth.

Introducción

Mesoamérica, es reconocida como centro de origen y domesticación de cultivos de importancia mundial; dentro de ellos el chile (Rincón et al., 2010). El género Capsicum incluye cinco especies domesticadas, de las cuales *Capsicum annuum* L. abarca la mayoría de variedades de chile en México y es el más importante desde los puntos de vista económico y agrícola (Lira et al., 2016). De acuerdo a Rincón et al. (2010), Oaxaca cuenta con al menos 25 de los 90 tipos de chile reportados para México, entre los que se encuentra el chile Tusta (*Capsicum annuum* L.). Este cultivo se produce en la Sierra Sur y en el Mixe Bajo, de 600 a 1,200 msnm, en climas tropicales y subtropicales; se establece bajo temporal, en superficies de siembra de 3,000 a 5,000 m^2 con tecnología tradicional basada en el uso mínimo de agroquímicos (López & Montes, 2006).

La germinación de semillas de chiles, asociada a la impermeabilidad de su testa, es uno de los factores que limita su propagación (Prado-Urbina et al., 2015). Se ha reportado que el uso de tratamientos pregerminativos en especies de *Capsicum* con dificultad para germinar ayuda a romper la latencia e incrementar los porcentajes de germinación (Beltrán-Burboa et al., 2019), alcanzando rangos de 40% hasta el 90% (Araiza Lizarde et al., 2011) en condiciones tanto óptimas como adversas (Hacisalihoglu y Ross, 2010). En este sentido, Poudel et al., (2024) evaluaron distintos tratamientos pregerminativos con semillas de *Capsicum frutescens*, e indicaron que, el tratamiento con KNO_3 al 3% mejora la emersión de raíces (3.567 cm), longitud de brotes (2.90 cm) y la germinación en un 50%. Por su parte Granada et al. (2024) evaluaron diferentes tratamientos pregerminativos sobre cuatro cultivares recolectados de *Capsicum* y concluyen que el mejor tratamiento fue inmersión en KNO_3 al

3% durante 96 h, con los valores más altos en el crecimiento de la planta, índice de vigor simple, índice de germinación de desarrollo, concentración de antioxidantes en las hojas y el contenido de proteínas en las semillas para los cuatro cultivares. Como se ha descrito anteriormente, en diversos estudios se menciona que el uso del KNO_3 aumenta la germinación de diversos cultivos. Sin embargo, hasta ahora no se ha reportado algún estudio sobre el efecto del KNO_3 en el cultivo de chile tusta, a pesar de ser un producto endémico y rentable para los agricultores.

Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue evaluar el acondicionamiento hídrico (agua destilada) y osmótico (KNO_3), sobre los parámetros de germinación y longitud de hipocótilo y radícula.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio experimental se desarrolló en el Laboratorio de Alimentación, Nutrición y Desarrollo Sostenible (17.0265° N, 96.7196° W) del IPN – CIIDIR, Unidad Oaxaca, en Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, durante los meses junio y julio de 2026.

Material vegetal

Se recolectaron frutos con madurez fisiológica en plantas nativas de chile tusta en San Baltazar Loxicha, Oaxaca (16°48’37.22’’ N, 96°41’33.36’’O; 1488 msnm). La colecta se realizó en octubre de 2025. Se seleccionaron los frutos con mayor tamaño, sin síntomas de afectación por plagas y enfermedades y con las mejores características físicas. Posteriormente, los frutos se abrieron manualmente para extraer las semillas y eliminar las impurezas (pericarpio); las semillas se dejaron secar durante un día a la sombra y se almacenaron en un frasco de vidrio. Del lote obtenido, se seleccionaron 200 semillas considerando que tuvieran su color característico (amarillo), sin daños mecánicos, mayor tamaño y peso.

Diseño experimental y establecimiento

El experimento se realizó bajo un diseño completamente aleatorizado (DCA) con cinco tratamientos (Cuadro 1) cada uno con cuatro repeticiones, con diez semillas por repetición.

Cuadro 1. Tratamientos pregerminativos de semillas de chile tusta.

Tratamiento	Descripción	Tiempo de inmersión (h)
T1 (control)	----------	0
T2	Agua destilada	24
T3	KNO_3 al 0.5%	24

T4	KNO_3 al 1.0%	24
T5	KNO_3 al 1.5%	24

Fuente: Elaboración propia.

Para el establecimiento de los tratamientos T3, T4 y T5. En matraces de vidrio de 500 mL se vertieron 0.5 L de agua destilada estéril a cada uno y se añadieron 2.5 g, 5 g y 7.5 g de KNO_3 (Fermont PA Cert) respectivamente. Tras disolver el reactivo, se introdujeron 40 semillas por tratamiento y se mantuvieron en inmersión durante 24 h, cada matraz fue cubierto con papel aluminio para evitar la entrada de impurezas.

Transcurrido el periodo de inmersión para cada tratamiento, las semillas se recuperaron con un colador, se enjuagaron con agua destilada estéril y se colocaron en cajas Petri de 8.5 cm de diámetro, con papel filtro de poro cerrado humedecido con 10 mL de agua destilada estéril. Para el T1(control) las semillas se colocaron secas y de forma directa en las cajas Petri.

Las cajas Petri se cerraron y se cubrieron con una tela de color negro para mantener la obscuridad. El papel filtro de cada caja Petri se humedeció cada vez que se requiriera. La temperatura se registró diario mediante un Datalogger Elitech®. El registro de la germinación para cada tratamiento se realizó cada 24 h durante 25 días; registrando como germinadas, las semillas con protrusión radicular visible (Garruña-Hernández et al., 2014).

Variables evaluadas

El porcentaje de germinación se calculó con la fórmula de El-Sanatawy et al., (2021):

$$Porcentaje\ de\ germinación = \frac{Total\ de\ semillas\ germinadas}{Número\ total\ de\ semillas} \times 100 \qquad (1)$$

El índice de germinación se obtuvo con la fórmula empleada por Prado-Urbina et al., (2015):

$$IG = \frac{\sum(n * t)}{NTS} \qquad (2)$$

Donde: **n** es el número de semillas germinadas en el día, **t** es el número de días después de la siembra y **NTS** es el número de semillas sembradas.

La velocidad de germinación se calculó de acuerdo a Prado-Urbina et al., (2015):

$$VG = \frac{\sum n}{t} \qquad (3)$$

Donde: **n** es el número de semillas germinadas y **t** es el tiempo de germinación en días, desde la siembra hasta la germinación de la última semilla.

La longitud del hipocótilo y de la radícula se midió con un calibrador vernier digital HER-411 (Steren®). De acuerdo con la metodología de Rumbidzai et al. (2024), el hipocótilo se evaluó desde la corona de la radícula hasta la inserción de los cotiledones, mientras que la longitud de la radícula se midió desde la corona hasta la punta de la radícula.

Análisis estadístico

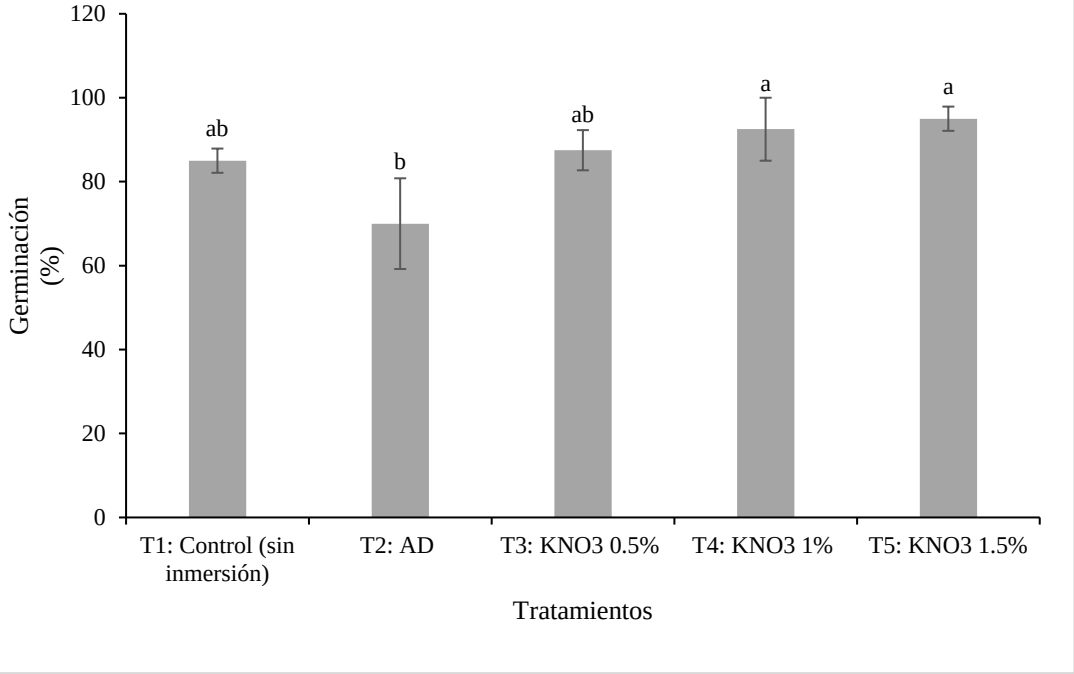
El análisis de los datos obtenidos se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias entre tratamientos y la comparación de medias utilizando la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Los análisis se realizaron con el programa estadístico SAS versión 9.1 (SAS Institute, 2004).

Resultados y discusión

La temperatura promedio registrada durante el periodo de evaluación fue de 24.0 °C y una humedad relativa promedio de 63.3%. El inicio de la germinación osciló entre 4 y 5 días en todos los tratamientos.

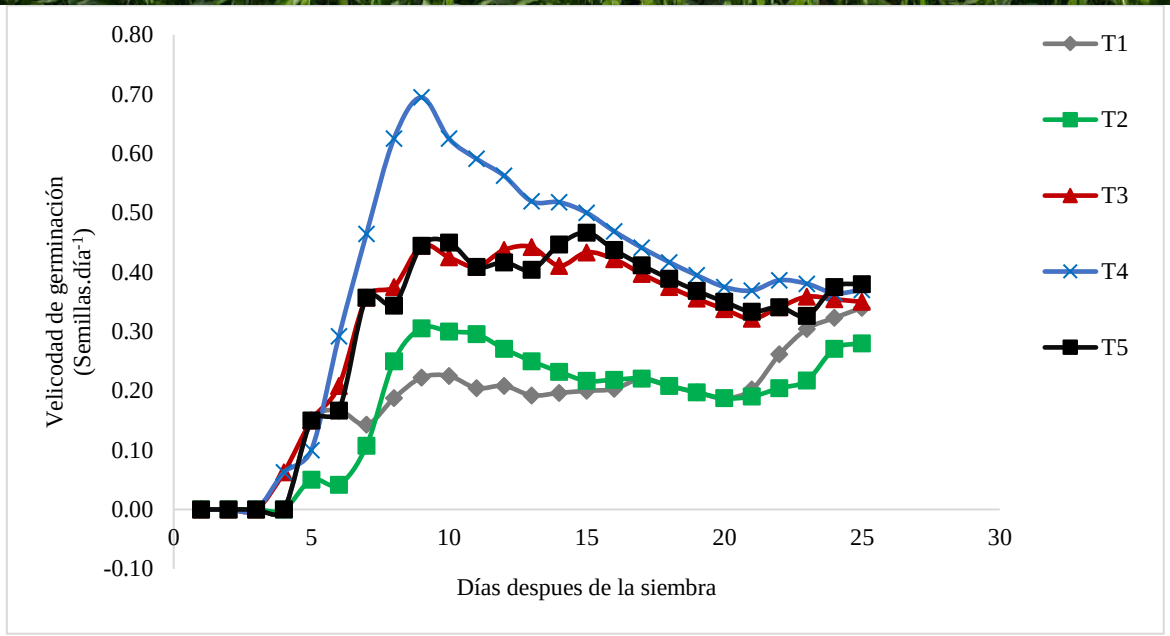
El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el porcentaje de germinación. El T5 registró el mayor porcentaje (95%) seguido del T4 (92.5%) (Figura 1), en comparación con el T1 (control) y T2. Esto coincide con lo reportado por Maphalaphathwa & Adornis (2024), quienes identificaron que la inmersión en KNO_3 al 0.1% durante 24 h estimula la germinación y el vigor de plántulas de la familia Solanaceae.

Figura 1. Porcentajes de germinación de semillas de chile tusta sometidos a diferentes tratamientos germinativos.



El índice de germinación fue mayor en T1 (14.83) seguido del T5 (12.8). La velocidad de germinación fue mayor para el T5 (0.38 semillas.día^{-1}), seguido del T4 (0.37 semillas.día^{-1}) (Figura 2). Esto confirma los hallazgos de Mahmood ur Rehman et al. (2024), quienes indican que la imbibición de semillas con KNO_3 disminuye la latencia seminal mediante la reducción de los niveles de ácido abscísico (ABA) y se promueve la síntesis endógena de giberelinas (GA_3). Esto reactiva los procesos metabólicos del embrión, se estimula la expresión de enzimas hidrolíticas, facilitando así la movilización de reservas nutritivas hacia el embrión.

Figura 2. Velocidad de germinación de semillas de chile tusta sometidos a diferentes tratamientos germinativos.



Para la longitud de hipocótilo y radícula hubo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El valor mayor en longitud de hipocótilo lo tuvo el T3, seguido del T5. Para la longitud de radícula, los tratamientos con mayores valores fueron el T5, seguido del T3 (Cuadro 2). De acuerdo a Nyandwi et al. (2024); Kaushal et al. (2026), esto se atribuye a la actividad de los iones aportados por el KNO_3, donde el catión potasio actúa como soluto osmóticamente activo, facilitando la absorción hídrica, promoviendo así la turgencia, expansión y elongación celular de los tejidos embrionario y el anión nitrato contribuye a la síntesis de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos.

Cuadro 2. Longitud de hipocótilo y radícula de plántulas de chile tusta sometidos a diferentes tratamientos germinativos.

Tratamiento	Hipocótilo	Radícula
	(mm)	
T1: Control	15.49 bc	8.42 ab
T2: Agua destilada	14.98 c	5.18 b
T3: KNO_3 al 0.5%	26.54 a	9.67 ab
T4: KNO_3 al 1.0%	22.62 ab	8.81 ab

T5: KNO_3 al 1.5%	24.48 a	12.89 a

Fuente**:** Elaboración propia.

La inmersión en KNO_3 y la duración de la inmersión de las semillas afectan significativamente la germinación y la calidad de plántulas, debido a que el KNO_3 rompe la dormancia de las semillas inducida por el estrés por altas temperaturas y promueve la germinación uniforme (Mahmood ur Rehman et al., 2024).

En este estudio solo se emplearon tres concentraciones diferentes de KNO_3, las cuales fueron distintas a estudios previos realizados. En pimiento dulce, Munatsi et al. (2024) obtuvo que la inmersión de semillas en KNO_3 al 0.2% durante 24 h incrementó el porcentaje de germinación, longitud de plúmula y radícula y el índice de vigor, comparado con las semillas testigo. A diferencia de lo que reporta Granata et al. (2024), en cuatro cultivares de pimiento dulce el tratamiento óptimo fue la aplicación de KNO_3 al 6% durante 96 h, incrementando el crecimiento vegetal de las plántulas, el índice de vigor, el contenido de antioxidantes en hojas y el contenido de proteínas en las semillas. Esto demuestra que la concentración óptima de KNO_3 depende de la especie y del estado fisiológico de la semilla.

Conclusiones

La inmersión de semillas en KNO_3 al 1.5% durante 24 h, propicia una mayor germinación, longitud de hipocótilo y radícula de semillas de chile tusta (*Capsicum annuum* L.).

Para incrementar la germinación de semillas y crecimiento inicial de plántulas de chile tusta se recomienda el tratamiento KNO_3 al 1.5% durante 24 h.

Literatura citada

Araiza Lizarde, N., Araiza Lizarde, E., & Martínez Martínez, J. G. (2011). Evaluación de la germinación y crecimiento de Plántula de Chiltepín (*Capsicum annuum* L variedad glabriusculum) en invernadero. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 13(2), 170-175.

Beltrán-Burboa, J. N., López-Peralta, M. C. G., Hernández Meneses, E., & Cruz-Huerta, N. (2019). Germinación in vitro de chile chiltepín (*Capsicum annuum* L. var. glabrius culum) y regeneración por organogénesis. *Agrociencia*, 54: 195-208.

El-Sanatawy, A. M., Ash-Shormillesy, S. M., Qabil, N., Awad, M. F., & Mansour, E. (2021). Seed halo-priming improves seedling vigor, grain yield, and water use efficiency of maize under varying irrigation regimes. *Water, 13*(15): 1–16. https://doi.org/10.3390/w13152115

Garruña-Hernández, R., Latournerie-Moreno, L., Ayala-Garay, O., Santamaría, J. M., y Pinzón-López, L. (2014). Acondicionamiento pre-siembra: Una opción para incrementar la germinación de semillas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agrociencia, 48*(4), 413–423.

Granata, A., Capozzi, F., Gaglione, A., Riccardi, R., Spigno, P., Giordano, S., Sorrentino, M. C., & Spagnuolo, V. (2024). Seed priming enhances seed germination and plant growth in four neglected cultivars of *Capsicum annuum* L. *PeerJ, 12*, e18293. https://doi.org/10.7717/peerj.18293

Hacisalihoglu, G., & Ross, Z. (2010). The influence of priming on germination and soil emergence of non-aged and aged annual ryegrass seeds. *Seed Science and Technology*, 38(1), 214–217. https://doi.org/10.15258/sst.2010.38.1.21

Kaushal, K., Yadav, S., Choudhary, R., Navya, K., Sirinandini, D., Kumar, S. M., Yadav, A., Anumantharaj, A., Choudhary, D., Kaushik, P., Kirubhakaran, S., Hussain, Z., Ercisli, S., & Yadav, S. K. (2026). Potassium nitrate seed priming enhances root system architecture and metabolic activity in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *BMC Plant Biology,* 26(1), 479. https://doi.org/10.1186/s12870-025-08013-4

Lira, R., Casas, A., & Blancas, J. (2016). Ethnobotany of Mexico: Interactions of people and plants in Mesoamerica. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7

López, L., y Montes, H. (2006). Avances de investigación de la red de hortalizas del SINAREFI. México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío.

Mahmood ur Rehman, M., Liu, J., Nijabat, A., Alsudays, I. M., Saleh, M. A., Alamer, K. H., Attia, H., Ziaf, K., Zaman, Q. u., & Amjad, M. (2024). Seed priming with potassium nitrate alleviates the high temperature stress by modulating growth and antioxidant potential in carrot seeds and seedlings. *BMC Plant Biology*, *24*(1), 606. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05292-1

Maphalaphathwa, M., & Nciizah, A. D. (2025). Optimizing chillies (*Capsicum annuum* L.) germination rate and early seedling performance through nutrient seed priming with potassium nitrate and zinc oxide. *Frontiers in Plant Science, 16*: 1-13. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1535305

Munatsi, R., Charachimwe, R. R., Tembo, L., & Chandiposha, M. (2024). Response of sweet pepper (*Capsicum annuum*) to different priming treatments on germination and early growth. *International Journal of Science and Research Archive*, *13*(2), 724–732. https://doi.org/10.30574/ijsra.2024.13.2.2144

Nyandwi, J., Ghimire, A., Khan, W., Islam, M. S., Lay, L., Methela, N. J., Yun, B., & Kim, Y. (2024). Effect of Potassium Nitrate Priming in the Germination and Early Seedling Growth of Soybean. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*, 36 (4), 332-347. https://doi.org/10.22698/jales.20240025

Poudel, S., Paudel, S., Rijal, B., Shrestha, A., Kafle, A., & Blon, N. (2024). Effects of halopriming and hydropriming on seed germination and seedling emergence of chilli (*Capsicum frutescens*). *Journal of Agriculture and Resource Management, 1*: 232–244. https://doi.org/10.3126/jarm.v1i1.74634

Prado-Urbina, G., Lagunes-Espinoza, L. del C., García-López, E., Bautista-Muñoz, C. del C., Camacho-Chiu, W., Mirafuentes-G., F., y Aguilar-Rincón, V. H. (2015). Germinación de semillas de chiles silvestres en respuesta a tratamientos pre-germinativos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios,* 2(5): 139–149.

Rincón, V. H. A., Torres, T. C., López, P. L., Moreno, L. L., Meraz, M. R., Mendoza, H. V., y Castillo, J. A. A. (2010). Los chiles de México y su distribución. México: SINAREFI.

Rumbidzai, R., Charachimwe, R. R., Tembo, L., & Chandiposha, M. (2024). Response of sweet pepper (*Capsicum annuum*) to different priming treatments on germination and early growth. *International Journal of Science and Research Archive, 13*(2): 724–732. https://doi.org/10.30574/ijsra.2024.13.2.2144

TEMÁTICA 2. BIOESTIMULANTES Y BIOFERTILIZANTES

Aplicación foliar y al suelo de algas marinas en la producción de jitomate en condición de agricultura protegida

Patricio Apáez-Barrios[23], Stefany Guadalupe Alonso-Alvarez, Yurixhi Atenea Raya-Montaño[24], Maricela Apáez-Barrios[25]

Resumen

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la principal hortaliza cultiva a nivel mundial, de amplio consumo humano en fresco e industrializada. Su producción debe seguir incrementándose para abastecer el requerimiento mundial mediante alternativas de manejo amigables con el ambiente. Por lo que el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar y al suelo de extractos de las algas marinas *Ecklonia maxima*, *Ascophyllum nodosum* y harina de *Sargassum vulgare* sobre el rendimiento y la calidad del fruto de jitomate cv. Primus bajo agricultura protegida en Apatzingán, Michoacán. Se evaluaron siete tratamientos que resultaron de la combinación de las tres especies de algas con dos vías de aplicación (foliar y al suelo) más un testigo absoluto sin aplicación. Durante el ciclo productivo se registraron temperaturas máximas extremas de hasta 43 °C. Los resultados indican que la incorporación al suelo de *S. vulgare* produjo el rendimiento total más alto (69.0 t ha^{-1}), superior en 15.1% respecto al testigo (59.96 t ha^{-1}), respuesta atribuida al incremento en el número de frutos por planta (26.64) y peso promedio del fruto (105.16 g). Por su parte, la vía foliar de *S. vulgare* incrementó la retención de frutos (27.31 frutos por planta), pero redujo el peso promedio (97.88 g). Con ninguna de las algas marinas se aumentó la firmeza, sólidos solubles ni el pH. Las dimensiones del fruto no mostraron variaciones estadísticas. Se concluye que el suministro edáfico de *S. vulgare* es una estrategia bioestimulante eficaz para mejorar el rendimiento de jitomate.

Palabras clave: extractos de algas, firmeza de frutos, sólidos solubles.

Abstract

[23] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Facultad de Ciencias Agropecuarias de la. Maestría Interinstitucional en Agricultura Protegida. Prolongación de la calle Mariano Jiménez s/n, Col. El Varillero, Apatzingán, Michoacán, México. CP. 60670. Correo: patricio.apaez@umich.mx; 1720947b@umich.mx.
[24] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez" de la Paseo Lázaro Cárdenas s/n, esq. Berlín, Colonia Viveros, Uruapan, Michoacán, México. CP. 60190. Correo: yurixhi@umich.mx.
[25] Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero (CEP-CSAEGRO). Km. 14.5 Carretera Iguala-Cocula. Cocula, Guerrero, México. CP. 40580. Correo: maricela.apaez@csaegro.edu.mx

The tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the world's leading cultivated vegetable, widely consumed fresh and processed. Its production must continue to increase to meet global demand through environmentally friendly management practices. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of foliar and soil applications of extracts from the seaweeds *Ecklonia maxima* and *Ascophyllum nodosum*, and *Sargassum vulgare* meal, on the yield and fruit quality of tomatoes cv. Primus grown under protected agriculture in Apatzingán, Michoacán. Seven treatments were evaluated, resulting from the combination of the three seaweed species applied via two routes (foliar and soil), plus an untreated control without any application. During the growing season, extreme maximum temperatures of up to 43 °C were recorded. The results indicate that incorporating *S. vulgare* into the soil resulted in the highest total yield (69.0 t ha^{-1}), 15.1% higher than the control (59.96 t ha^{-1}). This response is attributed to the increase in the number of fruits per plant (26.64) and average fruit weight (105.16 g). Foliar application of S. vulgare increased fruit retention (27.31 fruits per plant) but reduced average weight (97.88 g). None of the seaweeds increased firmness, soluble solids, or pH. Fruit dimensions showed no statistically significant variations. It is concluded that soil application of *S. vulgare* is an effective biostimulant strategy for improving tomato yield.

Keywords: Seaweed extracts, fruit firmness, soluble solids.

Introducción

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor importancia e impacto socioeconómico y alimentario a nivel mundial. Debido a que es ampliamente consumido, tanto en fresco como procesado en una gran variedad de productos industriales, que lo hacen ser un componente fundamental de la dieta humana (ElShamey *et al.,* 2025; Lamonaca *et al.,* 2025). En lo nutricional, es fuente importante de vitaminas (A y C) y de sustancias antioxidantes como el licopeno que es un pigmento carotenoide que otorga su característico color rojo, así como de betacaroteno. El consumo regular de estos fitoquímicos contribuye a neutralizar los radicales libres en el organismo, lo que ayuda a prevenir el estrés oxidativo y reducir el riesgo de padecer enfermedades crónico-degenerativas, tales como patologías cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Balali *et al.,* 2025).

Para satisfacer la demanda creciente de esta hortaliza con estándares superiores de rendimiento y calidad, la agricultura protegida representa una de las estrategias más efectivas. En este sentido, el 70% de la superficie total cultivada en agricultura protegida en México es dedicada al cultivo de jitomate (García-Herrera *et al.,* 2016). La producción bajo estructuras de cubierta (invernadero o malla sombra) permite optimizar el microclima, y disminuir el ataque de plagas. Además de aumentar la eficiencia en el uso del agua y los nutrimentos

(Villagrán *et al.,* 2023). Sin embargo, la alta productividad demandada en estos sistemas de producción intensivos, generan mayores exigencias metabólica en las plantas, por lo que se requieren esquemas de nutrición y bioestimulación de alta eficacia. En este sentido, los bioestimulantes agrícolas han surgido como una alternativa sustentable e innovadora que pueden potenciar la fisiología vegetal y la tolerancia al estrés (Sariñana-Aldaco *et al.,* 2022; Di mola *et al.,* 2023).

Al respecto, las algas marinas y los productos derivados de ellas se han utilizado en los cultivos agrícolas por los efectos positivos que pueden generar en su crecimiento y rendimiento, además de proporcionar cierta protección frente a condiciones bióticas y abióticas desfavorables. Debido a que son recursos ricos en compuestos bioactivos como carbohidratos, aminoacidos, lípidos, fitohormonas (auxinas, citoquininas y giberelinas), osmoprotectores, polisacáridos complejos (alginato, laminarina) y elementos minerales entre otros (Mirparsa *et al.,* 2016; Raghunanda *et al.,* 2019).

De manera particular, las algas marinas como *Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima* y *Sargassum vulgare* suministradas como extractos o harinas han demostrado ser promotores eficaces del crecimiento vegetal. Los efectos positivos que se pueden lograr dependen la mayoría de las veces del efecto sinérgico de todos los componentes de los extractos, generalmente a concentraciones bajas (proporciones de 1:1000). Así mismo, su efectividad también suele diferir según la vía de suministro utilizada. La aplicación foliar permite que la asimilación de metabolitos activos a través de la cutícula y los estomas sea rápida, lo que estimula la fotosíntesis y el sistema antioxidante del tejido foliar. Mientras que, la aplicación al suelo interactúa con la rizosfera puede mejorar la estructura del sustrato, estimular el desarrollo radical y favorecer la absorción de nutrientes y compuestos bioactivos (Shukla *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2021).
A pesar de los beneficios documentados de las algas, es preciso determinar el efecto específico y diferenciado de la vía de aplicación (foliar y suelo) en el cultivo de jitomate bajo cubierta. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar y al suelo de extractos y harinas de algas marinas sobre el rendimiento de frutos y calidad del fruto de jitomate cultivado en condiciones de agricultura protegida.

Materiales y Métodos

Sitio experimental

El presente estudio se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Apatzingán, Michoacán, que se

encuentra ubicada en las coordenadas 19º 05’ 00’’ de LN y 102º 22’ 17’’ de LO, a 325 m de altitud. El clima del sitio es BSh´g clasificado como cálido seco muy cálido, con una precipitación pluvial media anual de 763 mm (García, 2007).

Genotipo experimental

En el estudio se empleó la variedad Primus como genotipo experimental, un cultivar caracterizado por producir frutos ovalados, con pulpa firme y con una baja cantidad de semillas.

Producción de plántula

Las plántulas fueron producidas en el almacigo de la Facultad, se utilizaron charolas de unicel de 240 cavidades, previamente desinfectadas con hipoclorito de sodio al 5 % y lavadas posteriormente, las cuales se llenaron con peat moss. El 15 de noviembre de 2024 se realizó la siembra en las charolas, se depositaron dos semillas por cavidad. Las charolas se colocaron bajo malla sombra y se realizaron aplicaciones de riegos todos los días durante la mañana para mantener las plántulas con humedad apropiada.

Preparación del terreno y trasplante de plántula

Para el cultivo se utilizó una casa malla en el techo con 50 % sombra y en los laterales provista de malla antiáfida de 25 x 40 hilos por in^2, la altura al cenit es de 7 m y a la canaleta de 5 m. La superficie total utilizada para el establecimiento del cultivo fue de 200 m^2. Previo al trasplante dentro de la estructura de la casa sombra se realizó la eliminación de malezas y la preparación del terreno que consistió en un barbecho y dos pasos de rastra para eliminar los terrones y dejar el suelo suelto. Después se formaron camas de trasplante sobre las cuales se colocó por cada cama una cintilla de riego de 5/8”, 1.01 LPH $gotero^{-1}$ y distancias entre goteros de 10 cm. Posteriormente se cubrió con acolchó plástico color plata.

El trasplante se realizó a los 30 días después de la siembra, que fue cuando las plántulas tenían tres hojas verdaderas. Se inició por la mañana y se colocó una plántula de jitomate cada 40 cm de distancia entre ellas.

El suelo de 0 a 30 cm de profundidad, presentó un pH de 7.11 (moderadamente alcalino), de textura franco, 6.19% de carbonatos totales, densidad aparente de 0.96 g cm^{-3}, contenido de materia orgánica de 4.22%, capacidad de intercambio catiónico de 38.5 meq 100 g de $suelo^{-1}$, contenido (mg kg^{-1}) de $N\text{-}NO_3$ (153), P-Olsen (34.9), K (1374), Ca (4935), Mg (1215), S (43.7), Na (47.6), Fe (4.61), Zn (3.64), Cu (2.25) y B (1.17).

Riego y fertiirrigación

El sistema de riego se integró por cuatro tanques con capacidad de 2,500 L cada uno y un contenedor de 450 L destinado a la preparación y distribución del fertirriego. El impulso del flujo se realizó mediante una motobomba de 3 HP conectada a una tubería de conducción principal de 2" de diámetro, desde la cual se derivó el agua hacia las cintas de riego. El riego se efectuó con agua extraída de un pozo profundo, la cual presentó una conductividad eléctrica de 0.31 dS m^{-1} y un pH de 7.17. Su composición química registró las siguientes concentraciones (mg L^{-1}): cloruros (15.5), bicarbonatos (161), nitratos (13.8), fosfatos (0.24) y sulfatos (11.36); mientras que en los cationes se obtuvieron valores de 7.73 de Na, 1.27 de K, 14.4 de Ca y 29.5 de Mg. Los microelementos Fe, Zn, Cu, Mn y B se ubicaron por debajo de 0.05 mg L^{-1}.

Con base en los análisis del suelo se determinó el requerimiento de la nutrición que se suministró mediante fertirriego, con las siguientes cantidades de nutrientes en kg ha^{-1}: 113 de N, 50 de P_2O_5, 110 (K_2O), 4 Fe, 2 de Mn y 0.7 B, con los fertilizantes nitrato de potasio (13N-37K2O), Urea (45N), ácido fosfórico (32P), fosfato de potasio (23P-24K), Tradecorp AZ® (7.5Fe + 0.65B + 3.5Mn) y TRADEBOR® (15.4 B). Se suministraron dos veces por semana como solución nutritiva. El aporte nutrimental se ajustó de forma gradual según la etapa fenológica, en la etapa de crecimiento vegetativo la conductividad eléctrica de la solución nutritiva fue a 1 dS m^{-1}, de floración a inicio de fructificación de 1.5 a 2 dS m^{-1} y posteriormente se suministró a 2.5 dS m^{-1} durante el resto del cultivo.

Algas marinas utilizadas

Como bioestimulantes y promotores del desarrollo vegetal, se emplearon extractos de tres especies de algas marinas: el extracto de *Ecklonia maxima*, caracterizado por su contenido de fitohormonas naturales (con una elevada relación auxinas/citoquininas), polisacáridos, vitaminas y minerales. Otro fue el extracto de *Ascophyllum nodosum*, rico en bioactivos como betaínas, manitol, ácido algínico, polifenoles, fucanos y laminarina. Así como la harina de *Sargassum vulgare* que es un polvo 100 % puro, producto comercial proveniente de Teruel, Aragón, España la cual aporta minerales esenciales (Na, K, Ca, Mg, Cu, Fe y Zn), carbohidratos, ácidos grasos omega-3, vitamina C y retinol.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos evaluados consistieron en la aplicación de tres especies de algas marinas: *Ecklonia maxima* (E), *Ascophyllum nodosum* (A) y *Sargassum vulgare* (S). Cada producto se administró de forma individual mediante dos vías de aplicación: foliar (F) y al suelo (S), lo que generó seis combinaciones (E-F, E-S, A-F, A-S, S-F y S-S), además de un testigo absoluto

sin aplicación. Las dosis utilizadas fueron de 2.0 L ha^{-1} para las aspersiones foliares más 1 mL del adherente Inex® y 10.0 L ha^{-1} para las aplicaciones drench al suelo. En el caso de la harina de *S. vulgare* se aplicaron las mismas dosis, pero en kg ha^{-1}. Las aplicaciones se iniciaron a los ocho días después del trasplante y en total se realizaron cuatro aplicaciones consecutivas a intervalos de 10 días. El suministro de los tratamientos se hizo a punto de goteo en las aplicaciones foliares, y en drench se suministró dirigido a la base del tallo, entre las 7:30 y las 8:00 de la mañana con aspersores (318055 Pacto/SWISSMEX®, México) con capacidad de 3 L, fue utilizada una aspersora por cada tipo de alga. En las plantas del testigo fueron asperjadas solo con agua destilada más adherente.

La distribución de los tratamientos fue en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, que totalizaron 28 unidades experimentales. Cada unidad estuvo constituida por 10 plantas, se tomaron las seis plantas centrales como parcela útil.

Registro de variables ambientales

Durante el ciclo del cultivo, en el interior de la casa sombra se registraron diariamente las temperaturas máximas y mínimas con un dataloguer Elitech® (RC-5, China) y se reportaron en medias decenales.

Variables de rendimiento

Cuando los frutos alcanzaron la madurez de cosecha se realizaron los cortes y se determinaron las siguientes variables de respuesta:

Número de frutos por planta: se realizó la sumatoria de frutos cosechados de las plantas de cada parcela útil y se dividió entre el número de plantas cosechadas.

Peso promedio de frutos: se registró el peso total de los frutos cosechado por parcela útil con una báscula digital marca Rhino® (SKU / Modelo: BAPRE-3, México) y se dividió entre el número de frutos cosechados.

Rendimiento del fruto y se determinó el rendimiento en t ha^{-1}, para lo cual se consideró la densidad de población que fue de 2.5 plantas/m^2.

Diámetros polar y ecuatorial: Se evaluaron mediante un calibrador vernier digital Truper® (IP 54, China). El diámetro polar se determinó orientando el fruto de jitomate en posición vertical y se registró la distancia máxima entre la zona apical y la peduncular. Por su parte, el diámetro ecuatorial se midió con la colocación horizontal del fruto para registrar la distancia entre los puntos perpendiculares más distantes de su eje central.

Variables físicas y químicas

Firmeza del fruto: Se determinó en cinco frutos por unidad experimental con un penetrómetro análogo (modelo GY-03, China) provisto de un punzón de 11 mm de diámetro. La firmeza se expresó en función de la resistencia mecánica ejercida por la pulpa a la penetración.

Sólidos solubles totales (SST): Se extrajo el jugo de una muestra compuesta por cinco frutos por unidad experimental y se midió el contenido de sólidos solubles con un refractómetro manual Hanna® (HI96801, USA), los resultados se expresaron en °Brix.

pH: A partir del mismo jugo utilizado para la medición de sólidos solubles, se determinó el pH mediante un potenciómetro pHep® 5 (HI98128, USA) (método 981.12) previamente calibrado de acuerdo con la metodología descrita por la Association of Of ficial Analytical Chemists (AOAC, 1980).

Análisis estadístico

Los datos de las variables de respuesta se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA). En los casos donde se detectaron diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey al 5 % de probabilidad del error. Todos los análisis estadísticos se ejecutaron con el software SAS versión 9.4 (SAS, 2017).

Resultados y Discusión

Condiciones ambientales durante el cultivo

Durante el ciclo del cultivo del jitomate en el estudio no se presentó la ocurrencia de precipitación pluvial. Las condiciones térmicas observadas, superaron de manera constante el rango óptimo reportado para el cultivo de jitomate que es de 21 a 24 °C (Wahid *et al.,* 2007), ya que durante el crecimiento en almacigo, las temperaturas máximas oscilaron entre 37.7 y 36.6 °C, mientras que las mínimas fueron de 15.0 a 22.7 °C. En el crecimiento vegetativo las máximas variaron de 34.6 a 34.0 °C y las mínimas de 15.8 a 20.5 °C. En la etapa productiva el cultivo estuvo sometido a las temperaturas más elevadas, ya que las máximas se incrementaron de 36.9 hasta los 43 °C y las mínimas registraron hasta 22.8 °C (Cuadro 1).

Cuadro 1. Temperaturas mínimas y máximas (media decenal) ocurridas durante el ciclo del cultivo de jitomate.

Mes	Decena	Temperatura °C	Mes	Decena	Temperatura °C

		Mínima	Máxima			Mínima	Máxima
Diciembre	2	22.7	37.5	Febrero	2	20.5	34.6
Diciembre	3	15.0	37.3	Febrero	3	21.2	36.9
Enero	1	15.7	36.6	Marzo	1	20.9	37.1
Enero	2	16.8	34.0	Marzo	2	21.6	38.0
Enero	3	16.1	34.4	Marzo	3	22.4	40.1
Febrero	1	15.8	33.7	-	-	22.8	43.0

Al respecto, Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto (2017) señalan que la exposición a altas temperaturas afecta el crecimiento y rendimiento del cultivo y puede provocar senescencia y abscisión foliar temprana, inhibición del crecimiento vegetativo y radical, pérdida de la viabilidad del polen, aborto floral, así como reducción en el tamaño y alteración en la coloración de los frutos. Por lo que las condiciones ambientales pudieron limitar la producción del cultivo.

Rendimiento y componentes del rendimiento

El número de frutos por planta, peso promedio de frutos y rendimiento total de frutos presentaron cambios estadísticos significativos ($p \leq 0.05$) por efecto de la combinación alga marina * vía de aplicación (Tabla 2). Mientras que el diámetro ecuatorial y polar no presentaron modificaciones significativas entre tratamientos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Nivel de significancia y prueba complementaria de los componentes del rendimiento del jitomate en función de la aplicación de algas marinas y vía de aplicación.

Alga marina	Vía de aplicación	Frutos por planta	Pesos promedio de frutos (g)	Diámetro ecuatorial cm	Diámetro polar cm
Ecklonia	Foliar	25.19 ab¶	93.07 b	57.06 a	61.92 a
maxima	Suelo	25.94 ab	98.75 ab	55.51 a	64.74 a
Ascophyllum	Foliar	26.33 ab	102.45 ab	54.50 a	62.06 a
nodosum	Suelo	25.14 ab	95.24 ab	56.40 a	60.41 a
Sargassum	Foliar	27.31 a	97.88 ab	53.80 a	60.53 a
vulgare	Suelo	26.64 ab	105.16 a	53.05 a	61.82 a
Testigo	0	24.04 b	98.75 ab	54.48 a	59.57 a
Media general		25.80	98.72	55.03	61.58
Probabilidad de F		*	*	NS	NS
$DMSH_{0.05}$		3.03	10.31	7.62	8.46
Coeficiente de variación %		5.03	9.0	7.92	6.0

¶ = medias con letras distintas en cada columna difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).
* $p \leq 0.05$. NS = no significativo. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta.

En cuanto al número de frutos por planta, se encontró que las plantas con la aplicación foliar de *S. vulgare* registraron el mayor valor para esta variable de respuesta (27.31 frutos por planta), que superó estadísticamente a las plantas del tratamiento testigo sin aplicación (24.04 frutos por planta) con un incremento del 13.6 %. Los demás tratamientos (*E. maxima* y *A. nodosum* en ambas vías de aplicación, así como *S. vulgare* al suelo) mostraron valores estadísticamente similares entre sí y respecto al testigo.

Respecto al peso promedio de frutos, el tratamiento con el que se lograron los frutos más pesados fue con la aplicación al suelo de *S. vulgare* (105.16 g). Mientras que la aplicación foliar de *E. maxima*, generó el valor más bajo para esta variable (93.07 g). Por su parte, los tratamientos restantes, incluido el testigo sin aplicación provocaron valores intermedios sin diferencias estadísticas entre sí ni con respecto al tratamiento con *S. vulgare* al suelo.

En lo que respecta al diámetro ecuatorial y diámetro polar, debido a que la prueba de medias de Tukey no detectó diferencias significativas entre los tratamientos para estas variables, se evidencia que ni la especie de alga ni la vía de aplicación alteraron el calibre y forma del fruto.

Para el rendimiento total de fruto, la aplicación de *S. vulgare* al suelo generó el mayor rendimiento (69 t ha^{-1}), valor que fue superior significativamente en un 15.1% respecto al rendimiento de las plantas del tratamiento testigo (59.96 t ha^{-1}), así como a las plantas con aplicaciones de *E. maxima* foliar (59.11 t ha^{-1} y *A. nodosum* al suelo (59.78 t ha^{-1}). Las plantas con los tratamientos de *S. vulgare* foliar, *A. nodosum* foliar y *E. maxima* al suelo mostraron respuestas intermedias sin diferencias estadísticas con respecto al mejor tratamiento que fue *S. vulgare* al suelo (Figura 1).

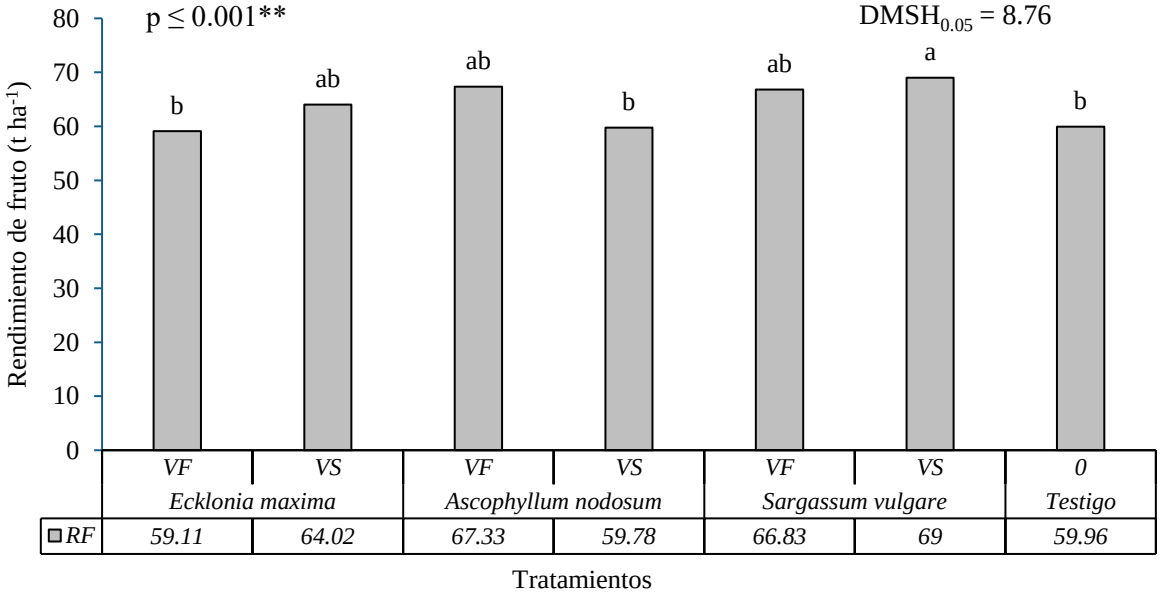


Figura 1. Rendimiento de fruto (RF) del jitomate en función de la aplicación de extractos de algas marinas y vía de aplicación. VF = vía foliar, VS = vía suelo

El comportamiento del rendimiento total evidenció una estrecha correspondencia con el número de frutos y peso promedio de frutos. La mayor producción alcanzada con la aplicación de *S. vulgare* al suelo estuvo determinada por la respuesta aditiva entre el peso promedio de frutos (105.16 g) y el número de frutos por planta (26.64). Asimismo, los rendimientos superiores promovidos por la vía foliar en *A. nodosum* (67.33 t ha^{-1}) y *S. vulgare* (66.83 t ha^{-1}) se sustentaron en una mayor eficiencia de amarre y retención de frutos, registrando 26.33 y 27.31 frutos por planta, respectivamente.

Variables físicas y químicas del fruto

En el Cuadro 3 que presenta las respuestas de las variables físicas y químicas del fruto de jitomate a la aplicación de algas marinas y su vía de suministro (foliar y al suelo) se observa que la firmeza del fruto no presentó diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos. La media general para este parámetro se ubicó en 4.62 kg cm^{-2}. Los valores oscilaron entre 4.39 kg cm^{-2} con *E. maxima* por vía foliar y 4.93 kg cm^{-2} con *S. vulgare* suministrada al suelo, valores estadísticamente similares a la de los frutos de las plantas del testigo (4.46 kg cm^{-2})

Cuadro 3. Prueba complementaria de los componentes de variables de calidad del jitomate en función de la aplicación de extractos de algas marinas y vía de aplicación.

Alga marina	Vía de aplicación	Firmeza del fruto (kg cm^{-2})	Sólidos solubles (°Brix)	pH
Ecklonia	Foliar	4.39 a¶	3.99 a	4.34 ab
maxima	Suelo	4.85 a	3.93 ab	4.41 a
Ascophyllum	Foliar	4.52 a	3.71 b	4.30 ab
nodosum	Suelo	4.57 a	3.86 ab	4.38 ab
Sargassum	Foliar	4.66 a	3.88 ab	4.34 ab
vulgare	Suelo	4.93 a	4.08 a	4.28 b
Testigo	0	4.46 a	3.96 a	4.39 ab
Media general		4.62	3.92	4.35
Probabilidad de F		NS	**	**
$DMSH_{0.05}$		1.01	0.23	0.12
Coeficiente de variación %		9.40	2.55	2.20

¶ = medias con letras distintas en cada columna difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). ** $p \leq 0.01$, respectivamente. NS = no significativo. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta.

Para la concentración de sólidos solubles totales se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$). La acumulación de azúcares no fue favorecida por el suministro de algas marinas ya que los valores más altos se registraron en los frutos cosechados en las plantas del tratamiento testigo (3.96 °Brix) y en las que recibieron la aplicación al suelo de *S. vulgare* (4.08 °Brix) y foliar de *E. maxima* (3.99 °Brix). En contraste, la menor concentración de sólidos solubles se presentó con la aplicación foliar de *A. nodosum* (3.71 °Brix). Asimismo, el pH del fruto presentó variaciones altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre los tratamientos. El valor más alto se logró con la incorporación al suelo de *E. maxima* (4.41), valor que estadísticamente es comparable al del testigo (4.39). Por el contrario, la menor acidez relativa (menor valor de pH) se registró con el suministro al suelo de *S. vulgare* (4.28), valor que superó en acidez al resto de las combinaciones evaluadas.

De manera general se encontró que el mayor rendimiento de frutos de jitomate (69 t ha^{-1}) obtenida con la aplicación al suelo de *S. vulgare* se atribuye a un equilibrio morfogenético, en el cual se conjugaron frutos de mayor peso promedio (105.16 g) con un elevado número de frutos por planta (26.6). Sin embargo, con este tratamiento no se incrementó la firmeza de pulpa ni la concentración de sólidos solubles totales en comparación con los frutos de las plantas del tratamiento testigo, aunque fue el tratamiento que más promovió la acidez en los

frutos (pH de 4.28). Por el contrario, la aplicación foliar de *S. vulgare*, si bien maximizó la retención de frutos (27.31 frutos planta), generó frutos de menor peso promedio (97.88 g) con contenidos intermedios de sólidos solubles (3.88 °Brix) y firmeza (4.66 kg cm^{-2}). Lo anterior indica que la incorporación de *S. vulgare* por vía edáfica potencia de manera simultánea la capacidad productiva del jitomate, al optimizar tanto el peso de los frutos como la retención de frutos.

La respuesta productiva y de calidad del cultivo de jitomate a la aplicación de algas marinas estuvo condicionada por el posible estrés térmico prevalecientes durante el ciclo experimental, donde las temperaturas máximas superaron de manera recurrente el umbral óptimo de 21 a 24 °C (Wahid *et al.,* 2007). Bajo estas condiciones de cultivo, no todos los bioestimulantes marino a las dosis suministrados demostraron capacidad para mitigar los efectos adversos del ambiente, modulando de forma diferenciada la efectividad según la especie de alga y la vía de suministro (Ali *et al.,* 2021). En este sentido, se encontró que *E. máxima* suministrada de manera foliar y *A. nodosum* vía suelo no aumentaron el rendimiento en comparación con el testigo e incluso *A. nodosum* en la vía foliar redujo significativamente el contenido de sólidos solubles. La falta de respuesta positiva a la aplicación de estos tratamientos difiere con lo encontrado por Ali *et al.* (2019), quienes en jitomate y pimiento dulce (*Capsicum annuum*) la foliar de *A. nodosum* al 0.5 % de concentración en ambos cultivos aumentó en 40 % el rendimiento de fruto en comparación con el tratamiento testigo. Estas diferencias en respuesta podrían ser atribuidas a la variación en dosis utilizada entre estudios y a las distintas condiciones ambientales que prevalecieron entre estudios.

El incremento en el rendimiento total de fruto encontrado con la aplicación al suelo de *S. vulgare* (69.0 t ha^{-1}, 15.1 % superior al testigo) se atribuye a una acción coordinada entre el número de frutos por planta y el peso promedio del fruto. Fisiológicamente, los extractos de macroalgas contienen fitohormonas endógenas (auxinas, citoquininas y giberelinas), aminoácidos y polisacáridos complejos que promueven el crecimiento radical al estimular fuertemente la división celular y la diferenciación (Ertani *et al.,* 2018), y optimizan la absorción nutrimental bajo condiciones de estrés (Raghunandan *et al.,* 2019; Shukla *et al.,* 2019). La vía de aplicación edáfica pudo haber promovido la actividad de la rizósfera, donde polisacáridos complejos como alginados y fucoidanos contenidos en esta alga marina actúan como acondicionadores del suelo y estimulantes de la microbiota benéfica (Raghunandan *et al.,* 2019). Asimismo, existe evidencia que indica que el fucosterol primario y derivados del fucosterol son componentes esenciales de las paredes celulares y que su adicción a las plantas favorece su crecimiento (Alam *et al.,* 2014).

Bajo las condiciones de temperaturas extremas de hasta 43 °C, la mejora bioquímica de la rizósfera pudo haber favorecido la absorción hídrica y nutrimental (Ali *et al.,* 2021; Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017), y con ello una mayor translocación de fotoasimilados hacia los órganos de demanda (frutos) durante el llenado. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Sariñana-Aldaco *et al.* (2022), quienes encontraron que las bioformulaciones a base de *Sargassum spp*. favorecen la tolerancia del jitomate a condiciones de estrés, con lo que se puede incrementar la acumulación de biomasa y prevenir la abscisión de órganos reproductivos.

Por otro lado, la aplicación foliar de *S. vulgare* generó la mayor retención de frutos por planta (27.31 frutos planta) respuesta asociada a la acción elicitora sobre el dosel vegetal durante la floración y el amarre. Los bioestimulantes aplicados al follaje activan defensas antioxidantes exógenas que protegen los tejidos reproductivos de la degradación oxidativa por calor y reducen el aborto floral (Ali *et al.,* 2021; Shukla *et al.,* 2019). Resultados similares fueron encontrados por Di Mola *et al.* (2023) y Villagrán *et al.* (2023) en solanáceas establecidas en condiciones de producción en agricultura protegida y campos abiertos. Sin embargo, el suministro foliar presentó un efecto transitorio debido a que las altas temperaturas y la baja humedad relativa reducen la penetración cuticular, lo cual limitó la capacidad de la planta para sostener un mayor peso promedio en los frutos (97.88 g) en comparación con la vía edáfica.

Respecto a la mayor eficacia productiva de *S. vulgare* en comparación con el suministro de *A. nodosum* y *E. maxima* responde a la composición fitoquímica particular de este género fitogeográficamente adaptado a ambientes cálidos. A diferencia de las macroalgas de aguas frías e intermareales, las especies del género *Sargassum* sintetizan concentraciones altas de compuestos osmoprotectores (como glicina-betaína y prolina) y polifenoles con alta capacidad antioxidante (Sariñana-Aldaco *et al.*, 2022). Durante la etapa productiva, las temperaturas extremas pudieron haber limitado la tasa fotosintética del cultivo (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017). En este contexto, el perfil metabolómico de S. *vulgare* pudo haber actuado como un amortiguador fisiológico de estrés abiótico más eficiente y con ello preservar la integridad de las membranas celulares y del aparato fotosintético frente al daño oxidativo (Ali *et al.*, 2021; Sariñana-Aldaco *et al.*, 2022).

En este sentido, la aplicación edafica de *S. vulgare* es una alternativa en el manejo del cultivo de jitomate bajo condiones de altas temperaturas para incrementar la producción de jitomate.

Conclusiones

La eficacia de las algas marinas como bioestimulantes en el cultivo de jitomate bajo agricultura protegida está condicionada por la especie utilizada y la vía de suministro empleada.

La aplicación al suelo de *Sargassum vulgare* fue el tratamiento más efectivo para incrementar el rendimiento bajo las condiciones del presente estudio donde se presentaron altas temperaturas, al aumentar tanto el número de frutos por planta como el peso promedio de frutos.

Aunque la vía foliar de *S. vulgare* favorece la retención y el amarre de frutos, el suministro edáfico fue más efectivo en la acumulación de biomasa y el llenado del fruto.

El suministro de los bioestimulantes evaluados no mejoró el diámetro polar ni ecuatorial, tampoco la firmeza del fruto de jitomate, aunque la incorporación edáfica de *S. vulgare* influye en la modulación del perfil de acidez.

La adición al suelo de *S. vulgare* es una alternativa sustentable para fortalecer la tolerancia fisiológica del cultivo de jitomate y maximizar su productividad en zonas con temperaturas extremas.

Literatura citada

Alam, M. Z., Braun, G., Norrie, J., & Hodges, D. M. (2013). Effect of Ascophyllum extract application on plant growth, fruit yield and soil microbial communities of strawberry. *Canadian Journal of Plant Science*, *93*(1): 23-36. https://doi.org/10.4141/cjps2011-260

Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2019). Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment. *PLoS One*, *14*(5): e0216710. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216710

Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, *10*(3): 531. https://doi.org/10.3390/plants10030531

AOAC (Association of Of ficial Analytical Chemists, International). (1980). *Official Methods of Analysis of AOAC*. Washington, D.C., USA: AOAC.

Balali, A., Fathzadeh, K., Askari, G., & Sadeghi, O. (2025). Dietary intake of tomato and lycopene, blood levels of lycopene, and risk of total and specific cancers in adults: a systematic review and dose–response meta-analysis of prospective cohort studies. *Frontiers in nutrition, 12*: 1516048. https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1516048

Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana, 28*(1): 255-271. http://dx.doi.org/10.15517/am.v28i1.21904

Di Mola, I., Ottaiano, L., Cozzolino, E., Marra, R., Vitale, S., Pironti, A., ... & Mori, M. (2023). Yield and quality of processing tomato as improved by biostimulants based on *Trichoderma* sp. and *Ascophyllum nodosum* and biodegradable mulching films. *Agronomy, 13*(3): 901. https://doi.org/10.3390/agronomy13030901

ElShamey, E., Zeng, Y., Ding, Y., & Yang, J. (2025). Functional phytochemicals in tomatoes: biosynthesis, gene regulation, and human health implications. *Frontiers in Plant Science, 16*: 1662388. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1662388.

Ertani, A., Francioso, O., Tinti, A., Schiavon, M., Pizzeghello, D., & Nardi, S. (2018). Evaluation of seaweed extracts from Laminaria and *Ascophyllum nodosum* spp. as biostimulants in *Zea mays* L. using a combination of chemical, biochemical and morphological approaches. *Frontiers in plant science, 9*: 428. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00428

García E (2004). *Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 90 p.

García-Herrera, E. J., Gómez-González, A. y Hernández-Ríos, I. (2016). Caracterización de la agricultura protegida en la región del altiplano, de San Luis Potosí, México. *Agro Productividad, 9*(10): 87-92.

Lamonaca, A., De Angelis, E., & Pilolli, R. (2025). Metabolomic Profiling of Commercial Tomato Puree by One-Shot Mass Spectrometry-Based Analysis: A Qualitative Perspective. *Metabolites, 15*(11): 732. https://doi.org/10.3390/metabo15110732

Mirparsa, T., Ganjali, H. R., & Dahmardeh, M. (2016). The effect of bio fertilizers on yield and yield components of sunflower oil seed and nut. *International Journal of Agriculture and Biosciences, 5*(1): 46-49.

Raghunandan, B. L., Vyas, R. V., Patel, H. K., & Jhala, Y. K. (2019). Perspectives of seaweed as organic fertilizer in agriculture. In Soil fertility management for sustainable development. Singapore: Springer Singapore. (pp. 267-289). https://doi.org/10.1007/978-981-13-5904-0_13

Sariñana-Aldaco, O., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., & González-Morales, S. (2022). The biostimulant effect of hydroalcoholic extracts of Sargassum spp. in tomato seedlings under salt stress. *Plants,* 11(22): 3180. https://doi.org/10.3390/plants11223180

SAS. 2017. Stastistics Analysis System. SAS 9.4 Language reference: concepts, Sixth Edition. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.

Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T., & Prithiviraj, B. (2019). *Ascophyllum nodosum*-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in plant science, 10*: 462648. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655

Villagrán, E., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Galindo-Pacheco, J. R., & Salinas-Velandia, D. A. (2023). Life Cycle Assessment in Protected Agriculture: Where Are We Now, and Where Should We Go Next?. *Horticulturae, 10*(1): 15. https://doi.org/10.3390/horticulturae10010015

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany, 61*(3): 199-223. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011

Bioestimulantes foliares en el crecimiento y rendimiento de chile habanero bajo condiciones de casa sombra

Juan Carlos Álvarez Hernández[26], Juan Jesús Alvarado Mendoza, Saúl Pardo Melgarejo[27]

Resumen

El empleo de bioestimulantes representa una estrategia clave para mejorar el crecimiento, la productividad y la sostenibilidad de los sistemas hortícolas bajo agricultura protegida. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes bioestimulantes aplicados vía foliar sobre el crecimiento vegetativo, el desarrollo reproductivo y el rendimiento del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivado bajo casa sombra. El experimento se estableció durante el ciclo primavera-verano en el Campo Experimental Valle de Apatzingán, Michoacán, México, bajo un diseño experimental completamente al azar, con seis tratamientos y diez repeticiones por tratamiento. Se evaluaron los tratamientos: T1, Maxigrow® + Fosfacel 800®; T2, Force®; T3, Biozime®; T4, K-Hum®; T5, un biofertilizante a base de guano y T6, un testigo sin aplicación. Los tratamientos se aplicaron vía foliar mediante aspersora manual de mochila y las evaluaciones se realizaron a los 72, 83, 97, 111, 125 y 139 días después del trasplante. Se registraron variables de crecimiento vegetativo, desarrollo reproductivo y rendimiento. El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos para diversas variables. El tratamiento 4 favoreció el crecimiento vegetativo, mientras que el tratamiento 5, promovió un mayor desarrollo foliar. Los mayores rendimientos se obtuvieron con los tratamientos 2 y 3 y tratamiento biofertilizante a base de guano, superando significativamente al testigo. Los resultados indican que la aplicación foliar de bioestimulantes constituye una alternativa viable para incrementar el desempeño agronómico del chile habanero bajo condiciones de casa sombra.

Palabras clave: agricultura protegida, biofertilizantes, bioestimulantes, *Capsicum chinense*, rendimiento de planta.

[26] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de Apatzingán. Carretera Apatzingán-Cuatro Caminos, km 17.5, C. P. 60781. Antúnez, Michoacán, México. alvarez.juan@inifap.gob.mx, pardo.saul@inifap.gob.mx

[27] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Calle Mariano Jiménez s/n, Colonia el Varillero, C. P. 60670, Apatzingán, Michoacán, México. juanjesusalvarado863@gmail.com.

Abstract

The use of biostimulants has emerged as a key strategy for improving crop growth, productivity and sustainability in protected horticultural production systems. The aim of this study was to evaluate the effect of different foliar-applied biostimulants on the vegetative growth, reproductive development and yield of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivated under shade-house conditions. The experiment was conducted during the spring-summer growing season at the Valle de Apatzingán Experimental Station, Michoacán, Mexico, using a completely randomised design with six treatments and ten replicates per treatment. The evaluated treatments were: T1, Maxigrow® + Fosfacel 800®; T2, Force®; T3, Biozime®; T4, K-Hum®; T5, a guano-based biofertiliser; and T6, an untreated control. Treatments were applied as foliar sprays using a manually operated backpack sprayer. Evaluations were carried out at 72, 83, 97, 111, 125 and 139 days after transplanting. Vegetative growth, reproductive development and yield variables were recorded. Analysis of variance revealed significant differences ($p \leq 0.05$) among treatments for several evaluated variables. Treatment 4 promoted vegetative growth, whereas Treatment 5 enhanced foliar development. The highest yields were obtained with Treatments 2 and 3, together with the guano-based biofertiliser, all of which significantly outperformed the untreated control. These findings demonstrate that foliar application of biostimulants represents a viable agronomic strategy for improving the performance of habanero pepper cultivated under shade-house conditions.

Keywords: *Capsicum chinense*, biostimulants, biofertilisers, protected agriculture, plant yield.

Introducción

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es una de las especies hortícolas de mayor importancia económica en México debido a su elevada demanda comercial, valor agregado y amplia utilización en la industria alimentaria. Además de su relevancia económica, sus frutos destacan por su alto contenido de capsaicinoides, carotenoides y compuestos fenólicos, metabolitos asociados con propiedades antioxidantes y nutracéuticas. El incremento de la producción bajo sistemas protegidos ha permitido mejorar el rendimiento y la calidad del cultivo; sin embargo, también ha generado la necesidad de implementar estrategias de manejo que incrementen la eficiencia fisiológica de las plantas y favorezcan una producción más sostenible (Murillo-Cuevas *et a*l., 2021; Rouphael y Colla, 2020).

Es indiscutible que la fertilización química constituye una práctica indispensable para alcanzar altos rendimientos en cultivos hortícolas; no obstante, una proporción importante de los nutrimentos aplicados no es aprovechada por las plantas debido a pérdidas por lixiviación, volatilización o fijación en el suelo, lo que incrementa los costos de producción y genera impactos ambientales. En base a lo anterior, los bioestimulantes vegetales representan una alternativa para mejorar la eficiencia en el uso de nutrimentos, estimular procesos fisiológicos y fortalecer el crecimiento y desarrollo de los cultivos, contribuyendo al mismo tiempo a sistemas agrícolas más sostenibles (Brown y Saa, 2015; du Jardin, 2015; Rouphael y Colla, 2020).

Los bioestimulantes comprenden una amplia gama de sustancias y microorganismos benéficos, entre ellos ácidos húmicos y fúlvicos, extractos vegetales, aminoácidos, extractos de algas, hidrolizados de proteínas y microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Estos productos actúan mediante mecanismos fisiológicos y bioquímicos que favorecen la absorción y asimilación de nutrimentos, incrementan la actividad fotosintética, promueven el desarrollo radicular y mejoran la tolerancia al estrés abiótico, traduciéndose con frecuencia en incrementos del crecimiento, la productividad y la calidad de los cultivos hortícolas (du Jardin, 2015; Brown y Saa, 2015; Rouphael y Colla, 2020).

En cultivos del género *Capsicum*, diversos estudios han demostrado que la aplicación de bioestimulantes favorece el crecimiento vegetativo, el desarrollo reproductivo y el rendimiento, además de mejorar algunas características físicas y nutracéuticas de los frutos. En chile habanero se han reportado incrementos en la calidad y productividad mediante el uso de bioestimulantes microbianos y otras formulaciones biológicas, lo que confirma el potencial de estas tecnologías como complemento de los programas convencionales de fertilización y manejo del cultivo (Murillo-Cuevas *et al*., 2021; Dong *et al*., 2020; Santoyo *et al*., 2021).

A pesar de los avances logrados, la respuesta del cultivo a los bioestimulantes depende de factores como la composición del producto, la dosis aplicada, la frecuencia de aplicación, las condiciones ambientales y el estado fisiológico de la planta. Por ello, es necesario generar información experimental que permita comparar diferentes formulaciones comerciales bajo condiciones específicas de producción protegida. Así, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes bioestimulantes aplicados vía foliar sobre el crecimiento vegetativo, el desarrollo reproductivo y el rendimiento del cultivo de chile habanero establecido bajo condiciones de casa sombra.

Materiales y Métodos

Sitio experimental

El estudio se realizó durante el ciclo primavera-verano en el Campo Experimental Valle de Apatzingán, ubicado en Antúnez, municipio de Parácuaro, Michoacán, México. El experimento se estableció en una casa sombra de 20 x 20 m utilizando una selección de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) de fruto color café, establecida mediante trasplante, con distancia de 1.5 m entre surcos y 0.60 m entre plantas. El manejo se basó en prácticas agronómicas habituales para la producción protegida del cultivo.

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos y diez repeticiones por tratamiento. Cada repetición correspondió a una planta experimental.

Los tratamientos evaluados fueron: 1 MGF Maxigrow® (1 mL L^{-1}) + Fosfacel 800® (1 g L^{-1}); 2 FOR Force® (1 mL L^{-1}); 3 BIO Biozime® (1 mL L^{-1}); 4 HF K-Hum® (10 mL L^{-1}), formulado a base de ácidos húmicos y fúlvicos; 5 BG Biofertilizante a base de guano (10 mL L^{-1}); 6 Testigo sin aplicación de bioestimulantes. Las abreviaturas anteriores se utilizaron en todos los cuadros y en la descripción de los resultados.

Aplicación de los tratamientos

Los bioestimulantes se aplicaron por vía foliar utilizando una aspersora manual de mochila con capacidad de 15 L, equipada con boquilla cónica. En cada aplicación se utilizaron aproximadamente 8 L de solución por tratamiento, procurando una cobertura uniforme del follaje.
Se realizaron seis aplicaciones. Cada aplicación se realizó cinco días antes de la evaluación correspondiente, con el propósito de cuantificar la respuesta de las plantas después del tratamiento.

Variables evaluadas

Las evaluaciones se realizaron a los 72, 83, 97, 111, 125 y 139 días después del trasplante (DDT). Las variables registradas comprendieron: crecimiento vegetativo: altura de planta, diámetro del tallo, número de ramas, número de hojas, longitud de hoja, ancho de hoja, longitud del pecíolo y longitud de entrenudos; desarrollo reproductivo: número de botones

florales, racimos con flores, flores por racimo y frutos amarrados; rendimiento: peso promedio del fruto, rendimiento por planta y rendimiento por unidad de superficie.

Análisis estadístico

Los datos de cada variable y fecha de evaluación se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de los tratamientos. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5 %. Asimismo, para cada variable se calcularon el coeficiente de variación (CV) y la diferencia mínima significativa (DMS). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2019).

Resultados y discusión

Crecimiento vegetativo

Los bioestimulantes influyeron significativamente sobre el crecimiento vegetativo del chile habanero durante las primeras etapas de desarrollo (Cuadro 1). A los 72 días después del trasplante (DDT), la altura de planta presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.001$), donde el tratamiento HF alcanzó la mayor altura (23.20 cm), seguido por los tratamientos BIO, MGF y FOR, mientras que el tratamiento BG y el testigo (T) registraron los valores más bajos. Estas diferencias se mantuvieron al final del ciclo (139 DDT), cuando el tratamiento HF presentó nuevamente la mayor altura (143.90 cm), superando significativamente a los tratamientos BIO y T, aunque sin diferencias estadísticas respecto a los tratamientos MGF, FOR y BG.

Respecto a la variable diámetro del tallo, también mostró diferencias entre tratamientos durante la etapa inicial ($p = 0.013$). el tratamiento HF produjo los tallos de mayor grosor (0.52 cm), mientras que el tratamiento testigo presentó el menor diámetro (0.33 cm). Sin embargo, en el último muestreo (139 DDT) las diferencias desaparecieron ($p = 0.396$), indicando que el efecto inicial de los bioestimulantes sobre esta variable tendió a homogenizarse conforme avanzó el desarrollo del cultivo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto de los bioestimulantes sobre el crecimiento vegetativo en chile habanero.

Tratamiento	Altura de planta (cm)		Diámetro de tallo (cm)	
	72	139	72	139
MGF	17.20 ± 1.25 ab	127.40 ± 3.26 ab	0.41 ± 0.02 ab	2.24 ± 0.13 a

FOR	17.10 ± 1.34 ab	132.80 ± 2.72 ab	0.43 ± 0.02 ab	2.26 ± 0.12 a
BIO	19.35 ± 2.10 ab	117.90 ± 5.95 b	0.50 ± 0.06 ab	2.16 ± 0.16 a
HF	23.20 ± 1.90 a	143.90 ± 4.63 a	0.52 ± 0.05 a	2.27 ± 0.08 a
BG	14.65 ± 1.38 b	133.70 ± 4.74 ab	0.37 ± 0.04 ab	2.20 ± 0.06 a
T	12.65 ± 1.80 b	115.40 ± 6.10 b	0.33 ± 0.04 b	1.94 ± 0.14 a
Significancia	***	***	**	ns
CV (%)	30.21	11.65	30.39	17.49
DMS	4.701	13.424	0.116	0.342

Valores expresados como media ± error estándar. Medias con letras distintas dentro de la misma columna difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). ns=No significativo; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$. CV. Coeficiente de Variación. DMS. Diferencia Minima Significativa.

Desarrollo foliar

Las variables foliares respondieron significativamente a la aplicación de los bioestimulantes (Cuadro 2). En longitud de hoja, el tratamiento BG presentó los mayores valores tanto a los 72 como a los 83 DDT, aunque sin diferencias estadísticas respecto a los tratamientos FOR y HF en algunas evaluaciones. En contraste, los tratamientos BIO y T registraron las hojas de menor longitud durante la mayor parte del periodo evaluado.

Una tendencia similar se observó para el ancho de hoja, donde los tratamientos BG y FOR alcanzaron las mayores dimensiones foliares, mientras que los tratamientos BIO, MGF y T mostraron los menores valores. Estas diferencias sugieren que algunos bioestimulantes favorecieron una mayor expansión foliar durante las primeras etapas del cultivo, lo que podría incrementar la superficie fotosintética disponible para el crecimiento posterior de las plantas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de los bioestimulantes sobre el desarrollo foliar en chile habanero.

Tratamiento	Longitud de hoja (cm)		Ancho de hoja (cm)	
	72 DDT	83 DDT	72 DDT	83 DDT
MGF	6.82 ± 0.33 b	12.40 ± 0.70 ab	5.00 ± 0.29 b	8.10 ± 0.46 ab
FOR	8.50 ± 0.49 ab	14.55 ± 0.83 a	6.25 ± 0.33 ab	9.45 ± 0.40 a
BIO	6.10 ± 0.87 b	10.40 ± 0.91 b	4.65 ± 0.48 b	6.75 ± 0.50 b
HF	8.85 ± 0.76 ab	12.90 ± 1.01 ab	6.15 ± 0.42 ab	8.25 ± 0.60 ab
BG	9.70 ± 0.71 a	14.65 ± 0.94 a	6.95 ± 0.50 a	9.45 ± 0.65 a

T	6.50 ± 0.72 b	11.80 ± 1.08 ab	4.80 ± 0.43 b	7.55 ± 0.62 ab
Significancia	***	*	***	**
CV (%)	27.335	22.684	23.296	20.865
DMS	1.898	2.600	1.177	1.545

Valores expresados como media ± error estándar. Medias con letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0.05$). * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$. CV. Coeficiente de Variación. DMS. Diferencia Mínima Significativa.

Desarrollo reproductivo

Las respuestas reproductivas fueron variables entre tratamientos (Cuadro 3). El número de racimos con flores mostró diferencias significativas a los 125 DDT ($p = 0.0049$), donde los tratamientos MGF y BIO presentaron los valores más altos, mientras que T registró el menor número de racimos. Posteriormente (139 DDT), el tratamiento BIO alcanzó el mayor número de racimos con flores, diferenciándose del tratamiento FOR, mientras que los demás tratamientos presentaron valores intermedios.

Con relación al número de frutos amarrados no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos a los 125 DDT, aunque al finalizar el periodo de evaluación (139 DDT) se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$). En esta fecha, los tratamientos BG, FOR y BIO registraron el mayor número de frutos, mientras que el tratamiento testigo presentó el menor valor, evidenciando una menor eficiencia reproductiva en ausencia de bioestimulantes (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efecto de los bioestimulantes sobre el desarrollo reproductivo en chile habanero.

Tratamiento	Racimos con flores (No.)		Frutos amarrados (No.)	
	125 DDT	139 DDT	125 DDT	139 DDT
MGF	3.50 ± 0.17 a	14.10 ± 2.61 ab	14.90 ± 2.53 a	53.10 ± 3.49 ab
FOR	2.90 ± 0.23 ab	4.90 ± 1.40 b	21.50 ± 2.50 a	59.60 ± 1.93 a
BIO	3.40 ± 0.22 a	17.10 ± 2.30 a	14.00 ± 3.32 a	57.60 ± 3.81 a
HF	3.10 ± 0.23 ab	8.60 ± 3.77 ab	29.20 ± 5.48 a	52.20 ± 3.13 ab
BG	3.20 ± 0.20 ab	10.90 ± 2.89 ab	24.00 ± 5.58 a	60.20 ± 3.04 a
T	2.30 ± 0.26 b	11.70 ± 2.95 ab	13.90 ± 3.84 a	40.10 ± 3.91 b
Significancia	**	*	**	***
CV (%)	22.800	77.495	65.761	19.313
DMS	0.627	7.794	11.547	9.316

Valores expresados como media ± error estándar. Medias con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$. CV. Coeficiente de Variación. DMS. Diferencia Mínima Significativa.

Componentes del rendimiento

Los componentes del rendimiento fueron significativamente influenciados por los tratamientos evaluados (Cuadro 4). El peso individual del fruto fue mayor en el tratamiento MGF, aunque estadísticamente similar al obtenido con los tratamientos FOR, BIO, HF y BG. Por el contrario, el tratamiento testigo produjo frutos significativamente más pequeños.

Respecto al rendimiento por planta y por unidad de superficie presentó el mismo patrón de respuesta. Los tratamientos FOR, BG, MGF, BIO y HF conformaron el grupo estadísticamente superior, mientras que el tratamiento testigo mostró reducciones significativas en ambas variables. En particular, el tratamiento FOR alcanzó el mayor rendimiento por planta (0.825 kg planta^{-1}) y por superficie (0.917 kg m^{-2}), aunque sin diferencias estadísticas respecto a los demás tratamientos con bioestimulantes. Estos resultados indican que la aplicación de bioestimulantes mejoró el desempeño productivo del cultivo en comparación con tratamiento testigo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Efecto de los bioestimulantes sobre componentes del rendimiento en chile habanero.

Tratamiento	Peso de fruto (g)	Rendimiento por planta (kg)	Rendimiento por área (kg m^{-2})
MGF	14.30 ± 0.61 a	0.759 ± 0.050 a	0.844 ± 0.055 a
FOR	13.85 ± 0.37 a	0.825 ± 0.027 a	0.917 ± 0.030 a
BIO	12.50 ± 0.48 a	0.720 ± 0.048 a	0.800 ± 0.053 a
HF	12.85 ± 0.40 a	0.671 ± 0.040 a	0.745 ± 0.045 a
BG	13.60 ± 0.49 a	0.819 ± 0.041 a	0.910 ± 0.046 a
T	10.45 ± 0.33 b	0.419 ± 0.041 b	0.466 ± 0.045 b
Significancia	***	***	***
CV (%)	11.156	18.816	18.816
DMS	1.293	0.118	0.132

Valores expresados como media ± error estándar. Medias con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). *** $p \leq 0.001$. CV. Coeficiente de Variación. DMS. Diferencia Mínima Significativa.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de bioestimulantes mejoró diversos componentes del crecimiento y del rendimiento del chile habanero en comparación con el testigo. En conjunto, estos resultados coinciden con lo reportado por Rouphael y Colla (2020) y por Adedayo y Babalola (2023), quienes señalan que los bioestimulantes favorecen procesos fisiológicos relacionados con la absorción de nutrientes, la eficiencia metabólica y la tolerancia al estrés, lo que se traduce en un mejor crecimiento y productividad de los cultivos hortícolas.

Durante las primeras etapas del cultivo, el tratamiento HF promovió una mayor altura de planta y diámetro del tallo, mientras que el tratamiento BG favoreció el desarrollo foliar. Estas respuestas son consistentes con lo descrito por Reyes-Pérez *et al*. (2021), quienes encontraron que la aplicación de ácidos húmicos estimula el crecimiento vegetal mediante una mayor absorción de nutrientes y un incremento en la actividad fisiológica de las plantas. Asimismo, Shahwar *et al*. (2023) indican que los biofertilizantes de origen biológico mejoran la disponibilidad de nutrimentos y favorecen el desarrollo vegetal mediante la estimulación de procesos microbiológicos benéficos.

En la etapa reproductiva se observó que los tratamientos BG, FOR y BIO presentaron el mayor número de frutos amarrados al final del ciclo, mientras que el testigo registró la menor respuesta. Este comportamiento sugiere que los bioestimulantes favorecieron la transición del crecimiento vegetativo hacia la fase reproductiva, resultado similar al reportado por Buelna-Tarín *et al*. (2024) en *Capsicum annuum*, donde la aplicación de bioestimulantes incrementó el crecimiento, la floración y la producción de frutos bajo condiciones de cultivo protegido.

Los componentes del rendimiento confirmaron el efecto positivo de los bioestimulantes, ya que los cinco tratamientos conformaron el grupo estadísticamente superior respecto al testigo. Aunque el tratamiento FOR presentó el mayor rendimiento promedio, no existieron diferencias significativas entre los tratamientos con bioestimulantes, lo que indica que todos representan alternativas con potencial para incrementar la productividad del chile habanero. Resultados semejantes fueron documentados por Jasso-Cantú *et al*. (2023) en pimiento morrón, quienes observaron incrementos en el rendimiento mediante el uso de extractos vegetales con efecto bioestimulante. De manera similar, Rouphael y Colla (2020) concluyen que los bioestimulantes constituyen una herramienta sostenible para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos hortícolas.

Conclusiones

Los tratamientos que mostraron diferencias estadísticas significativas respecto al testigo incrementaron variables relacionadas con el vigor vegetativo y el desempeño fisiológico del cultivo, lo que confirma el potencial de los bioestimulantes como herramientas para mejorar el crecimiento de las plantas bajo condiciones de producción protegida. La ausencia de diferencias significativas en algunas variables indica que la respuesta de las plantas a los bioestimulantes no es uniforme, por lo que su evaluación debe considerar múltiples indicadores morfológicos y productivos, en lugar de una sola variable de respuesta. En conjunto, los resultados demuestran que el uso de bioestimulantes constituye una alternativa agronómica viable para favorecer el desarrollo del chile habanero, proporcionando información útil para optimizar los programas de manejo del cultivo y establecer estrategias de producción más sostenibles.

Literatura citada

Adedayo, A. A., & Babalola, O. O. (2023). The potential of biostimulants on soil microbial community: A review. *Frontiers in Industrial Microbiology, 1*. 1308641. https://doi.org/10.3389/finmi.2023.1308641

Brown, P., & Saa, S. (2015). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science, 6*, 671. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671

Buelna-Tarín, S., Romero-Félix, C. S., Bojórquez-Ramos, C., Lugo-García, G. A., & Sánchez-Soto, B. H. (2024). Bioestimulantes y solución Steiner en crecimiento y producción de *Capsicum annuum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *15*(5), e3255. https://doi.org/10.29312/remexca.v15i5.3255

Dong, C., Wang, G., Du, M., Niu, C., Zhang, P., Zhang, X., Ma, D., Ma, F., & Bao, Z. (2020). Biostimulants promote plant vigor of tomato and strawberry after transplanting. *Scientia Horticulturae, 267*, 109355. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109355

du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae, 196*, 3-14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Jasso-Cantú, D., Rocha-Rivera, M. F., Ramírez-Rodríguez, H., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Díaz-Jiménez, M. L. V., Rodríguez-García, R., & Carrillo-Lomelí, D. A. (2023). Extractos de plantas como bioestimulantes de crecimiento, rendimiento y calidad de fruto en pimiento

morrón. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *10*(2). https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3559

Murillo-Cuevas, F. D., Cabrera-Mireles, H., Adame-García, J., Vásquez-Hernández, A., Martínez-García, A. J., & Luria-Moctezuma, R. (2021). Bioestimulantes en la calidad de frutos de chile habanero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *12*(8), 1473-1481. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2900

Reyes-Pérez, J. J., Rivero-Herrada, M., Solórzano-Cedeño, A. E., Carballo-Méndez, F. J., Lucero-Vega, G., & Ruiz-Espinoza, F. H. (2021). Application of humic acids, chitosan and mycorrhizal fungus influence pepper growth and development. *Terra Latinoamericana*, *39*, e833. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.833

Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Editorial: Biostimulants in Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 40. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040

Santoyo, G., Guzmán-Guzmán, P., Parra-Cota, F. I., Santos-Villalobos, S., Orozco-Mosqueda, M. C., & Glick, B. R. (2021). Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy*, *11*(2), 219. https://doi.org/10.3390/agronomy11020219

Shahwar, D., Mushtaq, Z., Mushtaq, H., Alqarawi, A. A., Park, Y., Alshahrani, T. S., & Faizan, S. (2023). Role of microbial inoculants as biofertilizers for improving crop productivity: A review. *Heliyon*, *9*(6), e16134. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16134

SAS Institute Inc. (2019). SAS 9.4 language reference: Concepts (6th ed.). SAS Institute Inc.

Bioestimulantes y elicitores de resistencia: éxitos comerciales divergentes y posibles causas de la brecha traslacional

Nicolás Alberto Priego-Ranero[28], Martin Heil

Resumen

La agricultura debe aumentar la producción de alimentos y reducir simultáneamente el uso de plaguicidas. Los bioestimulantes y los elicitores de resistencia ofrecen vías complementarias para lograrlo, pero su éxito comercial difiere notablemente. Búsquedas bibliométricas en Web of Science y la revisión exploratoria de los resúmenes de los 200 artículos más citados y los 200 más recientes de cada campo mostraron que aproximadamente 92 % de la literatura sobre bioestimulantes apareció desde 2016 y que cerca de 80 % de esos estudios evaluó productos preexistentes. En contraste, la literatura sobre elicitores tiene una historia mucho más larga y está dominada por investigación básica con un mayor impacto por artículo, pero ha originado comparativamente pocos productos. Proponemos que la brecha translacional en el campo de los elicitores se debe a las diferencias entre las condiciones óptimas para cumplir con los estándares de buenas prácticas en la ciencia y las condiciones reales en el campo. La ciencia opera bajo la presión de producir rápido resultados estadísticamente significativos y pala lograrlo, apunta por un estricto control de parámetros altamente estandarizados y reporta respuestas que se pueden observar en poco tiempo y las cuales normalmente muestran fuertes efectos: asi operando bajo condiciones que raras veces son compatibles con la realidad en el campo. Además, los costos de la resistencia, la dependencia del contexto, la baja visibilidad de los beneficios preventivos y los obstáculos regulatorios contribuyen a la brecha translacional. Su reducción exige validar rendimiento, estabilidad y costos bajo múltiples genotipos, ambientes y presiones bióticas.

Palabras clave: Agricultura orgánica, control biológico, inductores de resistencia, sistema inmune vegetal, sustentabilidad.

Abstract

In a world that must assure significant yield increases at decreased rates of pesticide use, biostimulants like microbial inoculants, algal extracts, protein hydrolysates, humic/fulvic

[28] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Irapuato, Km 9.6 Libramiento Norte, Carretera Irapuato–León, C.P. 36824, Irapuato, Guanajuato, México. correos: nicolas.priego@cinvestav.mx; martin.heil@cinvestav.mx

acids, chitosan and mineral (e.g. silicon) fertilizers open interesting perspectives because they improve plant growth and yield via natural mechanisms. Frequently, these preparations also stimulate the plant's immune system. Curiously, though, biostimulants made it to the markets, in many cases in spite of lacking any solid scientific basis, while the decades-long intensive research efforts dedicated to resistance elicitors (immunostimulants) could not be translated into a significant number of products. The aim of the present contribution is to analyse the dimension of and the possible reasons for this translational gap. We identify the cultural differences between what is considered good scientific practice and agricultural reality as a major source of translational failure. Science aims at the rapid production of 'reproducible', statistically significant results and thus, is performed under controlled experimental conditions that are optimised to obtain a $p < 0.05$: setups that hardly ever are compatible with agricultural reality. In addition, high costs of upscaling, regulatory issues, context-dependency and the lack of immediately visible effects compromise the acceptance of immunostimulants by the industry and the final user. For these reasons, we suggest that showing growth promotion effects or adding compounds that cause such effects to the formulated immunostimulant might facilitate the positioning of 'plant vaccines' as highly promising tools for a future, preventive crop protection from pests and diseases.

Keywords: Biological control, organic farming, plant immunity, resistance inducers, sustainability.

Introducción

La agronomía y la agroindustria actuales deben alcanzar una meta aparentemente imposible: producir una cantidad cada vez mayor de alimentos para una población humana en continuo crecimiento, en una superficie agrícola cada vez menor y reduciendo el uso de plaguicidas, a fin de minimizar el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad. Esta meta se establece claramente en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (FAO, 2018), particularmente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2: "Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible"; 12: "Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles"; 13: "Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos"; y 15: "Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad".

Aunque el cumplimiento de estos objetivos parece casi imposible, los bioestimulantes y los

elicitores de resistencia ofrecen la posibilidad de mantener una alta productividad agrícola y, al mismo tiempo, reducir el daño ambiental. Por definición, los bioestimulantes mejoran el estado nutricional de las plantas o la eficiencia en el uso de los nutrientes y, con ello, favorecen su desarrollo, resiliencia ante el estrés abiótico, rendimiento y calidad. Estos efectos se producen cuando se aplican en cantidades muy pequeñas y mediante mecanismos independientes de su contenido de nutrientes (Yakhin et al., 2017; European Union, 2019; Li et al., 2024; Mashabela et al., 2025). Por su parte, los elicitores de resistencia —también denominados inductores de defensa o inmunoestimulantes— son compuestos, preparados u organismos que activan una mayor resistencia de las plantas frente a enemigos biológicos o factores de estrés abiótico (Walters et al., 2005; Boller & Felix, 2009; Quintana-Rodriguez et al., 2018; Yassin et al., 2021).

Resulta interesante que, aunque la definición formal de los bioestimulantes excluye la inducción de resistencia frente al estrés biótico, muchos de los inoculantes microbianos, extractos de algas, hidrolizados de proteínas, ácidos húmicos y fúlvicos, así como el quitosano y los estimulantes minerales del crecimiento utilizados como bioestimulantes, también pueden activar respuestas inmunitarias que aumentan la resistencia frente a plagas y enfermedades. Si este efecto se aprovechara de manera adecuada y generalizada, podría favorecer un cambio de paradigma: pasar de las estrategias curativas de control de plagas basadas en plaguicidas hacia un control biológico preventivo. Sin embargo, este potencial parece continuar subutilizado en las aplicaciones comerciales.

Mientras que el mercado mundial de los bioestimulantes se estima en 4.54 mil millones de dólares y se proyecta que alcance 12.86 mil millones en 2034 (Fortune Business Insights, 2026b), el mercado de los activadores vegetales —también denominados “activadores de las defensas vegetales”, “elicitores de resistencia”, entre otros términos— se valoró en apenas 1.01 mil millones de dólares en 2025 (Fortune Business Insights, 2026c). El presente trabajo busca identificar posibles causas de la brecha translacional entre la investigación sobre inmunoestimulantes vegetales —tradicionalmente denominados elicitores o inductores de resistencia— y su aprovechamiento como insumos agrícolas.

Materiales y métodos

Este trabajo se basa en una revisión narrativa de la literatura, realizada mediante búsquedas por palabras clave y complementada con el examen de las referencias citadas en los artículos identificados y de publicaciones posteriores que los citaron. No corresponde a una revisión de alcance (scoping review) ni a un metaanálisis. Para comparar la actividad científica se realizaron búsquedas en Clarivate Web of Science el 29 de julio de 2026. Se buscaron

"biostimulant*" en todos los campos y la combinación "(resistance OR defence) AND elicitor*", también en todos los campos. Se generaron informes de citas para ambas colecciones. De cada una se seleccionaron los 200 artículos más citados y los 200 más recientes, cuyos resúmenes se sometieron a una clasificación exploratoria no exhaustiva orientada a distinguir estudios de productos preexistentes de investigaciones principalmente básicas. Asimismo, se consultaron informes comerciales de acceso público y se registraron la fuente, el año base, el periodo de proyección y el valor monetario informado. Debido a diferencias entre definiciones y métodos de estimación, los valores se emplearon para comparar órdenes de magnitud, no como estimaciones estrictamente estandarizadas.

Resultados y discusión

Bioestimulantes y elicitores en el mercado

El mercado mundial de los agroquímicos se valoró en 299.7 mil millones de dólares estadounidenses en 2025 y se proyecta que alcance los 449.7 mil millones en 2033 (Grand View Research, 2026). Dentro de este mercado, los biofertilizantes —basados en microorganismos como *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Bacillus* y hongos micorrízicos arbusculares, entre otros, utilizados por su capacidad para fijar nitrógeno o solubilizar fosfatos— alcanzan los 2.81 mil millones de dólares (Fortune Business Insights, 2026a), mientras que el mercado de los reguladores del crecimiento vegetal —citocininas, auxinas, giberelinas, etileno y otros— alcanza 5.18 mil millones. El mercado de los bioestimulantes se estima actualmente en 4.54 mil millones y se proyecta que alcance 12.86 mil millones en 2034 (Fortune Business Insights, 2026b).

Algunos bioestimulantes constituyeron la base de las empresas que los comercializan. Maxicrop®, creado en 1947 y comercializado desde la década de 1950, se presenta como el primer extracto de algas vendido a gran escala, según la propia empresa (https://maxicrop.wordpress.com/the-history-of-maxicrop/). Kelpak® describe como su primer hito la identificación, en 1975, de efectos benéficos del alga parda *Ecklonia maxima* sobre el crecimiento vegetal (https://www.kelpak.com/milestones.html). Actualmente, grandes empresas agroquímicas incluyen bioestimulantes entre sus productos estrella. Syngenta destaca MEGAFOL®, basado en extractos vegetales; YieldOn®, compuesto por extractos vegetales y algales enriquecidos con oligoelementos; y VIVA®, una mezcla de polisacáridos, aminoácidos o proteínas y ácidos húmicos (https://www.syngenta.com/products/biologicals/blockbusters). Bayer Crop Science presenta Ambition®, una mezcla de aminoácidos y ácidos fúlvicos; Bayfolan Algae®, un extracto de *Ascophyllum nodosum;* y Yoa-lo® y Susteed®, basados en bacterias del suelo (https://www.cropscience.bayer.es/productos/biologicos/biostimulants).

No fue posible encontrar una clasificación confiable y consistente de los principales tipos de productos. Intelmarket Research® atribuye cerca de 40 % del mercado a extractos de plantas y algas, y ubica después a los ácidos húmicos y fúlvicos, las proteínas hidrolizadas y los microorganismos (Intelmarket Research, 2025). En cambio, Market.us® identifica las sustancias húmicas como el segmento dominante (36.70 %), seguidas por ácidos fúlvicos, extractos de algas, aminoácidos vegetales, hidrolizados proteicos, derivados de quitina y quitosano, micorrizas, rizobacterias y minerales benéficos (Market.us, 2026). Estas discrepancias refuerzan el carácter aproximado de la comparación.

Aunque faltan cifras directamente comparables, el número y el valor de los productos basados principalmente en inmunoestimulación parecen muy inferiores a los de los bioestimulantes. Destaca Bion® (acibenzolar-S-metilo), un benzotiadiazol desarrollado por Ciba-Geigy, actualmente Syngenta, que imita la señalización por ácido salicílico e induce resistencia sistémica adquirida (Görlach et al., 1996; Tally et al., 1999; Oostendorp et al., 2001). Pese a que los costos metabólicos de esta resistencia pueden reducir drásticamente el rendimiento, en particular con baja disponibilidad de nitrógeno (Heil et al., 2000), Bion® mantiene presencia comercial. Otros dos productos que contienen hormonas vegetales inductoras de las defensas son StimProJA™ y StimProSA™, ambos comercializados como "reguladores del crecimiento vegetal" por la empresa Omex. Estos productos contienen 0.025 % de ácido jasmónico (AJ) y 10 % de ácido salicílico (AS), respectivamente, por lo que sus efectos benéficos pueden atribuirse a la activación de vías centrales de defensa. Sin embargo, estos productos y algunos otros disponibles en el mercado están lejos de alcanzar una distribución o importancia económica comparables con las de los bioestimulantes.

Diferencias bibliométricas entre bioestimulantes y elicitores

Las búsquedas recuperaron 6,918 registros sobre bioestimulantes y 7,379 sobre elicitores. Aunque la producción acumulada fue semejante, las trayectorias temporales y los indicadores de impacto fueron marcadamente distintos. El tema del sistema inmune de las plantas se discute desde el inicio del siglo pasado (Ward, 1902), el fenómeno de la inmunidad adquirida en las plantas se conoce desde la década de 1920 (Combes, 1918; Kostoff, 1928), y los primeros informes sobre la "vacunación" de plantas —es decir, la inmunidad frente a virus inducida por una infección viral previa— aparecieron en la década de 1930 (Chester, 1933; Caldwell & Russell, 1935). Sin embargo, no fue sino hasta la década de 1980 cuando el tema comenzó a atraer el interés de una comunidad científica más amplia. Probablemente, este interés fue impulsado por los trabajos pioneros de Frank Caruso y Joseph Kuć, quienes demostraron que la resistencia sistémica adquirida podía inducirse artificialmente para

proteger los cultivos frente a enfermedades graves y que dicha protección podía incrementar el rendimiento en condiciones de campo abierto (Caruso & Kuć, 1977; 1979). Cabe mencionar que la identificación de los compuestos secundarios y de ciertas proteínas como parte de la defensa de las plantas contra herbívoros y patógenos también se llevó a cabo durante la década de 1970 (Feeny, 1970; Van Loon & Van Kammen, 1970) mientras los primeros trabajos sobre "defensas inducidas" contra insectos herbívoros se publicaron a principios de la década de 1980 (Bishop et al., 1981; Baldwin & Schultz, 1983).

En contraste, la investigación sobre bioestimulantes tiene una historia mucho más corta: 6,342 de los 6,918 artículos recuperados se publicaron a partir de 2016; es decir, cerca de 92 % de la literatura mundial sobre bioestimulantes apareció en los últimos diez años (Figura 1).

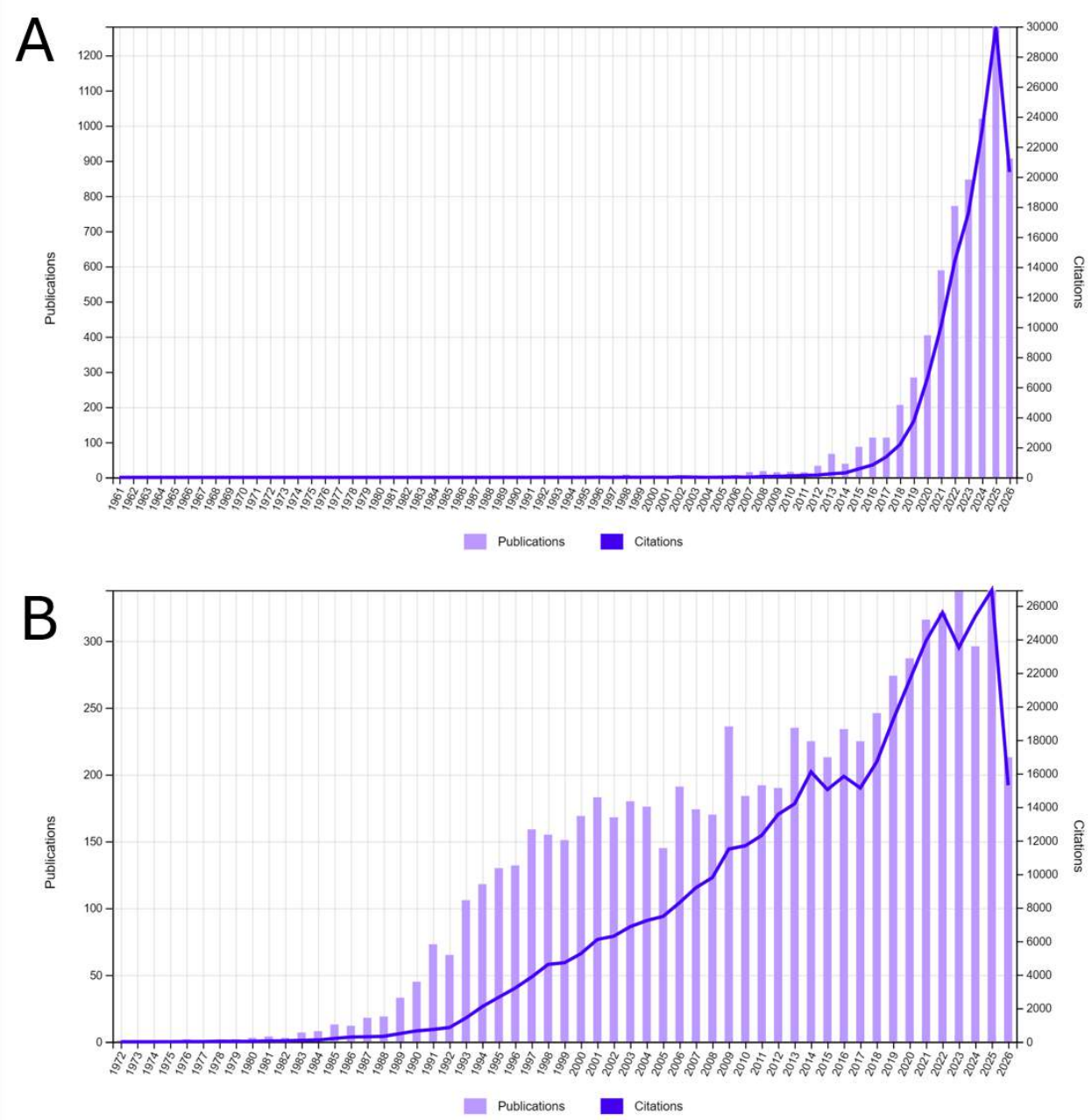


Figura 1. Número anual de artículos y citas en la investigación sobre bioestimulantes (A) e inmunoestimulantes o elicitores (B). Los gráficos se generaron mediante Citation Report para las búsquedas "biostimulant*" y "(resistance OR defence) AND elicitor*" en Clarivate Web

of Science. Datos consultados el 29 de julio de 2026.

La misma tendencia se observa en las citas de los cinco artículos más citados de cada campo y en los factores de impacto de las revistas correspondientes (Cuadro 1).

Cuadro 1. Los cinco artículos más citados sobre elicitores y bioestimulantes.

Trabajo	Títlulo (inicio)	Revista	JIF	Citas
Elicitors				
(Dodds & Rathjen, 2010)	Plant immunity: towards an integrated view…"	Nat Rev Genet	51.4	2,631
(Boller & Felix, 2009)	"A renaissance of elicitors: …"	Annu Rev Plant Biol	26.4	2,559
(Rabea et al., 2003)	"Chitosan as antimicrobial agent:.."	Biomacromolecules	5.9	2,492
(Eulgem et al., 2000)	"The WRKY superfamily of plant transcription factors"	Trends Plant Sci	21.2	2,442
(Thordal-Christensen et al., 1997)	"Subcellular localization of H_2O_2 in plants…"	Plant J	6.2	2,278
Biostimulants				
(du Jardin, 2015)	"Plant biostimulants: Definition, concept,.."	Sci Horticult	4.6	1,941
(Calvo et al., 2014)	"Agricultural uses of plant biostimulants"	Plant & Soil	4.8	1,559
(Backer et al., 2018)	"Plant growth-promoting rhizobacteria: .."	Front Plant Sci	5.9	1,381
(Khan et al., 2009)	"Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development"	J Plamt Growth Reg	4.2	1,125
(Yakhin et al., 2017)	"Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective"	Front Plant Sci	5.9	1,004

Posibles causas 1 Reproducibilidad versus generalizabilidad

La reproducibilidad es un criterio central de la buena práctica científica y suele buscarse mediante el uso de organismos y ambientes estrictamente estandarizados. En la práctica experimental, para alcanzar esta meta, suelen utilizarse plantas de un solo genotipo cultivadas

bajo condiciones uniformes de humedad, temperatura, intensidad y calidad de la luz, fotoperiodo y disponibilidad de agua y nutrientes. Asimismo, se procura que las plantas no hayan estado expuestas previamente a infecciones, herbivoría, competencia u otras condiciones de estrés. Posteriormente, se aplica un tratamiento bien definido en un momento específico. El equivalente en la investigación médica sería el uso de ratas de la misma edad, alimentadas con una dieta idéntica, mantenidas en espacios semejantes y sin antecedentes de enfermedades o tratamientos farmacológicos.

Esta estrategia permite atribuir los efectos observados a un factor específico y suele generar datos con una variabilidad reducida, lo que facilita la detección de diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, como señala Andrea Ablasser, una de las inmunólogas más icónicas del siglo XXI, para los estudios sobre los receptores del ADN en las células humanas "…studies of receptor-mediated responses are often performed using a single well-defined ligand. However, within the context of genuine stress responses,… cells usually receive multiple inputs or experience many environmental alterations simultaneously" (Ablasser & Chen, 2019). En otras palabras, la reproducibilidad obtenida mediante la estandarización de los organismos y de su ambiente no garantiza que el conocimiento generado sea transferible a otros organismos o condiciones. La estandarización es indispensable y ha permitido enormes avances científicos. No obstante, no todos los objetos de estudio pueden estandarizarse, y precisamente la medicina y la agronomía trabajan con sistemas biológicos no completamente estandarizables. Para generar conocimiento que sea transferible al 'mundo real', un valor $p < 0.05$ es posiblemente no el mejor criterio para la optimización de nuestros diseños experimentales.
De hecho, John Ioannidis, un líder mundial en estadística, big data y diseños experimentales para la medicina, explica que diseños experimentales que aumentan la relación señal-ruido y de tal manera la probabilidad de observar efectos estadísticamente significativos viene a costa de una reducción de la generalizabilidad de los resultados (Ioannidis et al., 2014). Por ello, los diseños deberían optimizar no solo la significancia estadística, sino también la generalizabilidad, por ejemplo, mediante la inclusión de varios genotipos y de individuos con diferentes historias de enfermedades etc. (Ioannidis et al., 2014).

Posibles causas 2 Incentivos científicos y necesidades de la industria

Los investigadores deben producir resultados novedosos con rapidez, mientras que la industria necesita efectos repetibles, escalables y económicamente relevantes. Los organismos modelo, como *Arabidopsis thaliana*, permiten experimentos rápidos y económicos, pero los proyectos suelen medir respuestas de corto plazo —expresión génica, cambios bioquímicos o bioensayos— y rara vez abarcan ciclos completos de cultivo, varios

años o condiciones agrícolas contrastantes. Además, incluso con una definición restrictiva de traducción —que un gen de Arabidopsis produzca un efecto agronómico deseable al transferirse al maíz y evaluarse en campo—, se ha estimado un éxito de apenas 0.5 % (Simmons et al., 2021; Yaschenko et al., 2024). Por ejemplo, de 1,671 genes identificados en Arabidopsis y usados para transformar plantas de maíz, solo 22 dieron resultados prometedores (Yaschenko et al., 2024).

El requisito de novedad también desalienta la repetición independiente de experimentos. Así, la reproducibilidad se invoca como criterio de calidad, pero pocas veces se evalúa directamente, y la extrapolación desde modelos homogéneos hacia cultivos heterogéneos queda insuficientemente probada. Se requieren, por tanto, estrategias explícitas para determinar cuándo un resultado es transferible entre genotipos, especies y ambientes.

Posibles causas 3 - Costos de la resistencia y dependencia del contexto

La activación defensiva consume recursos y puede perjudicar a plantas que ya enfrentan limitaciones de agua o nutrientes. El tratamiento puede entonces no inducir resistencia o producir penalizaciones de crecimiento, rendimiento o fitotoxicidad. En Bion®, por ejemplo, los costos de la resistencia inducida pueden causar pérdidas importantes de rendimiento, particularmente con baja disponibilidad de nitrógeno (Heil et al., 2000).

La eficacia también depende del genotipo, la ontogenia, el ambiente y la historia previa de la planta. Las interacciones entre vías defensivas hacen que una planta previamente atacada no responda como una planta sin antecedentes de estrés. Además, los costos varían con el tipo de resistencia, la carga del patógeno y la edad de la planta (Susi & Laine, 2015). Por ello, un bioensayo realizado en condiciones óptimas no basta para predecir el balance agronómico entre protección y rendimiento.

***Posibles causas 4* - Los microorganismos benéficos no son plaguicidas en polvo**

Los inoculantes vivos agregan otra capa de dependencia del contexto: son organismos con requerimientos propios, no sustancias químicas inertes. Para ser eficaces deben sobrevivir, establecerse, interactuar con la planta y expresar la función esperada. Estos procesos dependen de la cepa y su estado fisiológico, del genotipo y desarrollo de la planta, del suelo, el clima y la microbiota residente. Una dosis constante no garantiza, por tanto, una exposición ni una respuesta equivalentes entre ambientes.

Posibles causas 5 - Sin enemigo no hay efecto visible

La naturaleza preventiva de la resistencia inducida dificulta demostrar su beneficio. El efecto solo se vuelve visible cuando plantas tratadas y no tratadas son atacadas por el enemigo frente al cual actúa la defensa. Si este no aparece, el productor puede concluir que el tratamiento careció de valor, aunque la capacidad defensiva haya aumentado.
Además, la resistencia inducida rara vez protege frente a todos los enemigos y las interacciones entre vías pueden modificar la susceptibilidad a organismos con estrategias de ataque distintas. Demostrar valor comercial exige ensayos amplios que incluyan presiones bióticas contrastantes, algo difícil dentro de los tiempos y presupuestos habituales de la investigación académica.

Posibles causas 6 - Obstáculos posteriores a la investigación

La brecha continúa después de la validación agronómica. El escalamiento y el registro implican costos elevados y marcos regulatorios que no siempre se adaptan a productos de composición compleja o con mecanismos distintos de los fertilizantes y plaguicidas convencionales (du Jardin, 2015).

Muchos bioestimulantes llegaron al mercado antes de conocerse sus componentes activos; la investigación validó después su eficacia y mecanismos {Li, 2024 #12510}. Los elicitores siguieron la trayectoria inversa: existe abundante conocimiento sobre receptores, señalización y respuestas defensivas, pero pocos productos superaron la validación en campo, el registro y la adopción. La brecha parece deberse menos a una falta de conocimiento mecanístico que a la dificultad de convertir efectos dependientes del contexto en beneficios estables, visibles y rentables.

Conclusiones

El contraste entre bioestimulantes y elicitores no se explica por una menor actividad científica sobre estos últimos, sino por trayectorias de innovación opuestas. Numerosos bioestimulantes siguieron una ruta de la práctica al mecanismo: su utilidad precedió a la explicación científica. Los elicitores recorren la ruta más difícil, del mecanismo a la aplicación, y deben conservar su eficacia frente a variaciones genéticas, ambientales y ontogénicas, sin imponer costos que anulen la protección.

Cerrar esta brecha requiere incorporar la generalización como objetivo experimental y evaluar, desde etapas tempranas, rendimiento, costos metabólicos, estabilidad, formulación y compatibilidad con estreses múltiples. Los ensayos multigenotipo, multisitio y

multianuales deben complementar los indicadores moleculares. Asimismo, combinar inmunoestimulación con beneficios visibles, como promoción del crecimiento o estabilidad del rendimiento, podría facilitar la adopción por productores e industria. La investigación básica sigue siendo indispensable, pero debe integrarse en una ruta translacional diseñada desde el inicio para la variabilidad del campo.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial generativa

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT (OpenAI) como apoyo para la traducción del inglés al español, la revisión lingüística y la reorganización del texto. Todas las afirmaciones, interpretaciones y conclusiones fueron revisadas críticamente y validadas por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por el contenido final.

Agradecimientos

Los Autores agradecen apoyo económico proporcionado por parte de la SECIHTI en forma de una beca para estudiantes de maestría de NAPR (CVU 1075356, número de apoyo 4040783) y del proyecto PEE-2026-G-403 otorgado a MH.

Literatura citada

Ablasser, A. & Chen, Z.J.J. (2019). cGAS in action: Expanding roles in immunity and inflammation. *Science* 363(6431)**,** eaat8657.https://doi.org/10.1126/science.aat8657

Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., et al. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science* 9, 1473.https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473

Baldwin, I.T. & Schultz, J.C. (1983). Rapid changes in tree leaf chemistry induced by damage: evidence for communication between plants. *Science* 221277 – 279.https://doi.org/10.1126/science.221.4607.277

Bishop, P.D., Makus, D.J., Pearce, G. & Ryan, C.A. (1981). Proteinase inhibitor-inducing factor activity in tomato leaves resides in oligosaccharides enzymatically released from cell walls. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 78(6)**,** 3536–3540.https://doi.org/10.1073/pnas.78.6.3536

Boller, T. & Felix, G. (2009). A renaissance of elicitors: perception of microbe-associated

molecular patterns and danger signals by pattern-recognition receptors. *Annual Review of Plant Biology* 60(1)**,** 379–406.https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105346

Caldwell, J. & Russell, E.J. (1935). On the interactions of two strains of a plant virus; experiments on induced immunity in plants. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences* 117(803)**,** 120–139.https://doi.org/10.1098/rspb.1935.0019

Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J.W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil* 383(1-2)**,** 3–41.https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8

Caruso, F.L. & Kuć, J. (1977). Field protection of cucumber, watermelon and muskmelon against *Colletotrichum langenarium* by *Colletotrichum langenarium*. *Phytopathology* 67(10)**,** 1290–1292

Caruso, F.L. & Kuć, J. (1979). Induced resistance of cucumber to anthracnose and angular leaf spot by *Pseudomonas lachrymans* and *Colletotrichum lagenarium*. *Physiological Plant Pathology* 14, 191–201

Chester, K. (1933). The problem of acquired physiological immunity in plants. *Quarterly Review of Biology* 8(2)**,** 129–154.https://doi.org/10.1086/394430

Combes, R. (1918). Plant immunity in the face of immediate principles that they elaborate. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences* 167, 275–278

Dodds, P.N. & Rathjen, J.P. (2010). Plant immunity: towards an integrated view of plant-pathogen interactions. *Nature Reviews Genetics* 11(8)**,** 539–548 https://doi.org/10.1038/nrg2812

du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* 196, 3–14.https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Eulgem, T., Rushton, P., Robatzek, S. & Somssich, I. (2000). The WRKY superfamily of plant transcription factors. *Trends in Plant Science* 5(5)**,** 199–206.https://doi.org/10.1016/s1360-1385(00)01600-9

European Union (2019). Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009

and repealing Regulation (EC) No 2003/200. *Official Journal of the European Union* 62L170–171–127

FAO (2018). *Transformar la alimentación y la agricultura para alcanzar los ODS.* Rome, Italy: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 71p. (ISBN 978-92-5-130674-1)

Feeny, P. (1970). Seasonal changes in oak leaf tannins and nutrients as a cause of spring feeding by winter moth caterpillars. *Ecology* 51(4)**,** 565–581

Fortune Business Insights (2026a). "Biofertilizers Market Size, Share & Industry Analysis, and Regional Forecast, 2026–2034". Fortune Business Insights). disponible en: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biofertilizers-market-100413 [29.07.2026]

Fortune Business Insights (2026b). "Biostimulants Market Size, Share & Industry Analysis and Regional Forecast, 2026–2034". Fortune Business Insights). disponible en: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biostimulants-market-100414 [29.07.2026]

Fortune Business Insights (2026c). "Plant Activators Market Size, Share, and Industry Analysis, and Regional Forecast, 2026-2034". Fortune Business Insights). disponible en: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/plant-activators-market-114557 [29.07.2026]

Görlach, J., Volrath, S., Knauf-Beiter, G., Hengy, G., Beckhove, U., Kogel, K.-H., et al. (1996). Benzothiadiazole, a novel class of inducers of systemic acquired resistance, activates gene expression and disease resistance in wheat. *The Plant Cell* 8, 629–643. https://doi.org/10.1105/tpc.8.4.629

Grand View Research (2026). "Agrochemicals Market (2026 - 2033)", (ed.) G.V.R. (GVR). GVE R Grand View Research). Disponible en: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/agrochemicals-market [29.07.2026]

Heil, M., Hilpert, A., Kaiser, W. & Linsenmair, K.E. (2000). Reduced growth and seed set following chemical induction of pathogen defence: does systemic acquired resistance (SAR) incur allocation costs? *Journal of Ecology* 88(4)**,** 645–654.https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00479.x

Intelmarket Research (2025). "Biostimulants Market Growth Analysis, Dynamics, Key Players and Innovations, Outlook and Forecast 2025-2032". (City Vista Kharadi, Pune, Pimpri Chinchwad, Maharashtra, India: Intelmarket Research). Disponible en: https://www.intelmarketresearch.com/biostimulants-market-14274 [29.07.2026]

Ioannidis, J.P.A., Greenland, S., Hlatky, M.A., Khoury, M.J., Macleod, M.R., Moher, D., et al. (2014). Increasing value and reducing waste in research design, conduct, and analysis. *The Lancet* 383(9912)**,** 166–175.https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62227-8

Khan, W., Rayirath, U., Subramanian, S., Jithesh, M., Rayorath, P., Hodges, D., et al. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation* 28(4)**,** 386–399.https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x

Kostoff, D. (1928). Induced immunity in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 14(3), 236–237.https://doi.org/10.1073/pnas.14.3.236

Li, J., Lardon, R., Mangelinckx, S. & Geelen, D. (2024). A practical guide to the discovery of biomolecules with biostimulant activity. *Journal of Experimental Botany* 75(13)**,** 3797–3817.https://doi.org/10.1093/jxb/erae156

Market.us (2026). "Biostimulant Market". Market.us). Disponible en: https://market.us/report/biostimulant-market/ [29.07.2026]

Mashabela, M., Terefe, T., Kerchev, P., Sitole, L. & Mhlongo, M. (2025). Next-generation biostimulants: molecular insights, digital integration, and regulatory frameworks for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science* 16,1710899.https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1710899

Oostendorp, M., Kunz, W., Dietrich, B. & Staub, T. (2001). Induced resistance in plants by chemicals. *European Journal of Plant Pathology* 107(1)**,** 19–28. https://doi.org/10.1023/A:1008760518772

Quintana-Rodriguez, E., Duran-Flores, D., Heil, M. & Camacho-Coronel, X. (2018). Damage-associated molecular patterns (DAMPs) as future plant vaccines that protect crops from pests. *Scientiae Horticulturae* 237,207–220.https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.026

Rabea, E., Badawy, M., Stevens, C., Smagghe, G. & Steurbaut, W. (2003). Chitosan as antimicrobial agent: Applications and mode of action. *Biomacromolecules* 4(6)**,** 1457–1465.https://doi.org/10.1021/bm034130m

Simmons, C.R., Lafitte, H.R., Reimann, K.S., Brugière, N., Roesler, K., Albertsen, M.C., et al. (2021). Successes and insights of an industry biotech program to enhance maize agronomic traits. *Plant Science* 307, 110899.https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.110899

Susi, H. & Laine, A.-L. (2015). The effectiveness and costs of pathogen resistance strategies in a perennial plant. *Journal of Ecology* 103(2)**,** 303–315.https://doi.org/10.1111/1365-2745.12373

Tally, A., Oostendorp, M., Lawton, K., Staub, T. & Bassi, B. (1999). "Commercial development of elicitors of induced resistance to pathogens," in *Induced plant defenses against pathogens and herbivores: Biochemistry, Ecology, and Agriculture,* eds. A.A. Agrawal, S. Tuzun & E. Bent. (St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society Press), p 357–369.

Thordal-Christensen, H., Zhang, Z., Wei, Y. & Collinge, D. (1997). Subcellular localization of H_2O_2 in plants. H_2O_2 accumulation in papillae and hypersensitive response during the barley-powdery mildew interaction. *The Plant Journal* 11(6)**,** 1187–1194.https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1997.11061187.x

Van Loon, L.C. & Van Kammen, A. (1970). Polyacrylamide disc electrophoresis of the soluble leaf proteins from *Nicotiana tabacum var*. "Samsun" and "Samsun NN" II. Changes in protein constitution after infection with tobacco mosaic virus. *Virology* 40199–211.https://doi.org/10.1016/0042-6822(70)90395-8

Walters, D., Walsh, D., Newton, A. & Lyon, G. (2005). Induced resistance for plant disease control: Maximizing the efficacy of resistance elicitors. *Phytopathology* 95(12)**,** 1368–1373. https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1368

Ward, H.M. (1902). On the questions of "predisposition" and "immunity" in plants. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 11307–328

Yakhin, O.I., Lubyanov, A.A., Yakhin, I.A. & Brown, P.H. (2017). Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers in Plant Science*

72049.https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049

Yaschenko, A.E., Alonso, J.M. & Stepanova, A.N. (2024). Arabidopsis as a model for translational research. *The Plant Cell* 37(5)**,** in press.https://doi.org/10.1093/plcell/koae065

Yassin, M., Ton, J., Rolfe, S.A., Valentine, T.A., Cromey, M., Holden, N., et al. (2021). The rise, fall and resurrection of chemical-induced resistance agents. *Pest Management Science* 77(9)**,** 3900–3909.https://doi.org/10.1002/ps.6370

Compuestos con potencial bioestimulante en el cultivo *in vitro* de *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews

Javier Camacho-Morales[29], Lourdes Georgina Iglesias-Andreu, Mauricio Luna-Rodríguez[30], Susana Hernández-Sánchez

Resumen

Vanilla planifolia constituye la principal fuente de vainilla natural y representa una de las orquídeas de mayor importancia económica a nivel mundial. Debido al incremento sostenido en la demanda de esta especie, el cultivo *in vitro* se ha consolidado como una herramienta eficiente para la propagación masiva de genotipos sobresalientes y la conservación de material vegetal de alta calidad. En los últimos años, la incorporación de bioestimulantes al medio de cultivo ha surgido como una estrategia prometedora para mejorar el crecimiento y el desempeño fisiológico de las plantas; sin embargo, la información disponible sobre su aplicación en vainilla es aún escasa. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de compuestos a base de silicio (H_4SiO_4 y $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$), ácido hexanoico (HxA) y ácido fosforoso (H_3PO_3) sobre el crecimiento y desarrollo *in vitro* de plántulas de *V. planifolia*. Para ello, se emplearon segmentos nodales de 1 a 2 cm cultivados en medio MS suplementado con seis concentraciones (0, 1, 2, 3, 4 y 5 mmol·L^{-1}) de cada compuesto. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con cinco repeticiones por tratamiento. Transcurridos 90 días de cultivo, se evaluaron variables morfométricas y fisiológicas. Los resultados mostraron que el HxA y H_3PO_3 no promovieron el desarrollo de los explantes y a concentraciones superiores a 2 mmol·L^{-1} ocasionaron necrosis progresiva y muerte del tejido vegetal. En cambio, el H_4SiO_4 favoreció un crecimiento superior al obtenido con $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$. Particularmente, la concentración de 1 mmol·L^{-1} de H_4SiO_4 estimuló significativamente la formación de brotes, hojas y raíces. En conjunto, los resultados sugieren que la naturaleza química del compuesto determina la respuesta morfofisiológica de las plántulas, recomendándose la suplementación con H4SiO4 a 1 mmol·L^{-1} para optimizar el cultivo *in vitro* de vainilla.

[29] Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA), Universidad Veracruzana, Campus para la Cultura, las Artes y el Deporte Av. de las Culturas Veracruzanas No. 101, Col. Emiliano Zapata, CP 91090, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.
[30] Laboratorio de Genética e Interacciones Planta-Microorganismos, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana, Lomas del Estadio s/n, CP 91000, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

Palabras clave: vainilla, micropropagación, silicio, ácido hexanoico, ácido fosforoso.

Abstract

Vanilla planifolia Jacks. ex Andrews is the primary source of natural vanilla and one of the most economically important orchid species worldwide. Owing to the increasing demand for this crop, *in vitro* culture has become an efficient approach for the large-scale propagation of elite genotypes and the conservation of high-quality plant material. In recent years, the incorporation of biostimulants into culture media has gained attention as a promising strategy to enhance plant growth and physiological performance; however, information regarding their use in vanilla remains scarce. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of silicon-based compounds (H_4SiO_4 and $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$), hexanoic acid (HxA), and phosphorous acid (H_3PO_3) on the in vitro growth and development of *V. planifolia* seedlings. Nodal segments (1–2 cm) were cultured on MS medium supplemented with six concentrations (0, 1, 2, 3, 4, and 5 mmol·L^{-1}) of each compound. The experiment was conducted under a completely randomized design with five replicates per treatment. After 90 days of culture, morphometric and physiological parameters were assessed. The results indicated that HxA and H_3PO_3 did not promote explant development and, at concentrations above 2 mmol·L^{-1}, induced progressive necrosis and tissue death. In contrast, H_4SiO_4 promoted greater growth than $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$. Notably, supplementation with 1 mmol·L^{-1} H_4SiO_4 significantly enhanced shoot, leaf, and root development. Overall, the findings suggest that the chemical nature of the compound determines the morphophysiological response of the seedlings, and that supplementation with H_4SiO_4 at 1 mmol·L^{-1} may be a suitable strategy for optimizing *in vitro* vanilla culture.

Keywords: vanilla, micropropagation, silicon, hexanoic acid, phosphorous acid.

Introducción

Vanilla planifolia es una orquídea originaria de México de alto valor económico, ya que constituye la principal fuente de vainillina, uno de los compuestos aromáticos de mayor importancia comercial a nivel mundial, ampliamente utilizado en las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica y de perfumería (Arya *et al*., 2021; Herrera-Cabrera *et al*., 2022).

En la actualidad, se estima que uno de los principales factores que afectan la producción de este cultivo es su baja tolerancia al estrés abiótico y a su alta susceptibilidad a plagas y enfermedades, condiciones asociadas con su reducida variabilidad genética derivada por su

extensa propagación vegetativa (Li *et al*., 2020). Debido a su relevancia económica y a las amenazas que enfrenta, *V. planifolia* está incluida en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y es la única especie del género registrada en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, bajo la categoría de protección especial. Su distribución restringida y la disminución de poblaciones silvestres la colocan en riesgo de erosión genética, motivo por el que ha sido considerada en peligro de extinción (Ramos-Rodríguez, 2024).

Los métodos de cultivo *in vitro* aplicados a *V. planifolia* han mostrado avances importantes en las últimas décadas, ya que ofrecen ventajas como la reducción del tiempo de propagación, la obtención de material vegetal libre de patógenos y la conservación del germoplasma a largo plazo, en comparación con métodos convencionales de propagación (Erawati *et al*., 2020). Esta especie presenta aún retos relacionados con la tasa de multiplicación, establecimiento y aclimatación de plántulas, lo que hace necesario explorar nuevos compuestos y modificaciones al medio de cultivo que permitan mejorar la eficiencia de los protocolos existentes (Rios-Barreto *et al*., 2023; Sivanesan & Park, 2014).

En este contexto, el uso de bioestimulantes ha cobrado relevancia como una estrategia para mejorar el crecimiento vegetal, así como para inducir respuestas fisiológicas asociadas con la tolerancia al estrés y la resistencia a patógenos (Du-Jardin, 2015). Entre estos compuestos, el silicio (Si) ha sido ampliamente estudiado debido a su capacidad para fortalecer la estructura de la pared celular, incrementar el contenido de clorofila y mejorar la tolerancia frente a diferentes factores de estrés (Epstein, 2001; Gomes *et al*., 2008). En sistemas de cultivo *in vitro*, la suplementación con Si ha demostrado mejorar diversas características morfológicas y fisiológicas en plántulas de diferentes especies, incluidas algunas orquídeas (Sivanesan & Park, 2014). Entre los efectos reportados se encuentran el incremento en el contenido de hemicelulosa y lignina, lo que contribuye a aumentar la rigidez de la pared celular y mejorar el desarrollo vegetal (Camargo *et al*., 2007).

Además del Si, otros compuestos químicos han mostrado potencial como bioestimulantes en plantas. Entre ellos, el ácido hexanoico (HxA) y el ácido fosforoso (H_3PO_3) han sido ampliamente descritos como inductores de resistencia, debido a su capacidad para activar mecanismos fisiológicos y bioquímicos relacionados con la tolerancia al estrés y la defensa contra patógenos. Estos compuestos pueden estimular diversas respuestas metabólicas que fortalecen los mecanismos de defensa vegetal, particularmente frente a patógenos del suelo (Lobato *et al*., 2010; Vicedo *et al*., 2009; Guest & Grant, 1991).

A pesar del potencial reportado para estos compuestos en diferentes especies vegetales, en el género *Vanilla* existe información limitada sobre su efecto en condiciones de cultivo *in vitro*. Debido a la importancia económica de este cultivo y a las limitaciones que presenta su propagación, resulta necesario investigar si la adición controlada de compuestos con potencial bioestimulante pueden mejorar el crecimiento y desarrollo de plántulas cultivadas *in vitro*, así como contribuir a optimizar los protocolos de propagación y conservación de esta especie. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de compuestos a base de Si, HxA y H_3PO_3 en el cultivo *in vitro* de *V. planifolia.*

Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron plántulas de *V. planifolia* morfotipo "Mansa", propagadas *in vitro* provenientes de la colección activa del laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA) de la Universidad Veracruzana. Las vitroplantas fueron transferidas cada 12 semanas a medio semisólido Murashige & Skoog (MS) y se mantuvieron a 26 ± 2°C bajo un fotoperiodo de luz y oscuridad (16:8 h) con una intensidad lumínica de 50 μmoL·m^{-2}·s^{-1} provista por lámparas fluorescentes blancas.

Efecto de compuestos con potencial bioestimulante en el cultivo in vitro de V. planifolia

Se utilizaron vitroplantas de *V. planifolia* con raíces recién emergidas y sin contaminación. En cada plántula se realizaron cortes de segmentos nodales aproximadamente de 1 cm de longitud, asegurando que cada explante incluyera una yema axilar. Se establecieron 20 tratamientos, correspondientes a las concentraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 mmol·L^{-1} de ácido silícico hidratado (H_4SiO_4; Meyer®), silicato de sodio pentahidratado ($Na_2SiO_3·5H_2O$; Fisher®), ácido hexanoico (HxA; Sigma®) y ácido fosforoso (H_3PO_3; Sigma®). Los explantes se cultivaron en frascos de 57 × 73 mm colocando cuatro unidades por frasco, con 20 mL de medio MS suplementado con 30 g·L-1 de sacarosa (Meyer®) empleando 2,2 g·L^{-1} de Phytagel (Sigma®) como agente gelificante sin la adición de reguladores del crecimiento. El pH del medio de cultivo se ajustó a 5,8 con NaOH y HCl 1 N. Se esterilizo en autoclave a 1.5 kg·cm^{-2} durante 15 min a 120 °C. Los explantes se incubaron a temperatura 26 ± 2 ° C bajo un fotoperíodo de luz y oscuridad (16:8 h) con una intensidad luminosa de 50 μ·moL·m^{-2}·s^{-1} proporcionado por lámparas de luz fluorescentes blancas frías. Se registraron tasa de supervivencia, parámetros morfológicos (tamaño, biomasa seca, número y longitud de brotes, raíces y hojas), así como parámetros fisiológicos (contenido relativo de clorofila) después de 90 días de cultivo.

Determinación de pigmentos fotosintéticos

Para la determinación de pigmentos fotosintéticos se utilizó el método espectrofotométrico descrito por Runt *et al*. (1989) a partir de tres plantas por cada tratamiento. Se pesó 0.2 g de muestra para macerarlo en un mortero previamente enfriado, adicionando 20 mL de una mezcla 1:1 de acetona al 80% (v/v) y etanol absoluto frío al 20% (v/v) hasta extraer todos los pigmentos de la muestra, y se centrifugo a 6000 rpm durante 12 min. Se recuperó el sobrenadante obtenido y se midió la absorbancia utilizando un espectrofotómetro a 663 nm para determinar el contenido de clorofila A, 645 nm para clorofila B y 441 nm para carotenoides, utilizando una muestra de acetona al 80% como blanco. Para la determinación de clorofila total, A, B, y carotenoides se utilizaron las ecuaciones descritas por Arnon (1949), usando los coeficientes de absorción específicos dados por Mackinney mediante las siguientes fórmulas:

$$Clorofila\ A\ =\ [(12.25\ \times\ Abs\ 663\ -\ 2.25\ x\ Abs\ 645)]\ \times\ V\ /\ 100\ \times\ W$$
(1)

$$\text{Clorofila B}\ =\ [(20.30\ \times\ \text{Abs}\ 645\ -\ 4.91\ \text{x Abs}\ 663)]\ \times\ \text{V}\ /\ 100\ \times\ \text{W}$$
(2)

$$Clorofila\ Total\ =\ [(17.76\ \times\ A645\ +\ 7.34\ x\ A663)]\ \times\ V\ /\ 100\ \times\ W$$
(3)

$$Carotenoides\ =\ [(4.46\ \times\ A441\ -\ Clorofila\ Total)]\ \times V\ /\ 100\ \times\ W$$
(4)

Donde V es el volumen total del extracto de acetona (mL) y W es el peso fresco (g) de la muestra.

Determinación de biomasa seca

Se evaluó el crecimiento de las plántulas mediante el aumento de área foliar y producción de biomasa. El porcentaje de biomasa seca se determinó siguiendo la metodología descrita por Cázarez-Flores *et al*., (2024). Las plántulas se sometieron a secado durante 72 h en una estufa a 70 °C hasta peso constante. El análisis de la relación entre peso fresco y seco se calculó utilizando la siguiente formula:

$$Porcentaje\ de\ biomasa\ seca\ =\ [peso\ inicial\ -\ peso\ seco]/[peso\ inicial]\ x\ 100$$
(5)

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4 × 5, donde el primer factor correspondió al tipo de compuesto (H_4SiO_4, $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$, HxA y H_3PO_3) y el segundo factor a la concentración (1, 2, 3, 4 y 5 mmol·L^{-1}), generando un total de 20 tratamientos con cinco réplicas por tratamiento. Los datos morfológicos y fisiológicos se expresaron como media ($\bar{x}$) ± error estándar (EE). Previamente al análisis estadístico, se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro–Wilk. Posteriormente, los datos fueron sometidos a un análisis de varianza factorial (ANOVA de dos vías) aplicando una prueba post hoc de Tukey para encontrar diferencias significativas entre los tratamientos. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software GraphPad Prism versión 8, con un nivel de significación del 95 % ($p < 0,05$).

Resultados y discusión

Supervivencia

La tasa de supervivencia de las plántulas de *V. planifolia* después de 90 días de cultivo *in vitro* en el grupo control se mantuvo alrededor del 70 %, con una variabilidad moderada entre las repeticiones. En plántulas suplementadas con H_4SiO_4, la concentración 1 mmol·L^{-1} promovió un incremento en la supervivencia, alcanzando valores cercanos al 95%. Sin embargo, este porcentaje disminuyo de forma progresiva conforme se aumentó la concentración del compuesto. Por otro lado, el tratamiento con $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$, la concentración de 2 mmol·L^{-1} mostró un porcentaje de supervivencia similar al del grupo control (≈70 %), que al incrementar la concentración se registró una reducción marcada en la supervivencia.

En plántulas tratadas con HxAc, la concentración 1 mmol·L^{-1} promovió un incremento en la supervivencia, alcanzando valores cercanos al 85 %. Sin embargo, este porcentaje disminuyó de manera pronunciada conforme aumentó la concentración del compuesto, lo que finalmente provocó la muerte de los explantes. En el caso del H_3PO_3, la supervivencia alcanzo el 90% a la concentración 1 mmol·L^{-1} y del 85% a 2 mmol·L^{-1}. Sin embargo, al incrementar la concentración del compuesto se observó una diminución marcada en la supervivencia provocando la muerte de los explantes (Figura 1).

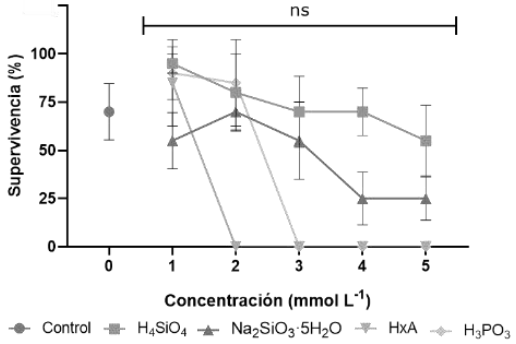


Figura 1. Supervivencia de plántulas de *V. planifolia* después de 90 días de cultivo *in vitro* en respuesta a diferentes concentraciones de los tratamientos. Los valores representan la media ± error estándar (EE).

Crecimiento y desarrollo de las plántulas

Las variables evaluadas, como formación de brotes, número de hojas y raíces, altura de la plántula y materia seca total en plántulas de *V. planifolia*, variaron de acuerdo con cada tratamiento. Todas las concentraciones H_4SiO_4 estimularon la formación de brotes, destacando la concentración de 1 mmol·L^{-1}, en la cual se observó un mayor número de estructuras como nudos, raíces, pelos absorbentes y hojas. Estos parámetros disminuyeron conforme aumentó la concentración del compuesto. En cambio, en los tratamientos con $Na_2SiO_3·5H_2O$, la concentración de 2 mmol·L^{-1} presentó valores similares al control; sin embargo, al aumentar la concentración se evidenció un retraso en el desarrollo de varias estructuras vegetativas. Este efecto fue más evidente en las concentraciones superiores a 2 mmol·L^{-1}, donde se observó un menor tamaño de las plántulas, así como una reducción en el número de hojas, raíces y en la materia seca total.

El H_4SiO_4 promovió el crecimiento de los explantes, siendo la concentración de 1 mmol·L^{-1} aquella en la que se observaron plántulas de mayor tamaño y con un desarrollo más vigoroso. Este efecto disminuyó progresivamente a medida que incremento la concentración del compuesto (Figura 2A). Por su parte, el tratamiento con $Na_2SiO_3·5H_2O$ mostró un comportamiento similar al del grupo control en términos de longitud y aspecto general de las plántulas.

Estos resultados se relacionan con el porcentaje de materia seca total, el cual fue superior en las plántulas tratadas con H_4SiO_4 a la concentración más baja (2.91 %), lo que indica un crecimiento más eficiente y una mayor acumulación de biomasa. Los tratamientos con concentraciones elevadas de ambos compuestos, el porcentaje de materia seca total se redujo,

lo que sugiere un posible efecto inhibitorio del exceso de Si sobre el desarrollo vegetal (Figura 2B).

En cuanto a los tratamientos con HxA y H_3PO_3, no se observó una promoción significativa del crecimiento de los explantes a las concentraciones de 1 y 2 mmol·L^{-1}, respectivamente, ya que las plántulas presentaron un tamaño similar al del grupo control y estimuló de manera limitada la formación de brotes, así como el desarrollo de nudos y raíces. Este comportamiento se reflejó también en el porcentaje de materia seca, donde no se detectaron diferencias apreciables entre estos tratamientos y el control, lo que indica una menor acumulación de biomasa (Figura 2).

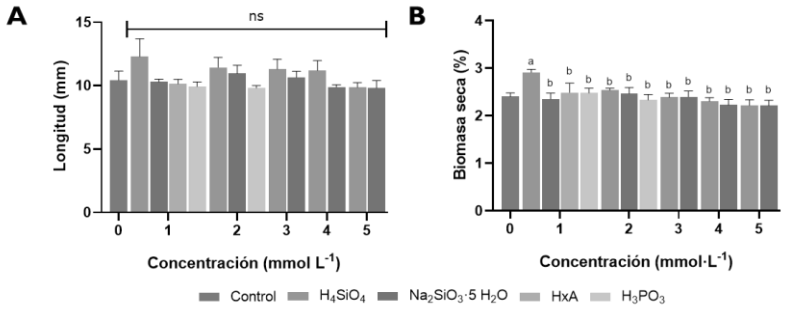


Figura 2. Efecto de diferentes bioestimulantes químicos y concentraciones sobre la longitud (A) y la biomasa seca (B) de plántulas de *V. planifolia* cultivadas *in vitro*. Los valores representan la media ± error estándar (EE). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). ns = no significativo; * = significativo ($p \leq 0.05$).

Pigmentos fotosintéticos

El contenido de pigmentos fotosintéticos estuvo influenciado por el tipo y concentración de los compuestos evaluados. Aunque no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de compuestos a base de Si, ambos compuestos mostraron una tendencia a incrementar el contenido de clorofila a, clorofila b y clorofila total respecto al control. El mayor efecto se observó con H_4SiO_4 a 1 mmol·L^{-1}, tratamiento en el que se registraron los valores más altos de clorofila total, sugiriendo una posible estimulación de la actividad fotosintética. No obstante, el incremento en la concentración de Si ocasionó una disminución progresiva en el contenido de estos pigmentos. El contenido de carotenoides permaneció estable, sin diferencias relevantes entre estos compuestos. En cambio, los tratamientos con HxA y H_3PO_3 no favorecieron la acumulación de pigmentos fotosintéticos ni de carotenoides, presentando valores similares a los observados en el grupo control (Figura 3).

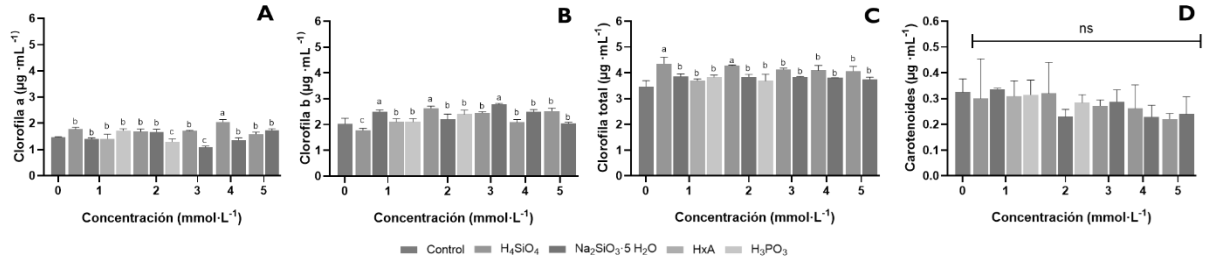


Figura 3. Contenido de pigmentos fotosintéticos en plántulas de *V. planifolia* cultivadas *in vitro*; (A) clorofila a, (B) clorofila b, (C) clorofila total y (D) carotenoides. Los valores representan la media ± desviación estándar (DS). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). ns = no significativo; * = significativo ($p \leq 0.05$).

La incorporación de bioestimulantes al medio de cultivo puede mejorar el desarrollo de plantas cultivadas *in vitro*. En este estudio, los compuestos a base de Si mostraron un efecto positivo sobre el crecimiento y desempeño fisiológico de *Vanilla planifolia*, mientras que HxA y H_3PO_3 no promovieron respuestas favorables, provocando la muerte del tejido. Los resultados demostraron, por primera vez, que esta especie es capaz de absorber Si a partir de H_4SiO_4 y $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ en condiciones *in vitro*.

El H_4SiO_4 fue la fuente más eficiente, especialmente a 1 mmol·L^{-1}, donde se observaron mayores valores de crecimiento, biomasa y contenido de pigmentos fotosintéticos. Esta respuesta podría atribuirse a su mayor biodisponibilidad y a que no altera significativamente el equilibrio iónico del medio. En cambio, concentraciones elevadas de H_4SiO_4 y $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ redujeron progresivamente el crecimiento y la supervivencia de las plántulas, posiblemente debido a procesos de polimerización y efectos tóxicos asociados al exceso de Si.

Los resultados coinciden con estudios realizados en otras orquídeas como *Phalaenopsis* (Zhuo, 1995), *Brassavola perrinii* Lindl. e híbridos complejos (Soares *et al*., 2012), *Cattleya loddigesii* Lindl. (Soares *et al*., 2013), *Cymbidium atropurpureo* Lindl. y *Dendrobium secundum* (Blume) Lindl. ex-Wall. (Mantovani *et al*., 2020) donde bajas concentraciones de Si favorecen el crecimiento, mientras que dosis altas generan efectos inhibitorios. Asimismo, el incremento moderado de clorofilas y carotenoides observado con las fuentes de Si sugiere una mejora en la actividad fotosintética y el vigor fisiológico de las plántulas. En conjunto, los hallazgos indican que la respuesta de *V. planifolia* al Si depende de la fuente química y

de la concentración utilizada, destacando al H_4SiO_4 a 1 mmol·L^{-1} como la alternativa más adecuada para optimizar el cultivo *in vitro* de esta especie.

Conclusiones

La respuesta morfológica y fisiológica de *V. planifolia* cultivada *in vitro* estuvo determinada tanto con la naturaleza química como por la concentración del bioestimulante incorporado al medio de cultivo. Los tratamientos con HxA y H_3PO_3 no favorecieron el desarrollo de los explantes y, en concentraciones superiores a 2 mmol·L^{-1}, provocaron necrosis progresiva y muerte del tejido. En cambio, entre los compuestos a base del Si evaluados, el H_4SiO_4 mostró mayor eficacia al promover el crecimiento y desarrollo de las plántulas. Particularmente, la concentración de 1 mmol·L^{-1} estimuló significativamente diversos parámetros de crecimiento, mostrándose un efecto hormético, evidenciando su posible potencial como una alternativa eficiente para optimizar el desarrollo *in vitro* de plántulas de vainilla.

Literatura citada

Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15.

Arya, S. S., Rookes, J. E., Cahill, D. M., & Lenka, S. K. (2021). Vanillin: A review on the therapeutic prospects of a popular flavouring molecule. *Advances in Traditional Medicine*, 21, 1–17. https://doi.org/10.1007/s13596-020-00531-w

Arya, S. S., Rookes, J. E., Cahill, D. M., & Lenka, S. K. (2021). Vanillin: A review on the therapeutic prospects of a popular flavouring molecule. *Advances in Traditional Medicine*, 21, 1–17. https://doi.org/10.1007/s13596-020-00531-w

Cázarez-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. D. J., Zazueta-Torres, N. D., *et al*. (2024). Response of two varieties of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to silicon and chlorine applied in shade houses. *Terra Latinoamericana*, 42, 1–9. https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1620

Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Erawati, D. N., Wardati, I., Humaida, S., & Fisdiana, U. (2020). Micropropagation of vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews) with modification of cytokinins. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 411(1), 012009. https://doi.org/10.1088/1755-1315/411/1/012009

Herrera-Cabrera, B. E., Salgado-Garciglia, R., Higuera-Ojeda, O., Barrales-Cureño, H. J., Delgado-Alvarado, A., & Reyes, C. (2022). Production and characterization of vanilla (*Vanilla planifolia*) as a function of vanillin concentration. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 9, 46–62.

Mantovani, C., Pivetta, K. F. L., Prado, R. M., Souza Júnior, J. P., *et al*. (2020). Silicon toxicity induced by different concentrations and sources added to *in vitro* culture of epiphytic orchids. *Scientia Horticulturae*, 265, 109272. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109272

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473–497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

Soares, J. D. R., Pasqual, M., Araujo, A. G., Castro, E. M., Pereira, F. J., & Braga, F. T. (2012). Leaf anatomy of orchids micropropagated with different silicon concentrations. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 34(4), 413–421. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v34i4.15093

Soares, J. D. R., Villa, F., Rodrigues, F. A., & Pasqual, M. (2013). Silicon concentrations and gibberellic acid (GA_3) on *in vitro* propagation of *Cattleya loddigesii* orchid under natural light conditions. *Scientia Agraria Paranaensis*, 12(4), 286–292. https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v12n4p286-292

Zhou, T. S. (1995). The detection of the accumulation of silicon in *Phalaenopsis* (Orchidaceae). *Annals of Botany*, 75(6), 605–607. https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1065

Efecto de bioestimulantes en el crecimiento de plántulas de chile serrano (*Capsicum annuum* L.) cultivadas bajo condiciones semi-controladas

Lucía Araceli, Manzanarez-Jiménez[31]; Cipriano, García-Gutiérrez[32]; Gustavo Hernández-Carmona[33]

Resumen

Los bioestimulantes biológicos son una alternativa sostenible para incrementar el vigor y la calidad de las plántulas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de *Trichoderma harzianum*, extracto acuoso de *Macrocystis pyrifera* y lixiviado de lombricomposta sobre el crecimiento de plántulas de chile serrano cultivadas en macetas bajo condiciones ambientales semi-controladas. Se utilizó un diseño completamente al azar con ocho tratamientos, tres repeticiones y 20 plántulas por tratamiento: (T1) *T. harzianum* (1×10^9 esporas mL^{-1}), (T2) extracto de *M. pyrifera* al 10 %, (T3) lixiviado de lombricomposta al 10 %, (T4) *T. harzianum* + *M. pyrifera*, (T5) *T. harzianum* + lixiviado, (T6) *M. pyrifera* + lixiviado, (T7) combinación de los tres bioestimulantes y (T8) testigo. El extracto de *M. pyrifera* promovió la mayor altura de plántula (36.63 cm) y peso fresco (8.22 g), seguido por las combinaciones alga + lixiviado, hongo + alga + lixiviado y hongo + alga, las cuales superaron a los tratamientos con *T. harzianum* y lixiviado aplicados individualmente o en combinación, así como al testigo. Los resultados evidencian que el extracto de *M. pyrifera* posee el mayor potencial bioestimulante para optimizar la producción de plántulas de chile serrano. Se recomienda validar su desempeño en condiciones de invernadero y campo para determinar su efecto sobre el establecimiento del cultivo, el rendimiento y la productividad de los sistemas hortícolas del estado de Sinaloa.

Palabras clave: desarrollo vegetal, absorción de nutrientes, producción sostenible.

Abstract

[31] Laboratorio de Bioinsecticidas, Departamento de Biotecnología Agrícola, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Instituto Politécnico Nacional. Bulevar Juan de Dios Bátiz Paredes #250, Col. San Joachin, en Guasave, Sinaloa, México. lmanzanarezj1800@alumno.ipn.mx
[32] Laboratorio de Bioinsecticidas, Departamento de Biotecnología Agrícola, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Instituto Politécnico Nacional. Bulevar Juan de Dios Bátiz Paredes #250, Col. San Joachin, en Guasave, Sinaloa, México. garciacg@ipn.mx
[33] Laboratorio de Química de Algas, Departamento de Ecología y Química de Algas, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional. Av. Instituto Politécnico Nacional s/n Col. Playa Palo de Santa Rita, Código Postal 23096 La Paz, B.C.S. México. gcarmona2007@gmail.com

Biological biostimulants are a sustainable alternative for increasing seedling vigor and quality. The objective of this study was to evaluate the effect of *Trichoderma harzianum*, aqueous extract of *Macrocystis pyrifera*, and vermicompost leachate on the growth of serrano chili seedlings grown in pots under semi-controlled environmental conditions. A completely randomized design was used with eight treatments, three replicates and 20 seedlings per treatment: (T1) *T. harzianum* (1×10^9 spores mL^{-1}), (T2) 10% *M. pyrifera* extract, (T3) 10% vermicompost leachate, (T4) *T. harzianum* + *M. pyrifera*, (T5) *T. harzianum* + leachate, (T6) *M. pyrifera* + leachate, (T7) combination of the three biostimulants and (T8) control. The M. pyrifera extract promoted the greatest seedling height (36.63 cm) and fresh weight (8.22 g), followed by the combinations of algae + leachate, fungus + algae + leachate, and fungus + algae. These combinations outperformed the treatments with *T. harzianum*, and leachate applied individually or in combination, as well as the control. The results demonstrate that the *M. pyrifera* extract has the greatest biostimulant potential for optimizing serrano pepper seedling production. It is recommended to validate its performance under greenhouse and field conditions to determine its effect on crop establishment, yield, and productivity in horticultural systems in the state of Sinaloa.

Key words: plant development, nutrient absorption, sustainable production**.**

Introducción

El chile (*Capsicum annuum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica para el Estado de Sinaloa, debido a su amplia demanda en los mercados internacionales de Nogales Arizona, Mesa de Otay, Chaparral y San Isidro Tijuana. En el año de 2024, el volumen de producción alcanzó 753,783 ton con un valor de $8,381,000.00, con Escuinapa (30.5%), Elota (13.8%) y Culiacán (12.4%), como los municipios con mayor producción (SIAP, 2025). Sin embargo, la rentabilidad de este cultivo depende, del establecimiento exitoso de las plántulas, ya que un crecimiento vigoroso durante las primeras etapas fenológicas favorece el desarrollo del sistema radical, para una mejor absorción de agua y nutrimentos, así como mayor capacidad de las plantas para tolerar condiciones ambientales adversas durante el cultivo. En contraste, plántulas de baja tolerancia a factores adversos presentan un desarrollo lento, mayor susceptibilidad al estrés y menores posibilidades de expresar su potencial productivo, afectando el rendimiento y la rentabilidad del cultivo (Rouphael & Colla, 2020; Ali et al., 2021).

En los últimos años, el sector agrícola ha dirigido sus esfuerzos hacia el desarrollo de tecnologías que permitan incrementar la productividad con un menor impacto ambiental. En este contexto, los bioestimulantes representan una alternativa sostenible, ya que esta

elaborados a base de microorganismos benéficos o compuestos bioactivos, con capacidad para estimular procesos fisiológicos relacionados con la división celular, la fotosíntesis, la absorción de nutrimentos y el desarrollo radical. Su empleo durante la producción de plántulas permite obtener material vegetal de mayor calidad, favoreciendo un establecimiento más rápido y uniforme del cultivo (du Jardin, 2015; Bulgari et al., 2019; Rouphael & Colla, 2020).

Los hongos del género *Trichoderma*, (Ascomicetes: Hypocreales) son reconocidos por su capacidad para colonizar la rizosfera y establecer una interacción benéfica con las raíces de las plantas. Diversas especies de este hongo producen fitohormonas, enzimas y metabolitos secundarios que estimulan la elongación celular, la formación de raíces laterales y pelos absorbentes, además de incrementar la disponibilidad de nutrientes mediante procesos de solubilización y mineralización (Cai et al., 2022). Asimismo, la colonización de las raíces por *Trichoderma* spp. induce cambios fisiológicos que favorecen el crecimiento del follaje, incrementan la actividad fotosintética y fortalecen los mecanismos naturales de defensa de la planta frente a condiciones de estrés biótico y abiótico (Cortez-Lázaro et al., 2025). Estas características han convertido a este microorganismo en uno de los bioestimulantes más utilizados dentro de programas de agricultura sostenible (Chen et al., 2025; Guzmán-Guzmán et al., 2025; López-Bucio et al., 2015).

Macrocystis pyrifera L. C. Agardh, 1820 (Phaeophyceae: Laminariales), es una macroalga que crece en las costas del océano Pacífico; utilizada como fuente de compuestos bioactivos para la agricultura (Hernández-Carmona et al., 1996). Los extractos alcalinos de esta alga contienen alginatos, polisacáridos sulfatados, manitol, aminoácidos, vitaminas, compuestos fenólicos y reguladores naturales del crecimiento, los cuales participan en la activación de procesos metabólicos asociados con la división celular, el crecimiento radicular y el desarrollo del área foliar (Makhubalo et al., 2024). Además, estos metabolitos mejoran la eficiencia fotosintética, promueven la absorción de nutrientes y aumentan la tolerancia de las plantas frente a diferentes tipos de estrés ambiental, contribuyendo a un desarrollo vegetal más uniforme y vigoroso (Rabhi et al., 2025; Ali et al., 2021; Rouphael & Colla, 2020). Debido a estas propiedades, los extractos de *M. pyrifera* se consideran una herramienta promisoria para incrementar la calidad de las plántulas en sistemas hortícolas con un enfoque de producción sostenible.

El lixiviado de lombricomposta obtenido mediante el procesamiento de residuos orgánicos por la lombriz roja californiana *Eisenia fetida*, Savigny, 1826 (Oligochaeta: Lumbricidae) = *Eisenia foetida,* es un bioestimulante líquido compuesto por sustancias húmicas, ácidos fúlvicos, aminoácidos, microorganismos benéficos y nutrientes (Edwards et al., 2021). Sus componentes favorecen la actividad microbiana del sustrato, estimulan el crecimiento de las

raíces y mejoran la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales para la planta (Atiyeh et al., 2002). Asimismo, diversos estudios han demostrado que la aplicación de lixiviados de lombricomposta incrementa el vigor vegetal, la producción de biomasa y la capacidad de respuesta frente al estrés ambiental, representando una alternativa ecológica para disminuir el uso de fertilizantes sintéticos y promover sistemas agrícolas más resilientes (Lim et al., 2016; Atiyeh et al., 2002). En la producción de plántulas hortícolas, su uso ha mostrado efectos positivos sobre la calidad fisiológica del material vegetal, favoreciendo un mejor establecimiento después del trasplante.

No obstante que existen numerosos estudios sobre el efecto individual de bioestimulantes de origen microbiano, marino y orgánico, aún es limitada la información acerca de su respuesta comparativa y de las posibles interacciones entre estos productos durante la etapa de producción de plántulas de chile serrano. Generar este conocimiento permitirá identificar alternativas biológicas que favorezcan el desarrollo inicial del cultivo y contribuyan a reducir la dependencia de insumos convencionales, fortaleciendo la sostenibilidad de los sistemas de producción hortícola. Objetivo. Evaluar el efecto de bioestimulantes a base de *T. harzianum,* extracto de *M. pyrifera* y lixiviado de lombricomposta de *E. fetida*, aplicados de forma individual y combinada, sobre el crecimiento de plántulas de chile serrano cultivadas en macetas bajo condiciones ambientales semi-controladas.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se desarrolló de octubre de 2024 a marzo de 2025 en el Laboratorio de Bioinsecticidas del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Sinaloa, del Instituto Politécnico Nacional, ubicado en Guasave, Sinaloa, México. El experimento se estableció en un área de crecimiento vegetal, con exposición a luz solar natural y condiciones ambientales semi-controladas, donde las plántulas permanecieron protegidas de precipitaciones y factores ambientales extremos durante todo el periodo experimental.

Material vegetal

Se utilizó semilla de chile serrano comercial, las cuales fueron sembradas individualmente en macetas de unicel con capacidad aproximada de 1000 mL. Como sustrato se empleó una mezcla homogénea de suelo agrícola, perlita y turba negra, en proporciones 5:4:1, seleccionada por sus propiedades físicas de aireación, retención de humedad y adecuada disponibilidad de oxígeno para el desarrollo radical de las plántulas. Las condiciones ambientales fueron monitoreadas con un Termómetro digital para interior/exterior con sensor de humedad (Taylor®, 48TA36).

Obtención del inóculo de *Trichoderma harzianum*

El aislamiento de *T. harzianum* se obtuvo a partir de muestras de suelo agrícola colectadas en la zona norte del estado de Sinaloa. El aislamiento, purificación y conservación del hongo se realizaron en el Laboratorio de Bioinsecticidas del CIIDIR Unidad Sinaloa mediante técnicas convencionales de microbiología. La identificación del hongo se hizo mediante las claves taxonómicas de Barnett & Hunter, (1972). El hongo se propagó en medio Papa Dextrosa Agar (PDA) e incubó a 25 ± 2 °C hasta obtener abundante esporulación. Las conidias fueron recuperadas mediante lavado superficial con agua destilada estéril conteniendo un agente dispersante, cuantificadas con cámara de Neubauer y ajustadas a una concentración final de 1×10^9 conidias mL^{-1}, empleada en las aplicaciones experimentales.

Obtención del extracto alcalino de *Macrocystis pyrifera*

El extracto de *M. pyrifera* fue proporcionado por el Laboratorio de Química de Algas del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN), La Paz, Baja California Sur, México. El extracto fue obtenido mediante extracción alcalina, proceso que consistió en la trituración del tejido algal previamente lavado y deshidratado, seguido de su tratamiento con una solución alcalina bajo condiciones controladas de temperatura y agitación para favorecer la liberación de polisacáridos, alginatos y otros compuestos bioactivos. Posteriormente, el extracto fue filtrado, neutralizado y almacenado en refrigeración hasta su utilización en el experimento (Hernández-Alarcón, 2012). Para las aplicaciones se preparó una solución al 10 % (v/v). El pH del extracto se ajustó a 5.0 con ácido acético ($C_2H_4O_2$), antes de mezclarla con los otros bioestimulantes o aplicarla solo.

Obtención del lixiviado de lombricomposta

El lixiviado de lombricomposta se obtuvo de manera artesanal en la comunidad de El Tecomate, municipio de Guasave, Sinaloa, México. La lombricomposta fue producida mediante la degradación de residuos orgánicos constituidos principalmente por huesos y subproductos de pescado, transformados biológicamente por la actividad digestiva de la lombriz roja californiana *E. fetida*. El lixiviado generado durante el proceso de vermicompostaje fue recolectado, filtrado para eliminar partículas suspendidas y almacenado a 4 °C hasta su utilización. Antes de su aplicación se preparó una dilución al 10 % (v/v).

Formulación de los tratamientos

La formulación de los tratamientos fue preparada en el Laboratorio de Bioinsecticidas siguiendo las metodologías descritas por Manzanarez-Jiménez, y otros, (2024), realizando las mezclas inmediatamente antes de cada aplicación para garantizar la estabilidad biológica de los bioestimulantes. Los tratamientos evaluados se presentan en el (Cuadro 1)

Cuadro 1. Tratamientos evaluados en plántulas de chile serrano cultivadas en macetas bajo condiciones semi-controladas

Tratamiento; Ingrediente Activo	Dosis
[T1] *Esporas de T. harzianum*	1×10^9 conidias mL^{-1}
[T2] Extracto de *M. pyrifera*	10 % (v/v)
[T3] Lixiviado de lombricomposta	10 %(v/v)
[T4] *T. harzianum* + *M. pyrifera*	1×10^9 conidias mL^{-1} + 10% (v/v)
[T5] *T. harzianum* + lombricomposta.	1×10^9 conidias mL^{-1} + 10% (v/v)
[T6] *M. pyrifera* + lombricomposta	10 % (v/v) + 10 % (v/v)
[T7] T. *harzianum* + *M. pyrifera* + lombricomposta.	1×10^9 conidias mL^{-1} + 10% (v/v) + 10% (v/v)
[T8] Testigo sin aplicación de bioestimulantes	Agua potable c.b.p*

c.b.p*: cuando baste para. Cada tratamiento se aplicó en una unidad experimental compuesta por 20 macetas y tres replicas.

Manejo experimental

Las semillas fueron sembradas directamente en las macetas. El primer riego con los tratamientos se realizó siete días después de la germinación y posteriormente las aplicaciones se efectuaron cada siete días hasta concluir el experimento. Durante todo el periodo de evaluación se realizaron riegos complementarios para mantener la humedad del sustrato cercana a la capacidad de campo. A los 32 días después de la germinación se evaluó el crecimiento de las plántulas mediante las siguientes variables: altura de plántula (cm), determinada con una regla graduada desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento y peso fresco de plántula (g), determinado mediante una balanza analítica (inmediatamente después de la cosecha.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con ocho tratamientos, tres repeticiones por tratamiento y veinte plántulas como unidad experimental. Previamente al análisis de varianza, se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Posteriormente, los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables de crecimiento evaluadas. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey (HSD) al 95 % de confianza. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Minitab® 18.

Resultados y discusión

Altura de plántula

La aplicación de bioestimulantes ejerció un efecto altamente significativo sobre la altura de las plántulas de chile serrano cultivadas bajo condiciones ambientales semi-controladas. El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (gl = 7,16; F = 777.13762; $p < 0.0001$; F_{crit} = 2.15), indicando que los bioestimulantes evaluados modificaron de manera importante el crecimiento vegetativo de las plántulas (Cuadro 2. Figura 1.).

Cuadro 2. Efecto en la altura de los tratamientos evaluados en plántulas de chile serrano de 32 días de crecimiento bajo condiciones semi-controladas

Tratamiento	Altura de plántula (cm)
[T1] *T. harzianum*	26.40 ± 0.23 e
[T2] *M. pyrifera*	36.63 ± 0.38 a
[T3] Lombricomposta	31.68 ± 0.25 d
[T4] *T. harzianum* + *M. pyrifera*	34.47 ± 0.33 c
[T5] *T. harzianum* + Lombricomposta	31.35 ± 0.30 d
[T6] *M. pyrifera* + Lombricomposta	35.60 ± 0.38 b
[T7] T. *harzianum* + *M. pyrifera* + Lombricomposta	34.88 ± 0.13 c
[T8] Testigo	22.50 ± 0.36 f

Las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes. Prueba de Tukey HSD (α = 0.05). Los resultados son medias ± la desviación estándar, obtenidos de datos de los experimentos realizados por triplicado.

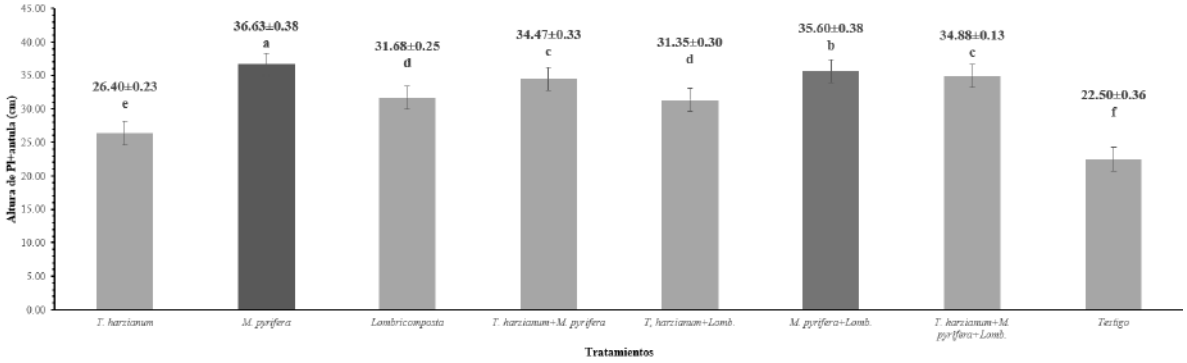


Figura 1. Gráfico de resultados del efecto en altura de planta de los tratamientos evaluados en plántulas de chile serrano de 32 días de crecimiento bajo condiciones semi-controladas. Las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes. Prueba de Tukey

HSD (α = 0.05). Los resultados son promedios ± la desviación estándar, obtenidos de datos de los experimentos realizados por triplicado.

Las mayores alturas promedio se registraron con la aplicación individual del extracto de *M. pyrifera* con 36.63 cm, seguido por la combinación *M. pyrifera* + lixiviado de lombricomposta con 35.60 cm, la combinación de los tres bioestimulantes (*T. harzianum* + *M. pyrifera* + lixiviado de lombricomposta) con 34.88 cm y la combinación *T. harzianum* + *M. pyrifera* con 34.47 cm. Por otra parte, el tratamiento con lixiviado de lombricomposta presentó una altura promedio de 31.68 cm, mientras que la combinación *T. harzianum* + lixiviado registró 31.35 cm. El tratamiento con *T. harzianum*. aplicado individualmente alcanzó una altura promedio de 26.40 cm, superior al testigo, el cual presentó el menor crecimiento con únicamente 22.50 cm.

Los resultados obtenidos muestran una clara tendencia hacia un mayor crecimiento con el extracto de *M. pyrifera*, ya fuera aplicado individualmente o en combinación con otros bioestimulantes. Este comportamiento sugiere que los metabolitos presentes en la macroalga ejercieron una influencia positiva sobre los procesos fisiológicos responsables de la elongación celular y el desarrollo vegetativo de las plántulas.

El efecto observado con *M. pyrifera* coincide con lo reportado por Makhubalo et al., (2024), quienes indican que los extractos de macroalgas contienen alginatos, manitol, polisacáridos sulfatados, aminoácidos y compuestos con actividad similar a fitohormonas que estimulan la división y elongación celular, favoreciendo el crecimiento vegetal. De manera similar, Ali et al., (2021) señalaron que la aplicación de extractos de algas incrementa la eficiencia fotosintética, la absorción de nutrimentos y la producción de biomasa, especialmente durante las primeras etapas de desarrollo de cultivos hortícolas.

Aunque *T. harzianum*. aplicado individualmente promovió un incremento en la altura respecto al testigo, su respuesta fue inferior a la obtenida con el extracto de *M. pyrifera*. Este comportamiento puede atribuirse a que el principal mecanismo de acción de *Trichoderma* ocurre inicialmente en la rizosfera mediante la colonización del sistema radical, favoreciendo la producción de auxinas, giberelinas y otros metabolitos que estimulan el crecimiento de las raíces antes de reflejarse plenamente en el desarrollo de la parte aérea (Rabhi et al., 2025). En consecuencia, durante la etapa temprana de crecimiento evaluada en este estudio (32 días después de la germinación), el efecto del hongo pudo concentrarse principalmente en el desarrollo radical.

La respuesta obtenida con el lixiviado de lombricomposta también fue superior al tratamiento testigo, confirmando que este bioestimulante constituye una fuente importante de sustancias húmicas, ácidos fúlvicos, aminoácidos y microorganismos benéficos capaces de mejorar la disponibilidad de nutrientes y estimular el crecimiento vegetal (Edwards et al., 2021). No

obstante, su efecto individual fue menor que el registrado con el extracto de *M. pyrifera*, lo que podría indicar que la concentración de metabolitos bioactivos presentes en el extracto de alga produjo una respuesta fisiológica más rápida durante el periodo experimental.

Las combinaciones de bioestimulantes mostraron una tendencia favorable respecto a las aplicaciones individuales, particularmente cuando incluyeron el extracto de *M. pyrifera*. Este comportamiento sugiere una posible interacción positiva entre los metabolitos del extracto de alga y *T. harzianum* o en el lixiviado de lombricomposta, favoreciendo procesos relacionados con la absorción de nutrientes, la actividad fotosintética y el desarrollo de biomasa vegetal. Rouphael & Colla (2020) mencionan que la combinación de diferentes bioestimulantes puede producir efectos complementarios sobre múltiples rutas metabólicas de la planta, generando respuestas superiores a las obtenidas mediante aplicaciones individuales.

Finalmente, el bajo crecimiento registrado en el tratamiento testigo confirma que la ausencia de bioestimulantes limita el desarrollo inicial de las plántulas bajo las condiciones evaluadas. En conjunto, los resultados demuestran que la aplicación de bioestimulantes, especialmente aquellos que incluyen extracto de algas representa una alternativa prometedora para incrementar el vigor de las plántulas de chile serrano y mejorar su calidad durante el desarrollo temprano, contribuyendo potencialmente al establecimiento exitoso del cultivo y al incremento de su productividad.

Peso de plántula

El peso fresco de las plántulas de chile serrano fue significativamente influenciado por la aplicación de los bioestimulantes evaluados. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (gl = 7,16; F = 578 931.28; $p < 0.0001$: $F_{crit.}$ = 2.65), indicando que los bioestimulantes modificaron de manera importante la acumulación de biomasa durante la etapa inicial de desarrollo (Cuadro 3. Figura 2.).

Cuadro 3. Efecto en el peso fresco de los tratamientos evaluados en plántulas de chile serrano de 32 días de crecimiento bajo condiciones semi-controladas

Tratamiento	Peso de plántula (g)
[T1] *T. harzianum*	4.83 ± 0.0072 c
[T2] *M. pyrifera*	8.22 ± 0.0084 a
[T3] Lombricomposta	4.82 ± 0.0062 d
[T4] *T. harzianum* + *M. pyrifera*	8.18 ± 0.0028 b
[T5] *T. harzianum* + lombricomposta	4.81 ± 0.0026 e
[T6] *M. pyrifera* + lombricomposta	8.17 ± 0.0023 b
[T7] T. *harzianum* + *M. pyrifera* + lombricomposta	8.21 ± 0.0026 a

[T8] Testigo	2.82 ± 0.0029 f

Las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes. Prueba de Tukey HSD (α = 0.05). Los resultados son medias ± la desviación estándar, obtenidos de datos de los experimentos realizados por triplicado.

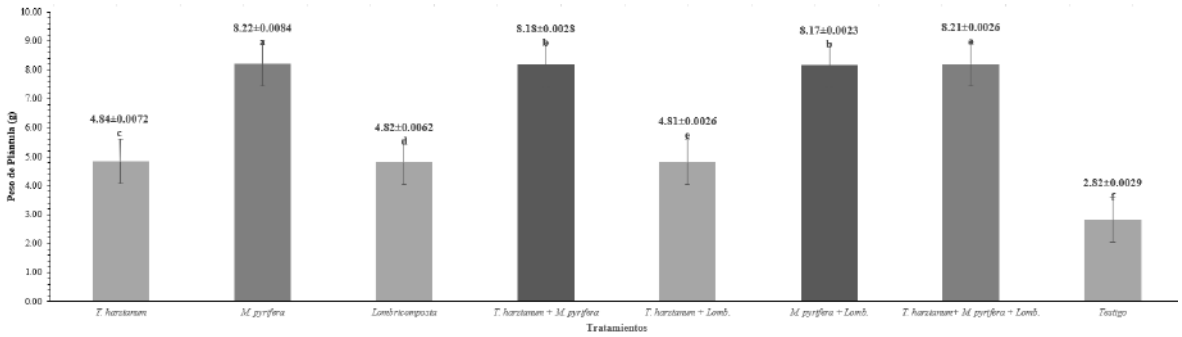


Figura 2. Gráfico de resultados del efecto en el peso fresco de los tratamientos evaluados en plántulas de chile serrano de 32 días de crecimiento bajo condiciones semi-controladas. Las medias que no compartan una letra son significativamente diferentes. Prueba de Tukey HSD (α = 0.05). Los resultados son promedios ± la desviación estándar, obtenidos de datos de los experimentos realizados por triplicado.

Las mayores medias de peso fresco correspondieron al tratamiento con extracto de *M. pyrifera* (8.22 g), seguido por la combinación *T. harzianum* + *M. pyrifera* + lixiviado de lombricomposta (8.21 g), *T. harzianum* + *M. pyrifera* (8.18 g) y *M. pyrifera* + lixiviado de lombricomposta (8.17 g). En contraste, los tratamientos con *T. harzianum* (4.83 g), lixiviado de lombricomposta (4.82 g) y *T. harzianum* + lixiviado de lombricomposta (4.81 g) presentaron valores intermedios de biomasa, mientras que el tratamiento testigo registró el menor peso fresco (2.82 g).

En términos relativos, la aplicación individual del extracto de alga incrementó aproximadamente 192 % el peso fresco de las plántulas respecto al tratamiento testigo. De manera similar, las combinaciones que incluyeron este bioestimulante aumentaron la biomasa entre 190.5 ± 0.5 %, evidenciando que la presencia del extracto de alga fue el principal factor asociado con la acumulación de materia vegetal durante la etapa de plántula.

La elevada respuesta obtenida con *M. pyrifera* puede atribuirse a la presencia de compuestos bioactivos como alginatos, manitol, aminoácidos, vitaminas y sustancias con actividad

reguladora del crecimiento vegetal. Estos metabolitos estimulan la división y elongación celular, incrementan la actividad fotosintética y favorecen una mayor eficiencia en la absorción y utilización de nutrimentos, lo que finalmente se traduce en una mayor acumulación de biomasa (Ali et al., 2021). Diversos estudios han demostrado que los extractos de macroalgas mejoran la actividad fisiológica de las plantas mediante la regulación de genes relacionados con el crecimiento y el metabolismo primario, promoviendo un desarrollo vegetativo más vigoroso durante las primeras etapas del cultivo (Rouphael & Colla, 2020).

Desde el punto de vista agronómico, el incremento en el peso fresco representa un indicador directo del vigor de las plántulas y de su capacidad para establecerse exitosamente después del trasplante. Plántulas con mayor biomasa presentan un sistema fotosintético más desarrollado, mayor capacidad de absorción de agua y nutrimentos y una mejor tolerancia al estrés derivado del establecimiento en campo, factores que repercuten favorablemente sobre el rendimiento potencial del cultivo.

En conjunto, los resultados demuestran que el empleo de bioestimulantes naturales favorece significativamente la acumulación de biomasa en plántulas de chile serrano. Particularmente, el extracto de *M. pyrifera*, aplicado individualmente o en combinación con *T. harzianum* y lixiviado de lombricomposta, mostró el mayor potencial para incrementar el peso fresco de las plántulas, constituyéndose como una alternativa tecnológica de interés para fortalecer la producción de plantas de alta calidad bajo esquemas de agricultura sostenible.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de bioestimulantes de origen natural son una estrategia eficaz para favorecer el crecimiento inicial de plántulas de chile serrano bajo condiciones semi-controladas. Tanto la altura como el peso fresco de las plántulas fueron significativamente superiores en los tratamientos que recibieron bioestimulantes respecto al testigo, evidenciando su capacidad para estimular procesos fisiológicos relacionados con el desarrollo vegetal. Entre los productos evaluados, el extracto de la macroalga *M. pyrifera* mostró el mayor potencial bioestimulante, al promover el mayor incremento en la acumulación de biomasa y el crecimiento de las plántulas, seguido por el lixiviado de lombricomposta derivado de *E. fetida*, mientras que *T. harzianum* presentó una respuesta positiva, aunque de menor magnitud durante la etapa temprana de desarrollo.

Estos resultados sugieren que el empleo de bioestimulantes representa una alternativa tecnológica viable para fortalecer la producción de plántulas de alta calidad y reducir la dependencia de insumos sintéticos en los sistemas hortícolas del estado de Sinaloa. Su incorporación en programas de producción de cultivos como chile, tomate, cebolla y otras

hortalizas podría mejorar el establecimiento en campo, incrementar el vigor inicial de las plantas y contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles, rentables y resilientes frente a las condiciones ambientales y productivas de la región.

Se recomienda ampliar esta investigación mediante ensayos de campo que permitan evaluar el efecto de estos bioestimulantes sobre el establecimiento del cultivo, el desarrollo radicular, el rendimiento, la calidad de los frutos y la rentabilidad económica. Asimismo, es conveniente estudiar diferentes dosis, frecuencias y métodos de aplicación, así como caracterizar los mecanismos fisiológicos, bioquímicos y microbiológicos responsables de la respuesta observada, con el propósito de generar recomendaciones técnicas que favorezcan su adopción por los productores hortícolas del noroeste de México.

Literatura citada

Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant Properties of Seaweed Extracts in Plants: Implications towards Sustainable Crop Production. *Plants, 10*(3), 531. doi: https://doi.org/10.3390/plants10030531

Atiyeh, R., Arancon, N., & Edwards, C. J. (2002). The influence of earthworm-processed pig manure on the growth and productivity of marigolds. *Bioresource Technology,, 81*(2), 103-108. doi:https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00122-5.

Barnett, H., & Hunter, B. (1972). *Illustrated Genera of Imperfect Fungi* (3ra ed.). University of Minnesota: Burgess Publishing Company.

Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy, 9*(6), 306. doi:https://doi.org/10.3390/agronomy9060306

Cai, F., Dou, K., Wang, P., Chenthamara, K., Chen, J., & Druzhinina, I. (2022). The Current State of *Trichoderma* Taxonomy and Species Identification. En N. Amaresan, A. Sankaranarayanan, M. Dwivedi, & I. Druzhinina, *Advances in Trichoderma Biology for Agricultural Applications. Fungal Biology* (págs. 3-35). Springer, Cham. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-91650-3_1

Chen, X., Lu, Y., Liu, X., Gu, Y., & Li, F. (2025). *Trichoderma*: Dual Roles in Biocontrol and Plant Growth Promotion. *Microorganisms, 13*(8), 1840. doi:https://doi.org/10.3390/microorganisms13081840

Cortez-Lázaro, R., Rojas-Paz, J., Legua-Cardenas J.A, Fernández-Herrera F, Pesantes-Rojas C.R, Ocrospoma-Dueñas R.W, Oliva-Cruz S.M, Manes-Cangana G.A, Romero Bozzetta J.L & S.T., Leiva Espinoza. (2025). Global trends in *Trichoderma* in secondary metabolites in

sustainable agricultural bioprotection. *Front. Microbiol, 16*, 1-18. doi:https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1595946

du, J. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae, 196*, 3-14. doi:https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (2021). *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* (1st ed ed.). Boca Raton: CRC Press. doi: https://doi.org/10.1201/b10453

Guzmán-Guzmán, P., Etesami, H., & Santoyo, G. (2025). *Trichoderma*: a multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. *BMC Microbiol , 25*(434), 1-17. doi:https://doi.org/10.1186/s12866-025-04158-2

Hernández-Alarcón, I. (2012). *Evaluación de un extracto alcalino del alga Macrocystis pyrifera, (L.) C. Agardh, sobre el crecimiento de vegetales terrestres. Tesis de maestría.* Baja California Sur: CICIMAR-IPN.

Hernández-Carmona, G., Arvizu-Higuera, D., & Rodríguez-Montesinos, Y. (1996). Efecto de la temperatura y tiempo de extracción en el proceso de obtención de alginato de sodio a partir de *Macrocystis pyrifera*. *Ciencias Marinas, 22*(4), 511-521. doi:DOI: 10.7773/cm.v22i4.867

Lim, S., Lee, L., & Wu, T. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production, 111, Part A*, 262-278. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083.

López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R., & A., H.-E. (2015). *Trichoderma* as biostimulant: exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia Horticulturae, 196*, 109-123. doi:https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.043

Makhubalo, N., Mashamaite, C., & Manyevere, A. (2024). Assessing the potential use of *Macrocystis pyrifera* extracts as a biostimulant—Areview. *South African Journal of Botany, 174*, 67-75. doi:https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.09.070

Manzanarez-Jiménez, L. A., García-Gutiérrez, C., Escobedo-Bonilla, C. M., Luna-González, A., Rosas-García, N., & M., Ortega-Aviles. (2024). Viabilidad de conidios de *Metarhizium anisopliae* Metschnikoff secados por aspersión como método de preservación. *Cienc. Agron. Apl. Biotecnol., 4*, 53-57. Recuperado el 21 de abril de 2026, de https://www.researchgate.net/publication/384054298_Viabilidad_de_conidios_de_Metarhiz

ium_anisopliae_Metschnikoff_secados_por_aspersion_como_metodo_de_preservacion#fullTextFileContent

Rabhi, M., Derbak, L., Bendif, H., Boufahja, F., Abu-Elsaoud, A., & Garzoli, S. (2025). Seaweed extract as a biostimulant: Sustainable agriculture applications and mechanisms. *Journal of Biotechnology, 408*, 201-216. doi:https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2025.09.013.

Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a Sustainable Agriculture Through Plant Biostimulants: From Experimental Data to Practical Applications. *Agronomy, 10*(10), 1461. doi: https://doi.org/10.3390/agronomy10101461

SIAP. (2025). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Recuperado el 22 de enero de 2025, de Anuario Estadístico de la Producción Agrícola, Año agrícola (OI+PV), maíz grano: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

Efecto de bioestimulantes sobre la brotación, crecimiento vegetativo y fructificación temprana de higo (*Ficus carica* L.) cv. Black Mission bajo condiciones de agricultura protegida

Yohandri Ruisanchez-Ortega[34], Fidel Núñez-Ramírez[35], Celia Selene Romeros-Félix[3], Jesús del Rosario Ruelas-Islas[36]

Resumen

El cultivo de higo (*Ficus carica* L.) ha incrementado su importancia en las regiones áridas y semiáridas del noroeste de México; sin embargo, existe limitada información sobre el uso de bioestimulantes para favorecer su crecimiento y productividad bajo condiciones de agricultura protegida. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de Hortamin® y Bioaluminium® sobre la brotación, crecimiento vegetativo y fructificación temprana de plantas de higo cv. Black Mission. El estudio se realizó en San Luis Río Colorado, Sonora, México, bajo condiciones de cultivo protegido. Se evaluaron dos tratamientos: aplicación combinada de Hortamin® + Bioaluminium® y un testigo sin aplicación. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones de 15 plantas cada una. Se determinaron el número de brotes por planta, longitud y diámetro del segundo brote basal, tasa de crecimiento diaria y número de frutos por brote. Los resultados mostraron que la aplicación de los bioestimulantes incrementó significativamente la longitud del brote y la tasa de crecimiento diaria respecto al testigo. Asimismo, se observó un aumento significativo en el número de frutos por brote. No se detectaron diferencias significativas en el número de brotes emitidos por planta ni en el diámetro de los brotes. Se concluye que la aplicación combinada de Hortamin® y Bioaluminium® favorece el crecimiento vegetativo y la fructificación temprana de plantas de higo cv. Black Mission, constituyendo una alternativa de manejo con potencial para mejorar el desempeño inicial del cultivo bajo condiciones de agricultura protegida en regiones áridas.

[34] Universidad Estatal de Sonora, unidad académica SLRC. Carretera San Luis Río Colorado-Sonoyta, Km. 6.5. Distrito Industrial. San Luis Río Colorado, Sonora, México. Código Postal 83455. Correo: yohandri.ruisanchez@ues.mx

[35] Instituto de Ciencias Agrícolas, Carretera Delta S/N, Nuevo León, Mexicali, Baja California, México. Código Postal 21705. Correo: fidel.nunez@uabc.edu.mx

[36] Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agricultura del Valle de Fuerte. Calle 16, esquina con Japaraqui, Juan José Ríos, Sinaloa, México, Código Postal 81110. Correos: celiaromero@uas.mx; chuyitaruelas@favf.mx

Palabras clave: Bioestimulantes, agricultura protegida, crecimiento vegetativo, fructificación temprana, Black Mission.

Abstract

Fig cultivation (Ficus carica L.) has increased in importance in the arid and semi-arid regions of northwestern Mexico; however, there is limited information on the use of biostimulants to promote its growth and productivity under protected cultivation conditions. The objective of this research was to evaluate the effect of foliar application of Hortamin® and Bioaluminium® on bud break, vegetative growth, and early fruiting of fig plants cv. Black Mission. The study was conducted in San Luis Río Colorado, Sonora, Mexico, under protected cultivation conditions. Two treatments were evaluated: a combined application of Hortamin® + Bioaluminium® and a control without application. The treatments were arranged in a randomized complete block design with three replicates of 15 plants each. The number of shoots per plant, length and diameter of the second basal shoot, daily growth rate, and number of fruits per shoot were determined. The results showed that the application of the biostimulants significantly increased shoot length and daily growth rate compared to the control. A significant increase in the number of fruits per shoot was also observed. No significant differences were detected in the number of shoots produced per plant or in shoot diameter. It is concluded that the combined application of Hortamin® and Bioaluminium® promotes vegetative growth and early fruiting of fig plants cv. Black Mission, constituting a management alternative with the potential to improve the initial performance of the crop under protected agriculture conditions in arid regions.

Key words: Biostimulants, protected agriculture, vegetative growth, early fruiting, Black Mission.

Introducción

El higo (*Ficus carica* L.) es una de las especies frutales más antiguas cultivadas por el ser humano y actualmente posee una creciente importancia económica debido a la demanda de frutos frescos y procesados en los mercados internacionales. Además de su valor comercial, los frutos de higo destacan por su contenido de fibra dietética, minerales esenciales y compuestos fenólicos con actividad antioxidante, atributos que han incrementado el interés de productores y consumidores durante los últimos años (Solomon et al., 2006; Wojdyło et al., 2016). A nivel mundial, la producción de higo supera 1.3 millones de toneladas anuales,

siendo Turquía, Egipto, Argelia y Argelia algunos de los principales países productores (FAOSTAT, 2025).

En México, la superficie destinada al cultivo de higo ha mostrado un crecimiento sostenido durante la última década, impulsado por la rentabilidad del cultivo y la creciente demanda del mercado nacional e internacional. Particularmente en las regiones áridas y semiáridas del noroeste del país, como los valles agrícolas de Mexicali, Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora, se ha incrementado el establecimiento de huertos comerciales de la variedad Black Mission bajo sistemas tecnificados de producción. Sin embargo, las condiciones climáticas de estas regiones, caracterizadas por altas temperaturas y baja humedad relativa, pueden limitar la brotación y el desarrollo vegetativo de las plantas, afectando el potencial productivo del cultivo (Melgarejo et al., 2010; Ferrara et al., 2021).

Los bioestimulantes agrícolas constituyen una alternativa para mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos mediante la estimulación de procesos fisiológicos relacionados con la absorción y utilización de nutrientes, la actividad metabólica y la tolerancia al estrés abiótico. Diversos estudios han demostrado que la aplicación de aminoácidos y micronutrientes puede favorecer el crecimiento vegetativo y reproductivo de especies frutales mediante la activación de mecanismos asociados a la división celular, síntesis de proteínas y actividad fotosintética (du Jardin, 2015; Rouphael & Colla, 2020). No obstante, la información científica sobre el uso de bioestimulantes para estimular la brotación del cultivo de higo bajo condiciones protegidas en las zonas áridas del noroeste de México continúa siendo limitada.

Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de los bioestimulantes Hortamin y Bioaluminium sobre la brotación y el crecimiento inicial de plantas de higo (*Ficus carica L.) variedad Black Mission cultivadas bajo condiciones de agricultura protegida.*

Materiales y métodos

La investigación se realizó durante 2025 en el ejido Moctezuma (32°24'21.6" N, 114°53'02.4" O), municipio de San Luis Río Colorado, Sonora, México. Se utilizaron plantas de higo (*Ficus carica* L.) variedad Black Mission establecidas bajo condiciones de agricultura protegida en un macrotúnel de 900 m² (9 × 100 m), cubierto con plástico blanco de 180 µm y 25 % de sombreo.

Las plantas fueron cultivadas en bolsas de 30 L utilizando como sustrato una mezcla de 70 % de turba de *Sphagnum*, 20 % de arena y 10 % de perlita. La nutrición se suministró mediante riego por goteo, aplicando por planta 0.400 kg de N, 0.250 kg de P, 0.350 kg de K, 0.250 kg de Ca y 0.125 kg de Mg durante el ciclo de evaluación.

Se evaluó el efecto de dos bioestimulantes comerciales: Hortamin®, formulado a base de aminoácidos libres de origen vegetal (16 %) y nitrógeno total (2.5 %), y Bioaluminium®, compuesto por óxido de cobre (2 %), carbonato de manganeso (1.7 %) y óxido de zinc (0.6 %). Los productos fueron aplicados de forma combinada vía foliar después del decapitado de las plantas, a una dosis de 0.300 L ha^{-1} en un volumen de aplicación de 200 L ha^{-1}. Se realizaron dos aplicaciones con un intervalo de 15 días entre ellas.

Se evaluaron dos tratamientos: T1, aplicación de Hortamin® + Bioaluminium®; y T2, testigo sin aplicación de bioestimulantes. Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada unidad experimental estuvo constituida por 15 plantas, para un total de 45 plantas por tratamiento.

Las variables evaluadas fueron: número de brotes por planta (u), longitud del brote (cm), diámetro del brote (cm), tasa de crecimiento diaria de la longitud (cm $día^{-1}$), tasa de crecimiento diaria del diámetro (cm $día^{-1}$) y número de frutos por brote (u). La variable número de brotes se determinó por planta, mientras que las variables longitud, diámetro, tasa de crecimiento y número de frutos se evaluaron en el segundo brote emitido desde la base del tallo principal. El número de brotes, la longitud y el diámetro del brote se registraron a los 15 y 30 días después de la primera aplicación (DPA). Las tasas de crecimiento se calcularon de acuerdo con la metodología propuesta por Villar et al. (2008), mientras que el número de frutos por brote se cuantificó a los 30 DPA.

Los datos obtenidos fueron sometidos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas. Posteriormente, las medias de los tratamientos se compararon mediante una prueba t de Student para muestras independientes ($P \leq 0.05$), utilizando el paquete estadístico Statgraphics Centurion XIX (Statgraphics Technologies Inc., Warrenton, Virginia, EE. UU.).

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos para el número de brotes por planta, longitud y diámetro del brote se presentan en el Cuadro 1. El número de brotes por planta no mostró diferencias significativas entre tratamientos a los 15 y 30 días después de la primera aplicación (DPA), lo que indica que la aplicación de Hortamin® + Bioaluminium® no influyó sobre la emisión de nuevos brotes durante el periodo de evaluación. Este comportamiento sugiere que la brotación estuvo determinada principalmente por el estado fisiológico de las plantas y las condiciones ambientales predominantes durante el estudio.

En contraste, la longitud de los brotes fue significativamente mayor en las plantas tratadas con Hortamin® + Bioaluminium® en ambos momentos de evaluación. A los 15 y 30 DPA, el tratamiento incrementó la longitud del brote en 87 y 55 %, respectivamente, respecto al testigo. Estos resultados evidencian una respuesta positiva de los bioestimulantes sobre el

crecimiento vegetativo del cultivo. Diversos autores han señalado que los bioestimulantes a base de aminoácidos pueden favorecer la síntesis proteica, el metabolismo del nitrógeno y la actividad fotosintética, promoviendo una mayor expansión celular y elongación de los tejidos vegetales (du Jardin, 2015; Rouphael & Colla, 2020). Asimismo, los aminoácidos libres pueden actuar como precursores de compuestos metabólicos involucrados en procesos de crecimiento y adaptación al estrés, lo que contribuye a una mayor actividad vegetativa de las plantas.

Por otra parte, el diámetro del brote no presentó diferencias significativas entre tratamientos. La ausencia de respuesta en esta variable sugiere que la acción de los bioestimulantes estuvo asociada principalmente al crecimiento longitudinal de los brotes y no al incremento del grosor de los tejidos. Resultados similares han sido observados en otros cultivos frutales, donde la aplicación de bioestimulantes genera respuestas más evidentes en variables relacionadas con la elongación y desarrollo vegetativo que en el crecimiento radial de los tallos (Rouphael & Colla, 2020; Bulgari et al., 2019).

Cuadro 1. Efecto de Hortamin® + Bioaluminium® sobre el número de brotes por planta, longitud y diámetro del segundo brote basal de higo cv. Black Mission.

Tratamientos	Número de brote planta^{-1} (u)		Longitud del brote (cm)		Diámetro del brote (cm)	
	15 DPA	30 DPA	15 DPA	30 DPA	15 DPA	30 DPA
T1	5.60	7.20	4.6o a	9.33 a	0.70	0.74
T2	5.80	7.07	2.45 b	6.01 b	0.66	0.72
EE	0.021^{NS}	0.022^{NS}	0.596*	0.645*	0.011^{NS}	0.025^{NS}
CV (%)	9.24	9.57	10.02	10.34	8.65	9.31

Leyenda: T1: Hortamin + Bioaluminium; T2: Testigo; DPA: Días de la primera aplicación; EE: Error estándar de la media; CV: Coeficiente de variación; Medias seguidas por letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas según la prueba t de Student (P≤0.05). NS: sin diferencias significativas (P>0.05).

Los resultados correspondientes a la tasa de crecimiento diaria se muestran en el Cuadro 2. La aplicación de Hortamin® + Bioaluminium® incrementó significativamente la tasa de crecimiento diaria de la longitud del brote, mientras que no se observaron diferencias en la tasa de crecimiento del diámetro. Este comportamiento confirma que la combinación de ambos productos favoreció la velocidad de elongación de los brotes durante el periodo evaluado. El efecto observado puede atribuirse a la acción complementaria de los aminoácidos y micronutrientes presentes en los bioestimulantes. Los aminoácidos participan

directamente en la síntesis de proteínas estructurales y enzimas, mientras que elementos como zinc, cobre y manganeso intervienen como cofactores enzimáticos esenciales en procesos relacionados con la fotosíntesis, respiración y metabolismo de nutrientes (Calvo et al., 2014; Rouphael & Colla, 2020).

Cuadro 2. Efecto de Hortamin® + Bioaluminium® sobre la tasa de crecimiento diaria de la longitud y diámetro del segundo brote basal.

Tratamiento	Tasa de crecimiento longitud del tallo (cm día^{-1})	Tasa de crecimiento diámetro del tallo (cm día^{-1})
T1: Hortamin + Bioaluminum	0.20 a	0.008
T2: Testigo	0.14 b	0.010
EE	0.64*	0.025^{NS}
CV(%)	10.23	9.64

Leyenda: T1: Hortamin + Bioaluminium; T2: Testigo; DPA: Días de la primera aplicación; EE: Error estándar de la media; CV: Coeficiente de variación; Medias seguidas por letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas según la prueba t de Student (P≤0.05). NS: sin diferencias significativas (P>0.05).

El efecto de los tratamientos sobre el número de frutos por brote se presenta en el Cuadro 3. Las plantas tratadas con Hortamin® + Bioaluminium® alcanzaron un promedio de 12 frutos por brote, superando significativamente al tratamiento testigo. Este resultado sugiere que la estimulación del crecimiento vegetativo favoreció simultáneamente la capacidad de las plantas para sostener un mayor número de estructuras reproductivas. Una mayor longitud de brotes generalmente incrementa la superficie fotosintética activa y la disponibilidad de fotoasimilados destinados al desarrollo de frutos, lo que puede traducirse en una mayor capacidad productiva.

Cuadro 3. Efecto de Hortamin® + Bioaluminium® sobre el número de frutos por brote en higo cv. Black Mission.

Tratamientos	Número de frutos por brote (u)
T1: Hortamin + Bioaluminum	12.00 a
T2: Testigo	8.00 b
EE	0.543*
CV(%)	9.32

Leyenda: T1: Hortamin + Bioaluminium; T2: Testigo; EE: Error estándar de la media; CV: Coeficiente de variación; Medias seguidas por letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas según la prueba t de Student ($P \leq 0.05$).

Adicionalmente, diversos estudios han documentado que los bioestimulantes pueden mejorar la absorción y eficiencia de uso de nutrientes, favoreciendo tanto el crecimiento vegetativo como los procesos reproductivos en especies frutales (du Jardin, 2015; Bulgari et al., 2019). Aunque la información científica sobre el empleo de bioestimulantes en higo es aún limitada, los resultados obtenidos demuestran que la aplicación combinada de Hortamin® y Bioaluminium® constituye una alternativa promisoria para estimular el crecimiento inicial y la fructificación temprana de plantas de higo cv. Black Mission bajo condiciones de agricultura protegida en zonas áridas del noroeste de México.

Conclusiones

La aplicación foliar combinada de Hortamin® y Bioaluminium® promovió el crecimiento vegetativo inicial de plantas de higo (*Ficus carica* L.) cv. Black Mission cultivadas bajo condiciones de agricultura protegida, al incrementar la longitud de los brotes y su tasa de crecimiento, sin afectar el número de brotes emitidos ni el diámetro de estos.

Asimismo, la aplicación de ambos bioestimulantes favoreció el desarrollo reproductivo temprano al incrementar el número de frutos por brote, lo que evidencia su potencial como una alternativa de manejo para mejorar el establecimiento y desempeño productivo inicial del cultivo de higo en las condiciones áridas del noroeste de México.

Literatura citada

Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. Agronomy, 9(6), 306. https://doi.org/10.3390/agronomy9060306

Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. Plant and Soil, 383, 3–41. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8

du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae, 196, 3–14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

FAOSTAT. (2023). *Crop Production, Yield, Harvested Area and Processed (Global—National—Annual)—FAOSTAT«FAOcatalog»*. ttps://data.apps.fao.org/catalog/dataset/crop-production-yield-harvested-area-and-processed-global-national-annual-faostat

Ferrara, G., Camposeo, S., Palasciano, M., & Godini, A. (2021). The fig tree in the Mediterranean basin: Current status and perspectives. Horticulturae, 7(8), 211. https://doi.org/10.3390/horticulturae7080211

Melgarejo, P., Salazar, D. M., & Artes, F. (2010). Organic acids and sugars composition of harvested fig fruits. Acta Horticulturae, 873, 121–126.

Solomon, A., Golubowicz, S., Yablowicz, Z., Grossman, S., Bergman, M., Gottlieb, H. E., Altman, A., Kerem, Z., & Flaishman, M. A. (2006). Antioxidant activities and anthocyanin content of fresh fruits of common fig (*Ficus carica* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54(20), 7717–7723. https://doi.org/10.1021/jf060497h

Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. Frontiers in Plant Science, 11, 40. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040

Villar, R., Ruiz, R., J., Quero, J. L., Poorter, H., Valladares, R. F., & Marañón, T. 2008. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/organizacion/organismos-publicos/ Consultado: 14/02/2024

Wojdyło, A., Nowicka, P., Carbonell-Barrachina, Á. A., Hernández, F., & Figiel, A. (2016). Phenolic compounds, antioxidant and antidiabetic activity of different cultivars of *Ficus carica* L. fruits. Journal of Functional Foods, 25, 421–432. https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.06.015

Efecto de la aplicación de ácido salicílico y ácido glutámico sobre el contenido de clorofilas en plantas de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.)

Jesús Yassir Espinoza Galaviz[37], Carlos Estuardo Castillo Chacón[38], Julio César Tafolla Arellano[39], José Antonio González Fuentes[40]

Resumen

El cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) enfrenta condiciones ambientales que pueden afectar el crecimiento y el desempeño fisiológico de las plantas, por lo que es necesario desarrollar estrategias que favorezcan su productividad y resiliencia. En este contexto, los bioestimulantes representan una alternativa para mejorar procesos relacionados con el metabolismo y la actividad fotosintética. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de aplicaciones foliares de ácido salicílico (SA) y ácido glutámico (GA) sobre el contenido de clorofila y el índice SPAD en plantas de arándano. El experimento se realizó en un invernadero tipo túnel de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, utilizando plantas de arándano cultivar S-2525 establecidas en macetas de 30 L. Se evaluaron tres tratamientos: control, SA (1 mM L^{-1}) y GA (500 mg L^{-1}), aplicados cada dos semanas durante las etapas de antesis y desarrollo del fruto. El contenido de clorofila *a*, *b* y total se determinó mediante espectrofotometría, mientras que el índice SPAD se obtuvo mediante un medidor portátil. Las aplicaciones de SA y GA incrementaron significativamente los contenidos de clorofila *a*, *b* y total, así como el índice SPAD, respecto al control, sin diferencias significativas entre ambos bioestimulantes. Estos resultados indican que la aplicación foliar de SA y GA favorece la conservación y síntesis de pigmentos fotosintéticos, contribuyendo a mejorar el estado fisiológico y la capacidad fotosintética del arándano.

Palabras clave: Índice SPAD, clorofila, biostimulantes.

[37] Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Saltillo, CP 25315, espinozayassir@gmail.com
[38] Consultores Técnicos en Producción Agrícola, Guadalajara, CP 45645, México; carlosecastillo65@gmail.com
[39] Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Ciencias Básicas, Saltillo, CP 25315, México; jtafare@uaaan.edu.mx
[40] Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Saltillo, CP 25315, jagf252001@gmail.com

Abstract

The cultivation of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) faces environmental conditions that can affect plant growth and physiological performance, making it necessary to develop strategies that promote productivity and resilience. In this context, biostimulants represent an alternative for improving processes related to metabolism and photosynthetic activity.

The objective of this study was to evaluate the effect of foliar applications of salicylic acid (SA) and glutamic acid (GA) on chlorophyll content and SPAD index in blueberry plants. The experiment was conducted in a tunnel-type greenhouse at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, using blueberry plants of the S-2525 cultivar grown in 30-L pots. Three treatments were evaluated: control, SA (1 mM L^{-1}), and GA (500 mg L^{-1}), applied every two weeks during anthesis and fruit development stages. Chlorophyll a, b, and total chlorophyll contents were determined by spectrophotometry, while the SPAD index was measured using a portable chlorophyll meter. Foliar applications of SA and GA significantly increased chlorophyll a, b, and total chlorophyll contents, as well as the SPAD index, compared with the control, with no significant differences between the two biostimulants. These results indicate that foliar application of SA and GA promotes the preservation and synthesis of photosynthetic pigments, contributing to improved physiological status and photosynthetic capacity in blueberry plants.

Keywords: SPAD index, chlorophyll, biostimulants.

Introducción

El arándano azul o blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.; Ericaceae) es una de las berries de mayor relevancia a nivel mundial debido tanto a su creciente demanda como a las propiedades nutricionales y funcionales de sus frutos. El arándano destaca por su elevada capacidad antioxidante y por contener diversos compuestos bioactivos, entre los que se encuentran compuestos fenólicos, ácidos orgánicos y vitamina C (Popova, 2019). Su consumo se ha asociado con efectos benéficos para la salud humana y con la prevención de diversas enfermedades, incluyendo diabetes tipo 2, infecciones urinarias y trastornos cardiovasculares, neurodegenerativos e intestinales (Stull *et al*., 2024). Además de su valor nutricional, la aceptación del fruto en el mercado está estrechamente relacionada con atributos de calidad como la apariencia, firmeza, presencia de bloom o pruina y características sensoriales, particularmente un sabor intenso con un adecuado equilibrio entre

dulzor y acidez (Gilbert *et al*., 2014).

El crecimiento de la demanda de este fruto ha favorecido la expansión de su producción y comercialización a escala global. En 2023, el mercado mundial del arándano alcanzó un valor aproximado de 15 mil millones de dólares y se prevé un crecimiento considerable durante la próxima década. China, Estados Unidos, Perú, Chile y México se encuentran entre los principales países productores destinados al mercado de fruta fresca (Brazelton *et al*., 2024). En este contexto, México ha adquirido una participación importante en el comercio internacional; durante el ciclo 2023-2024, sus exportaciones alcanzaron aproximadamente 73,000 toneladas, con Estados Unidos como principal destino.

Sin embargo, la producción de arándano enfrenta desafíos asociados con las condiciones ambientales actuales y los efectos del cambio climático. Factores como las temperaturas extremas, la baja humedad relativa, el incremento de la radiación ultravioleta, la salinidad y los periodos de sequía pueden afectar negativamente el crecimiento de las plantas, el rendimiento y los atributos de calidad del fruto (Lobos y Hancock, 2015). Ante estas condiciones, es necesario implementar estrategias de manejo que permitan mejorar la respuesta del cultivo y mantener su productividad y calidad. Entre las alternativas de mayor interés se encuentra el uso de bioestimulantes, definidos como sustancias o microorganismos capaces de mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, incrementar la tolerancia de las plantas frente a condiciones de estrés y favorecer características relacionadas con la calidad de los cultivos, independientemente de su contenido nutrimental (Du Jardin, 2015).

La aplicación de bioestimulantes durante la precosecha representa, por tanto, una estrategia sostenible para complementar las prácticas agronómicas convencionales. Su utilización puede contribuir a mejorar el desarrollo y productividad de las plantas, así como determinados atributos de calidad del fruto, al mismo tiempo que podría favorecer una menor dependencia de fertilizantes y productos fitosanitarios. No obstante, a pesar del creciente interés por estas tecnologías, la información disponible sobre su aplicación en precosecha del arándano aún es limitada. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de ácido salicílico y ácido glutámico durante la etapa precosecha del arándano sobre el contenido de clorofila en arándano.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en un invernadero tipo túnel del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México. Las

condiciones ambientales se monitorearon mediante una estación meteorológica WatchDog 2475 Plant Growth Station (Spectrum Technologies, EE. UU.). Durante el experimento se registraron temperaturas máximas y mínimas promedio de 26 y 14 °C, respectivamente, una humedad relativa media de 60 % y una radiación fotosintéticamente activa promedio de 555 µmol m^{-2} s^{-1}.

Se utilizaron plantas de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) cultivar S-2525, trasplantadas en macetas de 30 L con fibra de coco como sustrato. La nutrición se suministró mediante fertirrigación por goteo, aplicando aproximadamente 1.1–1.4 L $planta^{-1}$ $día^{-1}$ y ajustando la solución nutritiva de acuerdo con la etapa fenológica. Después de dos meses de establecimiento se realizó una poda de formación a 30 cm, eliminando hojas y brotes delgados desde la base de la corona. Los tratamientos utilizados fueron: agua destilada, ácido salicílico (SA) 1 mM L^{-1} al 99% (Jalmek) y ácido glutámico (GA) 500 mg L^{-1} al 99% (Jalmek). Todos los tramientos se aplicaron por vía foliar cada dos semanas durante la antesis (flor abierta) y producción de frutos (BBCH 60 hasta 89).

El contenido de clorofilas se determinó mediante el método espectrofotométrico de la AOAC (Helrich, 1990). El tejido foliar (2.5 g) se extrajo con acetona y la absorbancia de los extractos se registró a 660 y 643 nm utilizando espectrofotómetro (Jenway 6320D, Staffordshire, UK). Las concentraciones de clorofila a (Ca), clorofila b (Cb) y clorofila total (Ct) se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

$$Ca = 9.93(A_{660}) - 0.777(A_{643}) \quad (1)$$

$$Cb = 17.6(A_{643}) - 2.81(A_{660}) \quad (2)$$

$$Ct = 7.12(A_{660}) + 16.8(A_{643}) \quad (3)$$

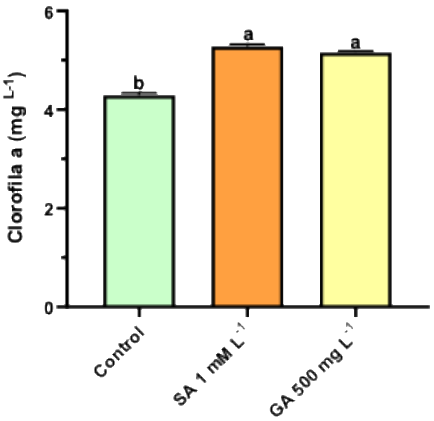
donde A_{660} y A_{643} corresponden a la absorbancia registrada a 660 y 643 nm, respectivamente. Los resultados se expresaron en mg L^{-1} de clorofila. Así mismo se cuantificaron las unidades SPAD (Soil Plant Analysis Development), tomado cuatro lecturas por planta de forma aleatoria en hojas jóvenes completamente expandidas al medio día, con un medidor de clorofila portátil SPAD-502 plus (Konica Minolta, Osaka, Japón).

El experimento se acomodó en un diseño completamente al azar con cuatro replicas por tratamiento, teniendo como replica una planta de arándano. Los datos obtenidos se sometieron a los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza

(Levene), se realizó un ANOVA, seguido de prueba de comparación de medias de Tukey ($p<0.05$) usando el software InfoStat (v2020) (Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina).

Resultados y discusión

La aplicación exógena de ácido salicílico (SA) y ácido glutámico (GA) incrementó significativamente los niveles de clorofila a en comparación del control, las cuales mostraron el valor más bajo. El análisis estadístico mostró que tanto el SA como el GA difieren de forma significativa del grupo control, lo que evidencia una estimulación de este pigmento. Esta respuesta fotosintética mejorada se atribuye a dos mecanismos de acción complementarios: por un lado, el ácido salicílico promueve una respuesta sistémica que mitiga el daño oxidativo y previene la degradación enzimática de la clorofila



(Khoshbakht y Asgharei, 2015), por otro lado, el ácido glutámico ejerce una función nutricional y metabólica clave al incorporarse directamente en la ruta biosintética de la clorofila como precursor del ácido 5-aminolevulínico (Gough *et al*., 2003).

Figura 1. Efecto del ácido salicílico (SA 1 mM L^{-1}) y ácido glutámico (GA 500 mg L^{-1}) sobre la concentración de clorofila a

El contenido de clorofila b aumentó significativamente tras la aplicación de ácido salicílico (SA) y ácido glutámico (GA) en comparación con las plantas sin tratar, las cuales mantuvieron la concentración más baja de este pigmento accesorio. La clorofila b es crucial para ampliar la capacidad de captura de luz en los complejos antena. Por su parte, el ácido salicílico estimula la actividad de la enzima clorofila a oxigenasa y protege los cloroplastos frente al daño oxidativo (Ali *et al*., 2019). Asimismo, el ácido glutámico actúa como un bloque de construcción y fuente de nitrógeno directo en la síntesis de pigmentos y proteínas estructurales del aparato fotosintético, optimizando la captación de energía lumínica.

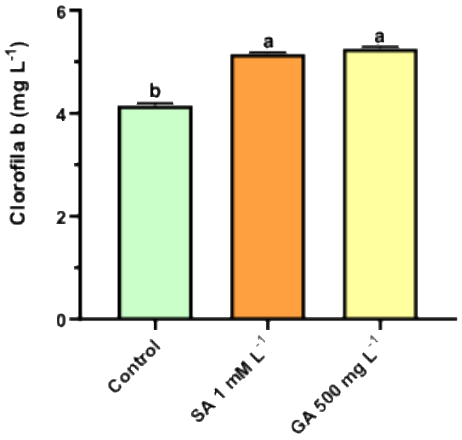


Figura 2. Efecto del ácido salicílico (SA 1 mM L^{-1}) y ácido glutámico (GA 500 mg L^{-1}) sobre la concentración de clorofila b.

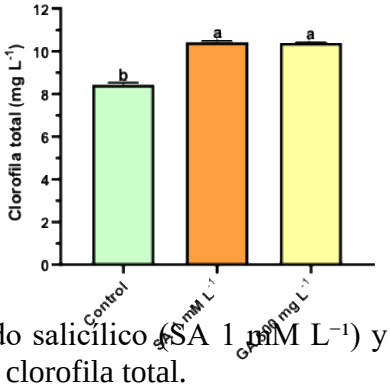


Figura 3. Efecto del ácido salicílico (SA 1 mM L^{-1}) y ácido glutámico (GA 500 mg L^{-1}) sobre la concentración de clorofila total.

El contenido de clorofilas totales fue menor en el tratamiento control, mientras que la aplicación de ácido salicílico y ácido glutámico incrementó el contenido de pigmentos, con valores similares entre ambos tratamientos. Este incremento sugiere que ambos bioestimulantes favorecieron la actividad fotosintética de las plantas, posiblemente debido a

la participación del ácido salicílico en la síntesis y estabilidad de los pigmentos y del ácido glutámico en el metabolismo del nitrógeno y la formación de clorofila

El índice SPAD aumentó significativamente con las aplicaciones de ácido salicílico (SA) y ácido glutámico (GA) en comparación con el control, mostrando ambos bioestimulantes la misma efectividad. El índice SPAD es un indicador no destructivo directamente proporcional a la concentración de clorofilas y al estatus nitrogenado de la hoja, estos valores confirman un mayor verdor foliar y una mejora en la capacidad de absorción de luz (Pinzón-Sandoval *et al*., 2023). SA actúa protegiendo la estructura de los cloroplastos y evitando la degradación de pigmentos, mientras que el GA aporta el nitrógeno clave para la síntesis de nuevas moléculas de clorofila y proteínas fotosintéticas.

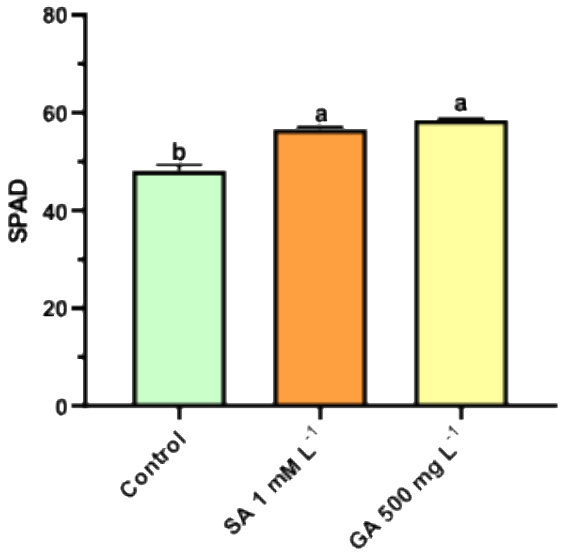


Figura 4. Efecto del ácido salicílico (SA 1 mM L^{-1}) y ácido glutámico (GA 500 mg L^{-1}) sobre índice SPAD.

Conclusiones

Las aplicaciones foliares de SA y GA aumentaron significativamente la clorofila *a*, *b*, total y el índice SPAD respecto al testigo. Estos resultados sugieren que ambos bioestimulantes favorecen la conservación y síntesis de los pigmentos fotosintéticos, mejorando el estado fotosintético de las plantas.

Literatura citada

Ali, Z. H., & Ali, F. H. (2019). Effect of salicylic acid on chlorophyll A, B and carotene content of Petunia sp. Journal of Seed Science, 1, 3.

Brazelton, C., Fain, C., Ogg, M., Riquelme, C., Rodriguez, V., & Ilyas, S. (2024). Global state of the blueberry industry report. International Blueberry Organization.

Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae, 196, 3–14.

Gilbert, J. L., Olmstead, J. W., Colquhoun, T. A., Levin, L. A., Clark, D. G., & Moskowitz, H. R. (2014). Consumer-assisted selection of blueberry fruit quality traits. HortScience, 49(7), 864–873.

Gough, S. P., Westergren, T., & Hansson, M. (2003). Chlorophyll biosynthesis in higher plants: Regulatory aspects of 5-aminolevulinate formation. Journal of Plant Biology, 46(3), 135–160.

Helrich, K. C. (Ed.). (1990). Official methods of analysis of the AOAC (15th ed., Vol. 2). Association of Official Analytical Chemists.

Khoshbakht, D., & Asgharei, M. R. (2015). Influence of foliar-applied salicylic acid on growth, gas-exchange characteristics, and chlorophyll fluorescence in citrus under saline conditions. Photosynthetica, 53(3), 410–418.

Lobos, G. A., & Hancock, J. F. (2015). Breeding blueberries for a changing global environment: A review. Frontiers in Plant Science, 6, 782.

Pinzón-Sandoval, E. H., Balaguera-López, H. E., & Almanza-Merchán, P. J. (2023). Evaluation of SPAD index for estimating nitrogen and magnesium contents in three blueberry varieties (Vaccinium corymbosum L.) on the Andean tropics. Horticulturae, 9(2), 269.

Popova, A. (2019). Comparison of vitamin C content of commercially available fresh fruits. Asian Food Science Journal, 13, 1–6.

Stull, A. J., Cassidy, A., Djousse, L., Johnson, S. A., Krikorian, R., Lampe, J. W., & Tangney, C. (2024). The state of the science on the health benefits of blueberries: A perspective. Frontiers in Nutrition, 11, 1415737.

Evaluación local de micorriza y *Trichoderma* comerciales en la germinación, crecimiento y producción de chile chiltepín

Estela Sañudo-Ayala, Karelia Arizbeth Meza-Ayala, Jaime Alberto Félix-Herrán, Rey David Ruelas-Ayala[41]

Resumen

El chile chiltepín (*Capsicum annuum* L. *var. glabriusculum*) es un recurso biocultural y económico aprovechado por comunidades rurales del norte y noroeste de México; sin embargo, su oferta depende principalmente de poblaciones silvestres y su establecimiento en cultivo enfrenta germinación irregular y elevada variabilidad. El objetivo fue evaluar, bajo condiciones locales de vivero en la Universidad Autónoma Indígena de México, el efecto de inoculantes comerciales de *Trichoderma harzianum* y micorriza arbuscular (*Glomus fasciculatum*), aplicados individualmente y en combinación, sobre germinación, crecimiento y producción de chiltepín. En germinación se evaluaron cuatro tratamientos con tres repeticiones de 50 semillas; para crecimiento y producción se utilizó un diseño completamente al azar con diez plantas por tratamiento. En el primer bioensayo no hubo diferencias en germinación (p = 0.5297); en un segundo ensayo, *Trichoderma* alcanzó el mayor valor numérico (72 %), seguido de la combinación (60 %), micorriza (58 %) y testigo (56 %). La altura, biomasa y producción, tampoco mostraron diferencias significativas. No obstante, la combinación registró los mayores promedios de altura (115.05 cm) y biomasa (110.92 g), y la micorriza la mayor producción por planta (30.48 g), 31 % superior al testigo. La respuesta no homogénea evidencia que la eficacia de los bioinoculantes depende del origen de la semilla, compatibilidad microorganismo-hospedero, nutrición y condiciones ambientales. El estudio aporta una primera validación local y orienta el desarrollo de alternativas sostenibles antes de recomendar bioinsumos a productores.

Palabras clave: bioinoculantes, recurso biocultural, agricultura sostenible, producción local, chile chiltepín.

Abstract

Chiltepin pepper (Capsicum annuum L. var. glabriusculum) is a biocultural and economic resource used by rural communities in northern and northwestern Mexico; however, its supply depends mainly on wild populations, and its cultivation is constrained by irregular germination and high variability. This study evaluated, under local nursery conditions at the

[41] Laboratorio de Biotecnología Aplicada, Ingeniería en Biotecnología. Universidad Autónoma Indígena de México, Unidad Mochicahui, Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa, México. *Autor de correspondencia: reyruelas@uaim.edu.mx

Universidad Autónoma Indígena de México, the effects of commercial Trichoderma harzianum and arbuscular mycorrhiza (Glomus fasciculatum), applied individually and in combination, on chiltepin germination, growth, and fruit production. Four treatments with three replicates of 50 seeds were used for germination, whereas growth and production were assessed in a completely randomized design with ten plants per treatment. No germination differences were found in the first bioassay ($p = 0.5297$); in a second assay, Trichoderma showed the highest numerical value (72%), followed by the combined treatment (60%), mycorrhiza (58%), and control (56%). Height, biomass, and fruit production also showed no significant differences. Nevertheless, the combined treatment had the highest mean height (115.05 cm) and biomass (110.92 g), while mycorrhiza reached the highest yield per plant (30.48 g), 31% above the control. The heterogeneous response indicates that bioinoculant performance depends on seed origin, microorganism-host compatibility, nutrition, and environmental conditions. This first local validation provides guidance for developing sustainable alternatives before recommending commercial bioinputs to producers.

Key words: bioinoculants, biocultural resource, local production, sustainable agriculture, Chiltepin pepper.

Introducción

El chile chiltepín (*Capsicum annuum* L. *var*. *glabriusculum*), no solo es una especie de interés agronómico, sino también, un recurso silvestre asociado con prácticas de recolección, consumo, intercambio y comercialización en comunidades rurales del norte y noroeste de México. La cosecha de frutos silvestre y la siembra de traspatio forman parte de conocimientos tradicionales y aportan ingresos complementarios a las familias, a la vez que mantienen el vínculo entre la población, la alimentación local y el territorio (Villalón-Mendoza et al., 2013). Su relevancia como recurso genético, ecológico y socioeconómico ha motivado investigaciones orientadas a conservar sus poblaciones, mejorar la calidad de la semilla y mitigar la estacionalidad de su oferta.

Su aprovechamiento se realiza de manera tradicional en regiones de Sonora, Sinaloa, Chihuahua y Baja California Sur. A partir de esta actividad, el fruto se comercializa fresco, seco, encurtido o transformado en salsas, con potencial para mercados especializados nacionales y con proyección internacional. Sin embargo, las oportunidades económicas coexisten con limitaciones de organización, propagación, manejo agronómico, logística y comercialización. Un reflejo de esta problemática se documenta en Chínipas, Chihuahua, donde a pesar de una demanda creciente y precios locales de 300 a 400 pesos por litro, persiste la ausencia de canales estables de distribución, ventas ocasionales relacionadas con el flujo migratorio estacional; también se identificó la necesidad de acompañamiento técnico y organizativo (Anchondo-Aguilar, 2024). Estos antecedentes muestran que el valor

comercial del chiltepín puede ser elevado, aunque cambia con la región, temporada, presentación y vías de distribución.

Por lo tanto, el desarrollo de sistemas de producción agrícola controlada tiene sentido tanto económico como ecológico, ya que puede estabilizar la oferta y disminuir la presión sobre poblaciones naturales. No obstante, cultivar chiltepín implica adaptar el sistema al propósito productivo. En el noroeste de México, la producción bajo invernadero fue 2.34 veces mayor que bajo rodales de mezquite; en contraste, los frutos provenientes del rodal presentaron mejores atributos de acidez y coloración roja (Mc Caughey-Espinoza et al., 2020). Esta discrepancia demuestra que no existe un modelo de producción único; maximizar el rendimiento puede modificar la calidad del fruto, por lo que las tecnologías deben evaluarse conforme al ambiente, los recursos disponibles y las prioridades de cada comunidad.

Además de los retos de manejo, la domesticación del chiltepín está condicionada por la baja germinación, la variabilidad genética y morfológica, susceptibilidad a factores ambientales y conocimiento limitado de su fisiología bajo cultivo (Mares-Quiñones y Valiente-Banuet, 2019). Además, la calidad fisiológica de la semilla, su procedencia y el ambiente de germinación, pueden generar respuestas muy distintas entre lotes y poblaciones. Por ello, lo que funciona con otro ecotipo, suelo o clima, no necesariamente producirá el mismo resultado en Mochicahui y zonas cercanas.

En este sentido, entre las alternativas de menor impacto ambiental, se encuentran los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Dentro de este grupo, los hongos micorrízicos arbusculares pueden ampliar la exploración del suelo y mejorar la adquisición de agua y nutrimentos, mientras que *Trichoderma spp*. puede favorecer el desarrollo radicular, la solubilización de nutrimentos y la tolerancia a diferentes estreses. Sin embargo, la respuesta depende de la procedencia y calidad de las semillas, el genotipo o población vegetal, la adaptación local del microorganismo, el establecimiento efectivo del inoculante, la disponibilidad de fósforo, el sustrato, el ambiente, la presencia de estrés y la dosis y vía de aplicación. En chile chiltepín, la respuesta a micorrizas ha variado con el ecotipo, la cubierta y el grado de colonización (Guillén-Enríquez et al., 2021); asimismo, aislamientos nativos de *Bacillus* mostraron efectos diferentes entre cepas en germinación, crecimiento y tolerancia a sequía, lo cual se atribuyó a factores genéticos, ambientales y a su capacidad para establecer interacciones específicas con la planta (Mendoza-Alatorre et al., 2024).

En este contexto, evaluar productos comerciales bajo condiciones locales no es un ejercicio menor. Antes de recomendar su uso a los productores, es necesario determinar si su desempeño es reproducible en la población vegetal, sustrato, nutrición y clima de la región. Desde un enfoque orientado a la sostenibilidad y al aporte sociocultural, esta validación constituye una forma de transferencia responsable, genera evidencia local y evita asumir que

una tecnología exitosa en otro cultivo o territorio será útil de manera automática. Bajo esta premisa, se planteó como hipótesis que la inoculación individual o combinada con micorriza y *Trichoderma* favorecería el establecimiento y rendimiento del chiltepín. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar su efecto sobre germinación, crecimiento, biomasa y producción de fruto bajo condiciones de vivero en la Universidad Autónoma Indígena de México.

Materiales y Métodos

Área de estudio y obtención de semillas

El estudio se realizó en la Universidad Autónoma Indígena de México, Unidad Mochicahui, municipio de El Fuerte, Sinaloa. Los frutos se obtuvieron en la comunidad Cinco de Mayo, El Fuerte. Las semillas se extrajeron manualmente y se sometieron a una prueba de flotación en agua destilada; se descartaron las flotantes y las semillas sumergidas se secaron y almacenaron a 4 °C hasta su utilización.

Germinación de chile chiltepín

Se evaluaron cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4), T1 consistió en *Trichoderma harzianum* comercial (Grow Depot®), T2 fue micorriza comercial RADIG® (*Glomus fasciculatum*); T3 correspondió a la combinación de *Trichoderma* + micorriza; y T4, testigo sin bioinoculante. Para cada producto se preparó una suspensión con 0.125 g de inoculante en 25 mL de ácido giberélico (AG_3) a 5000 ppm. Se incorporaron 150 semillas por tratamiento y se mantuvieron en inmersión durante 24 h. Posteriormente se sembró una semilla por cavidad en charolas de 50 cavidades con arena y perlita (1:1). Cada tratamiento contó con tres repeticiones. La germinación se registró diariamente y se calculó el porcentaje final y la cinética de emergencia. La investigación incluyó dos bioensayos de germinación realizados bajo condiciones semejantes.

Crecimiento y producción de chile chiltepín

A los 90 días se seleccionaron diez plantas por tratamiento y se trasplantaron a bolsas de polietileno de 5 kg con arena y perlita (1:1). En los tratamientos micorrizados se colocaron 25 g del producto al momento del trasplante, mientras que *Trichoderma* se aplicó mediante aspersión foliar semanal utilizando la dosis recomendada por el fabricante. Las plantas se fertilizaron una vez a la semana con la solución nutritiva de Steiner y se mantuvieron en invernadero con malla sombra negra de 70 %, con temperaturas promedio de 35 °C durante el día y 25 °C durante la noche. La altura se registró semanalmente durante 30 semanas. Al final del ciclo se determinó biomasa seca a 65 °C hasta peso constante. La producción se cuantificó mediante el peso acumulado de frutos maduros y se expresó en gramos por planta y producción total por tratamiento.

Diseño y análisis estadístico

Para crecimiento y producción se empleó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y diez repeticiones (n = 40 plantas). Los datos de altura final, biomasa seca y producción de fruto fresco se analizaron mediante ANOVA ($\alpha = 0.05$). Se verificaron normalidad y homogeneidad de varianzas con las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett; cuando correspondió, se consideró la prueba de Tukey para comparación de medias. Los datos se procesaron mediante el paquete estadístico Statistix 8.1.

Resultados y discusión

Respuesta germinativa y variabilidad entre bioensayos

En el primer bioensayo, los porcentajes de germinación variaron entre 38 y 54 %, sin diferencias significativas ($p = 0.5297$). La micorriza presentó el mayor promedio y *Trichoderma* el menor. En el segundo bioensayo, todos los tratamientos mostraron valores superiores y *Trichoderma* alcanzó 72 %, seguido de la combinación (60 %), micorriza (58 %) y testigo (56 %) (Cuadro 1). La inversión del comportamiento de *Trichoderma* entre ensayos demuestra que la respuesta no fue uniforme y que no puede atribuirse exclusivamente al inoculante.

Cuadro 1. Germinación de semillas de chiltepín en dos bioensayos.

Tratamiento	Bioensayo 1 (%)	Bioensayo 2 (%)
Trichoderma	38.0	72.0
Micorriza	54.0	58.0
Trichoderma + micorriza	52.0	60.0
Testigo	48.7	56.0

Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

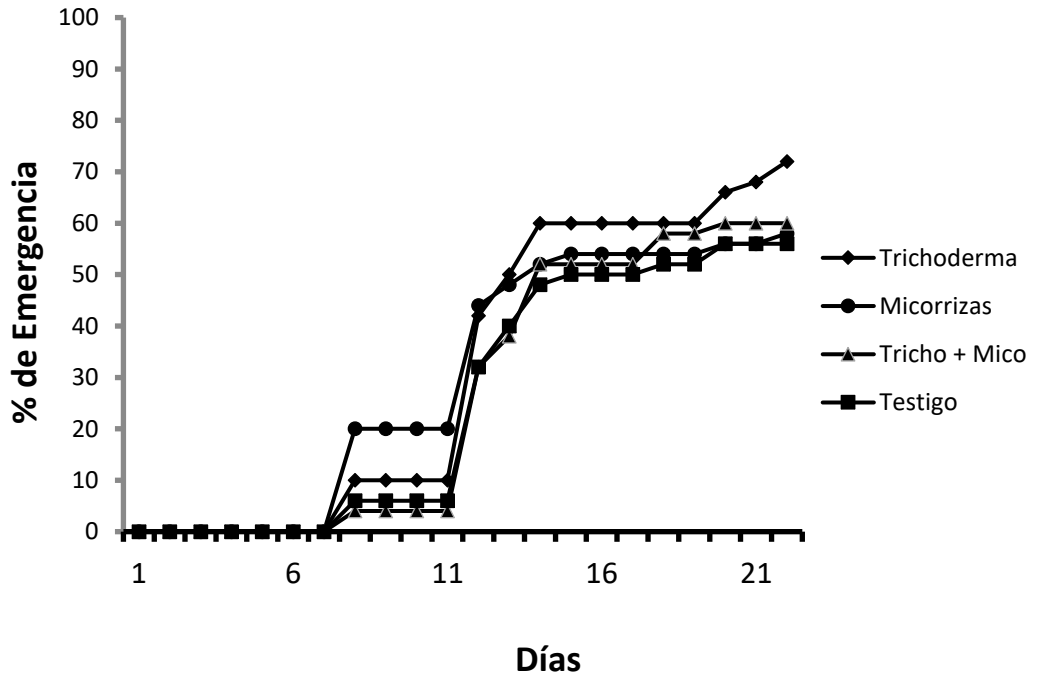
La variación encontrada es congruente con la biología de una especie silvestre que aún se encuentra en proceso de domesticación. La literatura reconoce que la baja germinación y la variabilidad entre poblaciones constituyen dos de las principales limitaciones para su cultivo (Mares-Quiñones y Valiente-Banuet, 2019). Por su parte, Villalón-Mendoza et al. (2013) señalaron que la calidad de la semilla depende de las características del fruto y de la procedencia, mientras que Beltrán-Burboa et al. (2020), obtuvieron respuestas favorables al utilizar AG_3 en condiciones *in vitro*. En el presente estudio, todos los tratamientos recibieron AG_3, por lo que el efecto del regulador pudo reducir las diferencias atribuibles a los bioinoculantes.

Los resultados tampoco contradicen el potencial de los microorganismos benéficos. Rueda-Puente et al. (2010) observaron que bacterias promotoras y micorrizas modificaron

germinación, altura, raíz y biomasa de chile silvestre bajo condiciones de salinidad y temperatura controladas. Más recientemente, Mendoza-Alatorre et al. (2024) demostraron que aislamientos nativos de *Bacillus* mejoraron parámetros germinativos y vegetativos del chiltepín, sobre todo bajo estrés hídrico; sin embargo, los autores también reportaron falta de uniformidad entre cepas. La diferencia central es que dichos aislamientos fueron seleccionados por su adaptación a suelos áridos y se evaluaron bajo un estrés definido, mientras que la presente investigación utilizó productos comerciales en plantas con suministro nutritivo. Esto apoya la idea de que el beneficio microbiano se expresa de forma dependiente del contexto y no como una propiedad universal del producto.

Resulta importante mencionar, que, durante el segundo bioensayo, se registraron los datos de emergencia diaria de plántulas de chile chiltepín durante 21 días (Figura 1), para cada uno de los tratamientos evaluados.

Figura 1. Cinética de germinación de semillas de chile chiltepín



Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

La cinética de germinación permitió entender no solo cuántas semillas germinaron, sino cuándo lo hicieron, lo cual es fundamental para evaluar la eficiencia del establecimiento del cultivo en sus etapas iniciales. Se observó que los tratamientos con microorganismos aceleraron el inicio de la germinación en comparación con el testigo, evidenciando un comportamiento cinético más eficiente. El tratamiento con *Trichoderma* no solo presentó el mayor porcentaje de germinación (72 %), sino que también, mostró un inicio de emergencia más temprano junto con el tratamiento de micorrizas y una mayor pendiente en la curva acumulativa, lo que sugiere una mayor velocidad de germinación. Este resultado es consistente con reportes previos que indican que *Trichoderma spp.* puede producir enzimas que debilitan la testa de la semilla y facilitan la imbibición, reduciendo la latencia (Delgado-Sánchez et al., 2013; Castillo et al., 2022). Además, se ha demostrado que *Trichoderma* actúa como bioestimulante al mejorar la disponibilidad de nutrientes, generar metabolitos beneficiosos y estimular el desarrollo radicular temprano (Abdullah et al., 2021).

Por otro lado, el tratamiento con micorrizas mostró una cinética de germinación más gradual, con un pico de emergencia más tardío, pero aún superior al testigo en términos de germinación total. Esto coincide con lo reportado por González-Rivas et al. (2009), quienes observaron un efecto positivo pero progresivo de las micorrizas en la emergencia de plántulas en especies nativas. La combinación *Trichoderma* + mico presentó un comportamiento intermedio, con una curva que sugiere una ligera competencia o falta de sinergia entre los microorganismos en las primeras fases de germinación, aunque sin afectar significativamente la germinación final. El testigo mostró una germinación más lenta y con menor pendiente, indicando una velocidad de emergencia reducida. Este comportamiento puede representar un riesgo en campo, ya que una germinación más tardía expone a las plántulas a condiciones desfavorables por más tiempo, afectando el establecimiento del cultivo (Pérez y Gómez, 2017).

Crecimiento y biomasa

Después de 30 semanas, la combinación *Trichoderma* + micorriza registró la mayor altura promedio (115.05 cm), seguida de micorriza (112.05 cm), *Trichoderma* (106.98 cm) y testigo (94.70 cm). No obstante, el ANOVA no detectó diferencias *(p* = 0.5197) y el coeficiente de variación fue 30.21 %. Estos valores podrían sugerir un beneficio vegetativo de la coinoculación, pero no demuestran sinergia. Para afirmar una interacción positiva entre ambos hongos sería necesario comprobar la colonización radicular y comparar su establecimiento cuando se aplican de manera individual y combinada.

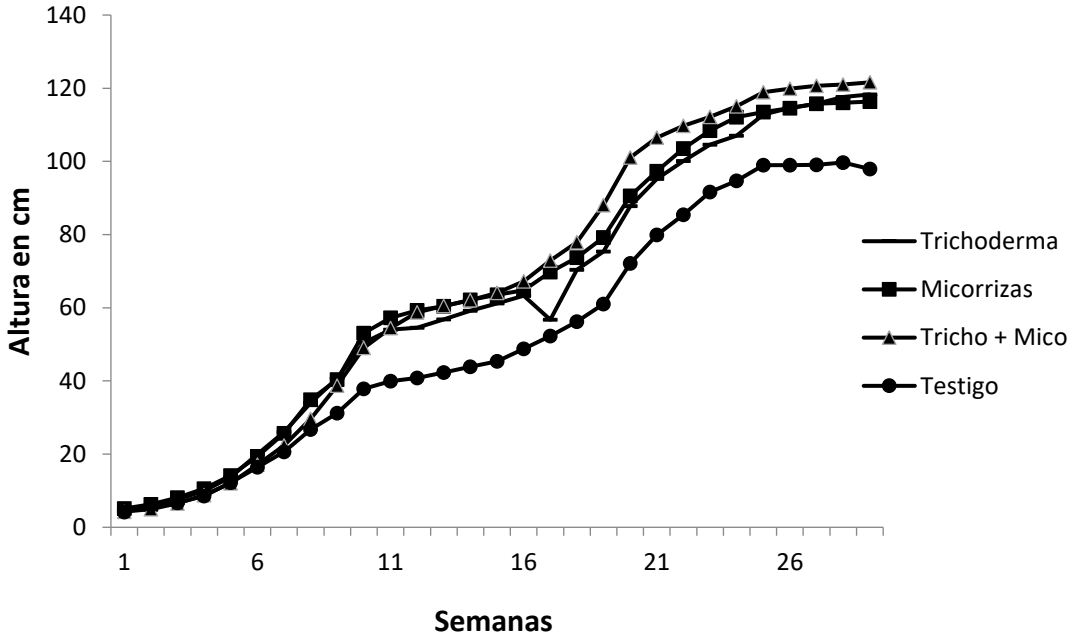
En chile chiltepín, Guillén-Enríquez et al. (2021) observaron que un consorcio micorrízico mejoró características agronómicas y calidad del fruto; sin embargo, la magnitud de la respuesta dependió del ecotipo, la cubierta de sombreo, el número de esporas y el porcentaje

de colonización. En este estudio, la falta de verificación de colonización limita la interpretación, ya que una respuesta débil podría deberse a baja viabilidad del producto, establecimiento insuficiente o incompatibilidad con la población local, y no necesariamente a la ausencia de potencial de la tecnología.

El suministro de solución nutritiva de Steiner también pudo reducir la ventaja relativa de la micorriza. Estos hongos suelen mostrar mayores beneficios cuando la disponibilidad de fósforo o agua limita el crecimiento; si la nutrición cubre los requerimientos de la planta, el costo de mantener la simbiosis puede disminuir la diferencia frente al testigo. Esta explicación deberá comprobarse mediante diseños factoriales que separen el efecto de la inoculación y el nivel de fertilización.

Además del valor final de altura, el registro semanal durante 30 semanas permitió analizar la trayectoria temporal del crecimiento de cada tratamiento (Figura 2). En las primeras semanas, las curvas mostraron un comportamiento semejante; no obstante, a partir de aproximadamente la semana seis, comenzó a observarse una separación entre los tratamientos inoculados y el testigo. Esta respuesta es compatible con los mecanismos atribuidos a los hongos micorrízicos y a *Trichoderma*, relacionados con la exploración del sustrato, la adquisición de nutrimentos y el desarrollo radicular.

Figura 2. Cinética de crecimiento en altura de chile chiltepín



Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Villegas et al. (2018) observaron que el momento de aplicación de *Trichoderma harzianum* modificó la dinámica de crecimiento en altura de *Capsicum annuum* L. La inoculación antes de la siembra produjo una mayor tasa inicial de crecimiento, mientras que la aplicación posterior favoreció una mayor altura final. Estos resultados muestran que el efecto de *Trichoderma* puede expresarse de manera distinta a lo largo del desarrollo, dependiendo del manejo y del momento de aplicación.

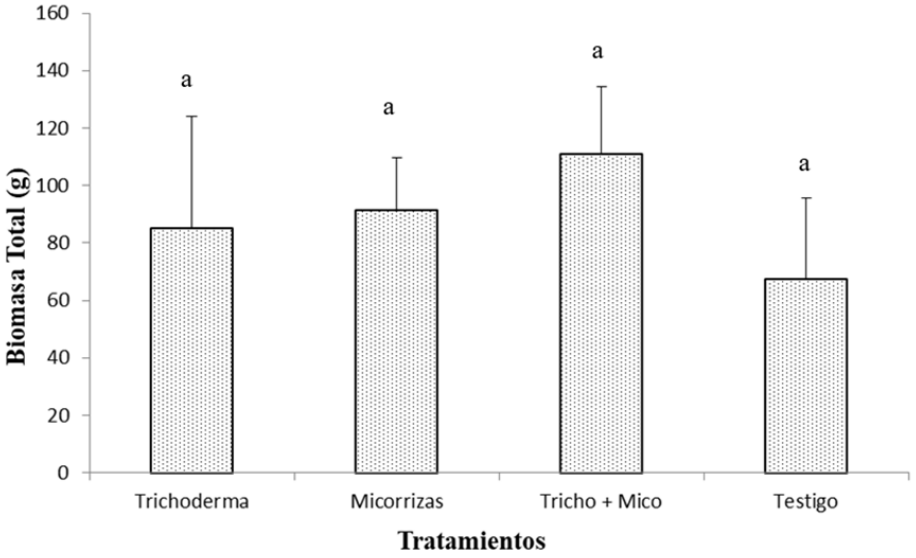
En el presente estudio, entre las semanas 17 y 21 se observó una fase de crecimiento más acelerado en los tratamientos inoculados, particularmente en la combinación *Trichoderma* + micorriza, cuya curva superó gradualmente a las demás y alcanzó la mayor altura al final del periodo. Aunque su crecimiento inicial fue menos pronunciado, Rokhminarsi et al. (2019) reportaron que la aplicación conjunta de micorrizas y *Trichoderma*, bajo dosis y condiciones adecuadas, puede favorecer variables vegetativas y reproductivas de *Capsicum annuum*, como número de hojas, área foliar y ramificación. En este estudio, la mayor altura final del tratamiento combinado, junto con la elevada variabilidad entre plantas, sugieren que el efecto

pudo depender de la compatibilidad entre inoculantes, su establecimiento y el momento de aplicación, aspectos que deberán evaluarse de manera directa.

En conjunto, la cinética mostró que la respuesta del chiltepín a los bioinoculantes comerciales varió con la etapa de desarrollo. Las aplicaciones individuales presentaron una ventaja numérica más temprana, mientras que la combinación expresó su mayor desempeño en fases posteriores. Por ello, una evaluación limitada a las primeras semanas habría proporcionado una interpretación incompleta. Estos resultados refuerzan la importancia de realizar seguimientos prolongados y complementar la altura con biomasa, producción y confirmación de colonización.

En concordancia con el seguimiento de la altura, la acumulación de biomasa mostró diferencias numéricas entre los tratamientos (Figura 3). La combinación *Trichoderma* + micorriza alcanzó el mayor promedio de biomasa total, con 110.92 g, mientras que los tratamientos individuales presentaron valores intermedios y el testigo registró el menor promedio, con 67.35 g. No obstante, las diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p = 0.0954$) y las amplias barras de dispersión evidencian una variabilidad considerable entre plantas. Lo anterior, concuerda con diversos estudios que reportan la importancia de la biota rizosférica en cultivos nativos o silvestres como el chiltepín. La presencia y actividad de microorganismos benéficos puede favorecer el acceso a nutrientes, el desarrollo radicular y el aprovechamiento de los recursos disponibles en el sustrato (Cruz et al., 2004; Contreras-Cornejo et al,, 2014; Abdullah et al., 2021).

Figura 3. Biomasa total de plantas de chile chiltepín bajo inoculación individual y combinada con *Trichoderma* y micorriza comercial



Las barras representan la media de diez réplicas ± ES (Error Estándar). Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos (p>0.05). Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

La mayor biomasa numérica de la combinación fue consistente con su mayor altura final. Esta correspondencia sugiere que su crecimiento no se limitó únicamente a la elongación del tallo, sino que estuvo acompañado por una mayor acumulación de materia seca. Por su parte, Illescas et al., (2021), reportaron que este tipo de interacción puede asociarse también con respuestas sistémicas relacionadas con la señalización hormonal y la estimulación del crecimiento vegetal.

Producción de fruto y pertinencia agronómica

La micorriza alcanzó la mayor producción promedio de fruto fresco (30.48 g por planta), seguida de la combinación (23.73 g), el testigo (23.24 g) y *Trichoderma* (20.76 g). La producción total del tratamiento micorrizado fue de 304.83 g, aproximadamente 31 % superior a la del testigo (232.35 g). Sin embargo, las diferencias no fueron significativas (p = 0.6334) y el coeficiente de variación alcanzó 70.54 % (Cuadro 2).

Cuadro 2. Producción de chile chiltepín bajo diferentes tratamientos

Tratamiento	Fruto (g planta^{-1})	Producción total (g)
Trichoderma	20.76	207.60
Micorriza	30.48	304.83
Trichoderma + micorriza	23.73	237.30
Testigo	23.24	232.35

Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

La alta variabilidad productiva es compatible con el carácter silvestre y heterogéneo del material, al comparar estos resultados con sistemas de producción establecidos, se observa que la respuesta del chiltepín cambia con el ambiente y el objetivo productivo. Mc Caughey-Espinoza et al. (2020) registraron una producción bajo invernadero 2.34 veces mayor que bajo rodal de mezquite; sin embargo, los frutos del rodal mostraron mejor acidez y color rojo. Este antecedente es relevante porque confirma que el aumento del rendimiento no es el único criterio de éxito. Para comunidades interesadas en fruto seco, salsas artesanales o mercados especializados, la calidad, el costo de manejo y la conservación del entorno pueden ser tan importantes como los gramos producidos por planta.

Alcance social y valor de la validación local

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la principal aportación de esta investigación radica en evaluar un bioinoculante comercial bajo condiciones locales antes de transferirlo como recomendación. La respuesta no homogénea observada permite identificar factores que requieren mayor control y contribuye a evitar que los productores inviertan en bioinsumos con base únicamente en resultados obtenidos en otros cultivos, ecotipos o regiones.

Este principio es especialmente importante cuando se trabaja con un recurso biocultural como el chiltepín. En Chínipas, su comercialización se reconoce como una segunda fuente de ingresos para unidades agrícolas familiares, aunque todavía se requieren estrategias de organización, conservación y acceso al mercado (Anchondo-Aguilar, 2024). En el noreste de México, el cultivo de traspatio y la colecta tradicional contribuyen a la economía familiar, mientras que la disponibilidad del fruto fuera de temporada y la generación de productos frescos, secos o procesados pueden mejorar el ingreso comunitario (Villalón-Mendoza et al., 2013). Generar conocimiento en Mochicahui permite comenzar a identificar qué herramientas pueden funcionar bajo las condiciones específicas de la región y cuáles requieren adaptación.

Por ello, la ausencia de diferencias estadísticas no equivale a ausencia de conocimiento. El estudio mostró que la respuesta a los productos comerciales varió entre etapas y variables: *Trichoderma* presentó el mayor valor germinativo en el segundo bioensayo, la combinación alcanzó los mayores valores numéricos de altura y biomasa, y la micorriza registró la mayor producción numérica. Esta distribución de tendencias indica que los efectos potenciales no son uniformes y que deben valorarse de acuerdo con la etapa fenológica y bajo condiciones experimentales claramente definidas. Asimismo, resulta pertinente incorporar en estudios posteriores análisis de costo-beneficio, calidad del fruto y aceptación por parte de los productores. De este modo, la investigación puede evolucionar desde una primera evaluación

de bioinsumos hacia el desarrollo de una tecnología apropiada al territorio, económica y culturalmente pertinente.

Conclusiones

Los inoculantes comerciales de *Trichoderma* y micorriza no generaron diferencias estadísticamente significativas en germinación, altura, biomasa ni producción de chile chiltepín bajo las condiciones evaluadas. No obstante, la respuesta varió entre bioensayos, variables y etapas de desarrollo, *Trichoderma* alcanzó el mayor porcentaje de germinación en el segundo ensayo, la combinación presentó los mayores valores numéricos de altura y biomasa, y la micorriza registró la mayor producción de fruto, 31 % por encima del testigo.

Estas tendencias muestran que el desempeño de los bioinoculantes no fue uniforme y estuvo condicionado por la interacción entre el material vegetal, los microorganismos, la nutrición y el ambiente. Aunque los resultados no permiten recomendar todavía un tratamiento específico, aportan evidencia local sobre el comportamiento del chiltepín frente a bioinoculantes comerciales y constituyen una base para el desarrollo de estrategias de manejo más ajustadas a las condiciones de Mochicahui. Estudios posteriores deberán confirmar el establecimiento de los inoculantes y validar su respuesta en campo.

Literatura citada

Abdullah, N. S., Doni, F., Mispan, M. S., Saiman, M. Z., Yusuf, Y. M., Oke, M. A., & Suhaimi, N. S. M. (2021). Harnessing *Trichoderma* in agriculture for productivity and sustainability. *Agronomy*, *11*(12): 2559. https://doi.org/10.3390/agronomy11122559

Anchondo-Aguilar, A. (2024). Chínipas, un municipio serrano reorganizándose en torno a la comercialización de chiltepín. Estudios Sociales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 34(64): e241496. https://doi.org/10.24836/es.v34i64.1496

Beltrán-Burboa, J. N., López-Peralta, M. C. G., Hernández-Meneses, E., & Cruz-Huerta, N. (2020). Germinación in vitro de chile chiltepín (Capsicum annuum L. var. glabriusculum) y regeneración por organogénesis. *Agrociencia*, 54(2), 195-208.

Castillo, R., Castillo, Q., Sáenz, C., Rueda, S., & Sáenz, R. (2022). Efecto del pretratamiento con *Trichoderma* y *Bacillus* en la germinación de semillas de *Agave victoriae-reginae* T. Moore. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *13*(69); 56–72. https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i69.844

Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Alfaro-Cuevas, R., & López-Bucio, J. (2014). *Trichoderma* spp. improve growth of Arabidopsis seedlings under salt stress through enhanced root development, osmolite production, and Na^+ elimination through

root exudates. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, *27*(6): 503–514. https://doi.org/10.1094/MPMI-09-13-0265-R

Delgado-Sánchez, P., Jiménez-Bremont, J. F., Guerrero-González, M. L., & Flores, J. (2013). Effect of fungi and light on seed germination of three *Opuntia* species from semiarid lands of central Mexico. *Journal of Plant Research*, *126*(5): 643–649. https://doi.org/10.1007/s10265-013-0558-2

Guillén-Enríquez, R. R., Hernández-Herrera, J. A., Valdés-Reyna, J., Lira-Saldivar, R. H., & Méndez-Gallegos, S. J. (2021). Impacto de cubierta, ecotipo y endomicorriza en morfología y calidad de chile piquín. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(2): 193-204. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2847

Illescas, M., Pedrero-Méndez, A., Pitorini-Bovolini, M., Hermosa, R., & Monte, E. (2021). Phytohormone production profiles in *Trichoderma* species and their relationship to wheat plant responses to water stress. *Pathogens*, *10*(8): 991. https://doi.org/10.3390/pathogens10080991

Mares-Quiñones, 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. https://doi.org/10.21273/HORTSCI13451-18

Mc Caughey-Espinoza, D. M., Buitimea-Cantúa, G. V., Buitimea-Cantúa, N. E., Ayala-Astorga, G. I., & Ochoa-Meza, A. (2020). Propiedades fisicoquímicas y rendimiento de frutos de chile chiltepín (Capsicum annuum var. glabriusculum Dunal) cultivados bajo diferentes condiciones de crecimiento. *Idesia*, 38(3): 77-86. https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300077

Mendoza-Alatorre, M., Infante-Ramírez, R., González-Rangel, M. O., Nevárez-Moorillón, G. V., González-Horta, M. C., Hernández-Huerta, J., & Delgado-Gardea, M. C. E. (2024). Enhancing drought stress tolerance and growth promotion in chiltepin pepper (Capsicum annuum var. glabriusculum) through native Bacillus spp. *Scientific Reports*, 14: 15383. https://doi.org/10.1038/s41598-024-65720-y

Rokhminarsi, E., Utami, D. S., & Begananda. (2019). Aplikasi pupuk Mikotricho (Mikoriza-*Trichoderma*) dan pupuk sintetik pada budidaya cabai merah. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, *10*(3): 154–160.

Rueda-Puente, E. O., Murillo-Amador, B., Castellanos-Cervantes, T., García-Hernández, J. L., Tarazón-Herrera, M. A., Moreno-Medina, S., & Gerlach-Barrera, L. E. (2010). Effects of plant growth promoting bacteria and mycorrhizal on Capsicum annuum L. var. aviculare germination under stressing abiotic conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(8): 724-730. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.04.002

Villalón-Mendoza, H., Medina-Martínez, T., & Ramírez-Meráz, M. (2013). Factores de calidad de la semilla de chile silvestre (Capsicum annuum L. var. glabriusculum). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17): 182-187.

Villegas, D. A., Acosta, C. O., & Milla, M. E. (2018). Dinámica de crecimiento de plantas de pimentón (*Capsicum annuum* L.) sometidas a la aplicación de *Trichoderma harzianum* Rifai en ambientes controlados. *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable, 2*(1): 21–27. https://doi.org/10.25127/aps.20181.380

Quitosano como bioproducto agrícola: propiedades, obtención y aplicaciones en cultivos

José Lázaro Francés Mesa[42]

Resumen

El quitosano es un biopolímero biodegradable con doble funcionalidad como bioestimulante del crecimiento vegetal y agente antimicrobiano, ofreciendo una alternativa sostenible a los agroquímicos sintéticos. Esta revisión analiza sistemáticamente la investigación del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) de Cuba sobre la obtención, caracterización y aplicaciones agrícolas del quitosano. Se revisaron trece artículos originales (2000-2021) que abarcan estudios de laboratorio, invernadero y campo en arroz, tomate, pimiento, pepino y maíz. El método de obtención a baja temperatura desarrollado por el INCA produce quitosano con alta masa molecular y actividad biológica comparable a estándares comerciales. *In vitro*, el quitosano inhibe el crecimiento micelial de *Pyricularia grisea*, *Bipolaris oryzae* y *Curvularia lunata* de forma dependiente de la concentración, aunque el quitosano de baja masa molecular puede estimular la esporulación como respuesta al estrés. La aplicación foliar o en semillas de QuitoMax/Quitomax a 300-400 $mg \cdot ha^{-1}$ incrementa significativamente el rendimiento, la calidad del fruto (sólidos solubles, vitamina C, carotenoides, actividad antioxidante) y reduce la incidencia de enfermedades (como mildiú velloso en pepino) por debajo de los niveles alcanzados con fungicidas convencionales. La evidencia confirma que el quitosano producido por el INCA es una alternativa viable, efectiva y sostenible para reducir la dependencia de agroquímicos sintéticos, manteniendo o mejorando la productividad de los cultivos.

Palabras clave: Quitosano; bioestimulante; actividad antifúngica; QuitoMax; INCA

Abstract

Chitosan is a biodegradable biopolymer with dual functionality as a plant growth biostimulant and antimicrobial agent, offering a sustainable alternative to synthetic agrochemicals. This review systematically analyzes the research conducted by the National Institute of Agricultural Sciences (INCA) of Cuba on chitosan obtainment, characterization, and agricultural applications. Thirteen original articles (2000-2021) covering laboratory,

[42] Facultad de Biología de la Universidad de La Habana, La Habana, Cuba; Grupo de Farmacogenómica de la Dirección de Investigaciones Biomédicas del Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología, La Habana, Cuba ORCID: 0009-0000-8303-6022; Email: joselazarofrancesmesa@gmail.com

greenhouse, and field studies on rice, tomato, pepper, cucumber, and maize were reviewed. The low-temperature method developed by INCA produces chitosan with high molecular mass and biological activity comparable to commercial standards. In vitro, chitosan inhibits mycelial growth of *Pyricularia grisea*, *Bipolaris oryzae*, and *Curvularia lunata* in a concentration-dependent manner, although low-molecular-weight chitosan may stimulate sporulation as a stress response. Foliar or seed applications of QuitoMax/Quitomax at 300-400 mg·ha^{-1} significantly increase yield, fruit quality (soluble solids, vitamin C, carotenoids, antioxidant activity), and reduce disease incidence (e.g., downy mildew in cucumber) below levels achieved with conventional fungicides. The evidence confirms that INCA-produced chitosan is an effective, viable, and sustainable alternative for reducing reliance on synthetic agrochemicals while maintaining or improving crop productivity.

Key words: Chitosan; biostimulant; antifungal activity; QuitoMax; INCA

Introducción

El aumento de la población mundial y la necesidad de producir alimentos de forma intensiva han llevado a un uso excesivo de agroquímicos sintéticos, lo que genera contaminación ambiental, deterioro de los suelos y riesgos para la salud humana (Rodríguez-Pedroso et al., 2009; Ramírez et al., 2010). Por ello, la búsqueda de alternativas compatibles con el medio ambiente se ha convertido en una prioridad de la investigación agrícola (Rodríguez-Pedroso et al., 2021a).

Entre las opciones más promisorias se encuentra el quitosano, un biopolímero lineal compuesto por unidades de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces β(1→4) (Rodríguez-Pedroso et al., 2009). Se obtiene por desacetilación alcalina de la quitina, el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza después de la celulosa, presente en el exoesqueleto de crustáceos, la pared celular de hongos y la cutícula de insectos (Ramírez et al., 2010; Rodríguez-Pedroso et al., 2021a).

El quitosano posee propiedades fisicoquímicas singulares: un alto contenido de nitrógeno (superior al 7%) y grupos amino libres que se protonan en medio ácido, lo que le confiere un carácter policatiónico (Rodríguez-Pedroso et al., 2009). Esto explica su capacidad para interactuar con membranas celulares cargadas negativamente, formar complejos con metales traza y actuar como floculante y adherente (Ramírez et al., 2010). Su actividad biológica depende del grado de desacetilación y de la masa molecular, estableciéndose que un grado de desacetilación superior al 60% es necesario para considerarlo quitosana (Ramírez et al., 2000; Rodríguez-Pedroso et al., 2021a).

El quitosano ha demostrado actividad contra un amplio espectro de microorganismos fitopatógenos, incluyendo hongos, bacterias y virus, así como la capacidad de inducir mecanismos de defensa en las plantas (Rodríguez-Pedroso et al., 2009, 2021a). Además, actúa como bioestimulante del crecimiento vegetal, mejorando la germinación, el desarrollo radicular y el rendimiento de los cultivos (Reyes-Pérez et al., 2018, 2019; Torres-Rodríguez et al., 2018). Estas propiedades lo convierten en una herramienta valiosa para la agricultura sostenible (Ramírez et al., 2010; Henríquez-Díaz et al., 2020).

En Cuba, el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) ha desarrollado una línea de investigación sistemática sobre este biopolímero desde finales de los años 90, aprovechando los subproductos de la industria langostera nacional (Ramírez et al., 2000). Esta revisión tiene como objetivo integrar y analizar los hallazgos generados por estos investigadores, abarcando desde la obtención del quitosano hasta su evaluación en campo. La revisión se organiza en tres grandes apartados: obtención y caracterización del quitosano, actividad antifúngica in vitro, y aplicaciones agronómicas de las formulaciones QuitoMax/Quitomax, seguidos de una discusión crítica y perspectivas futuras.

Materiales y métodos

La presente revisión se basa exclusivamente en artículos originales publicados por investigadores del INCA y sus colaboradores en el período 2000-2021. Los documentos fueron seleccionados de un acervo proporcionado para este fin, que incluye trabajos indexados en bases de datos como Redalyc, SciELO y revistas especializadas como Cultivos Tropicales, Ciencia e Investigación Agraria, Biotecnología Aplicada y Terra Latinoamericana. Los criterios de inclusión fueron: (a) estudios que abordaran la obtención, caracterización o aplicación agrícola del quitosano o sus derivados, (b) investigaciones originales con datos cuantitativos, y (c) trabajos donde al menos un autor perteneciera al INCA. Se excluyeron editoriales y resúmenes de congresos sin datos completos. La extracción de temas principales se realizó mediante análisis temático, identificando tres ejes centrales: métodos de obtención, actividad antifúngica in vitro, y evaluación agronómica de formulaciones bioactivas.

Resultados y discusión

Uno de los aportes fundamentales de la investigación del INCA ha sido el desarrollo de un método de obtención de quitosana en condiciones homogéneas y a bajas temperaturas, lo que representa una ventaja tecnológica significativa sobre los métodos convencionales que requieren temperaturas superiores a 100°C y reactores cerrados con atmósferas inertes (Ramírez et al., 2000).

El estudio sistemático de las variables de reacción —proporción álcali/quitina (140 o 210 mL de NaOH al 50% por 10 g de quitina), temperatura (30 o 40°C) y tiempo (3 a 7 días)— permitió identificar las condiciones óptimas para maximizar la solubilidad del producto en ácido acético (indicador de la conversión a quitosana) y preservar la masa molecular del polímero. Los resultados demostraron que la proporción álcali/quitina fue la variable con mayor influencia en la desacetilación, seguida por la temperatura. La combinación de 140 $mL \cdot 10\ g^{-1}$, 30°C y seis días de reacción produjo una quitosana completamente soluble (100% en ácido acético al 1%) con la mayor viscosidad específica, lo que indica una elevada masa molecular (Ramírez et al., 2000).

La quitosana obtenida por este método (denominada "quitosana INCA") presentó características de calidad (color blanco, contenido de cenizas 0.80%, proteínas residuales 0.08%) comparables a las de la quitosana comercial Sigma, aunque con un grado de desacetilación inferior (61% vs 90%). A pesar de esta diferencia, la actividad antifúngica frente a *Fusarium oxysporum* var. *lycopersici* fue similar entre ambos productos y significativamente superior al control, lo que sugiere que incluso grados de desacetilación moderados pueden ser biológicamente efectivos (Ramírez et al., 2000).
Este método de obtención ha sido posteriormente referenciado como base para la producción de quitosano con fines agrícolas en Cuba, permitiendo el uso de reactores de bajo costo y condiciones de equipamiento sencillas (Ramírez et al., 2010).

Actividad antifúngica *in vitro* del quitosano sobre patógenos de cultivos
La capacidad del quitosano para inhibir el crecimiento de hongos fitopatógenos ha sido ampliamente documentada por los investigadores del INCA, abarcando patógenos clave del arroz, tomate y otros cultivos.
En estudios pioneros, Rodríguez-Pedroso et al. (2003) demostraron que el quitosano y sus oligómeros, a una concentración de 1000 $mg \cdot L^{-1}$ y pH 5.6, inhibieron totalmente el crecimiento micelial de *Pyricularia grisea* (teleomorfo *Magnaporthe oryzae*), el hongo causante de la piriculariosis, una de las enfermedades más destructivas del arroz a nivel mundial. Sin embargo, cuando el pH del medio se elevó a 6.0, la inhibición del crecimiento fue solo parcial, aunque la esporulación se mantuvo completamente suprimida (Cárdenas et al., 2004, citado en Rodríguez-Pedroso et al., 2021). Este comportamiento se atribuye a la protonación de los grupos amino del quitosano, que a pH ácido adquieren carga positiva y pueden interactuar electrostáticamente con las superficies celulares fúngicas.

Más allá del efecto directo, Rodríguez-Pedroso et al. (2007) evaluaron el tratamiento de semillas de arroz con quitosano ($500\ mg \cdot L^{-1}$) y observaron, además de protección contra P. grisea, un incremento en la actividad de enzimas relacionadas con la defensa, como

fenilalanina amonio liasa (PAL), glucanasa, quitinasa y quitosanasa. Las plantas tratadas no mostraron síntomas de la enfermedad a las concentraciones más elevadas, lo que evidencia el doble mecanismo de acción del quitosano: fungicida directo e inductor de resistencia sistémica.

Bipolaris oryzae afecta severamente el cultivo del arroz, formando parte del complejo de hongos causantes del manchado del grano. Rodríguez-Pedroso et al. (2021b) evaluaron el efecto de un quitosano de masa molecular media (152.6 kDa, 90% de desacetilación) sobre dos cepas del hongo aisladas en México y Cuba. Los resultados mostraron que el porcentaje de inhibición del crecimiento radial aumentaba con la concentración del biopolímero (1, 3 y 4 $g \cdot L^{-1}$), alcanzando el 100% de inhibición para la cepa cubana a 4 $g \cdot L^{-1}$, mientras que para la cepa mexicana la inhibición máxima fue del 88%, sugiriendo diferencias en la sensibilidad entre cepas. El análisis morfométrico reveló que el quitosano incrementó el diámetro promedio de las hifas (de 37.06 µm en control a 65.61 µm en la concentración más alta para la cepa mexicana) y provocó deformaciones evidentes observadas por microscopía electrónica de barrido, con hifas deshidratadas, corrugadas y acortadas (Rodríguez-Pedroso et al., 2021b).

Resultados concordantes fueron reportados por Rodríguez-Pedroso et al. (2016), quienes encontraron que quitosanos de diferentes masas moleculares inhibían el crecimiento de *Bipolaris oryzae* de manera dependiente de la concentración, con una respuesta más pronunciada para el quitosano de masa molecular media.

Curvularia lunata es otro hongo integrante del complejo del manchado del grano en arroz. Valle-Fernández et al. (2021) evaluaron quitosanos de baja (121.6 kDa), media (152.6 kDa) y alta masa molecular (211.6 kDa) a concentraciones de 1, 2 y 3 $g \cdot L^{-1}$. En todos los casos, el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial aumentó significativamente con la concentración, siendo 3 $g \cdot L^{-1}$ la dosis más efectiva. Un hallazgo particularmente interesante fue que el quitosano de baja masa molecular a 3 $g \cdot L^{-1}$ estimuló una alta producción de esporas, aunque las esporas generadas mantuvieron su capacidad germinativa. Este fenómeno, también observado por otros autores (Bautista-Baños et al., 2004, citado en Valle-Fernández et al., 2021), podría interpretarse como una respuesta de estrés del hongo ante la presencia del compuesto, que induce la esporulación como mecanismo de supervivencia. Sin embargo, la germinación de las esporas se vio retardada en presencia de quitosano, lo que sugiere que el biopolímero afecta más la fase de establecimiento que la producción de estructuras reproductivas.

Integrando los hallazgos de múltiples estudios, Rodríguez-Pedroso et al. (2009, 2021a) proponen que la actividad antifúngica del quitosano se ejerce a través de varios mecanismos no excluyentes: (a) interacción electrostática entre los grupos amino protonados del

quitosano y los residuos cargados negativamente de la membrana plasmática fúngica, lo que altera la permeabilidad y provoca la salida de componentes intracelulares; (b) penetración del quitosano al núcleo fúngico, donde puede unirse al ADN e inhibir la síntesis de ARNm y proteínas; (c) acción quelante sobre metales traza esenciales para el crecimiento del hongo; y (d) en el caso de aplicaciones a plantas, inducción de respuestas defensivas que incluyen la activación de enzimas hidrolíticas (quitinasa, glucanasa) y la síntesis de fitoalexinas.

Evaluación agronómica de formulaciones de quitosano: QuitoMax y Quitomax

A partir del quitosano obtenido por el método desarrollado en el INCA, se han formulado productos comerciales como QuitoMax (o Quitomax), una solución líquida que contiene 4 $g \cdot L^{-1}$ de quitosano, 0.5% de ácido acético y 0.07% de iones potasio. Estos productos han sido evaluados en diversos cultivos bajo condiciones de invernadero y campo.

Reyes-Pérez et al. (2018) evaluaron la aplicación foliar de QuitoMax en plantas de tomate var. Pomodoro a concentraciones de 100, 200, 300 y 400 $mg \cdot ha^{-1}$. Los resultados mostraron que las concentraciones más elevadas (300 y 400 $mg \cdot ha^{-1}$) produjeron plantas significativamente más altas (45.3-45.6 cm vs 42.3 cm del control) y con mayor grosor del tallo (15.6-17.6 mm vs 13.3 mm del control). Además, estas dosis prolongaron la duración de las fases fenológicas, especialmente desde la germinación masiva hasta la floración masiva, y extendieron el ciclo agronómico total de 102 días (control) a 114-120 días.

En términos productivos, las plantas tratadas con 300 y 400 $mg \cdot ha^{-1}$ presentaron un mayor número de racimos por planta (7.4-9.1 vs 3.8), más frutos por racimo (8.4-10.2 vs 5.6), mayores diámetros polar y ecuatorial del fruto, mayor masa fresca del fruto (132-135 g vs 120 g) y un rendimiento significativamente superior (42.25-47.38 $kg \cdot m^{-2}$ vs 32.6 $kg \cdot m^{-2}$). La calidad del fruto también mejoró, con un aumento del contenido de sólidos solubles totales (6.2-6.4% vs 4.4% en control) y una tendencia a la disminución de la acidez, lo que favorece el sabor y la aceptación por el consumidor. Los frutos de plantas tratadas con 400 $mg \cdot ha^{-1}$ alcanzaron la mayor masa de frutos de primera y segunda calidad (Reyes-Pérez et al., 2018).

En el cultivo de pimiento var. Lical, Reyes-Pérez et al. (2019) aplicaron Quitomax a 200, 300 y 400 $mg \cdot ha^{-1}$ mediante aspersión foliar. La dosis de 300 $mg \cdot ha^{-1}$ resultó ser la más efectiva, incrementando el número de frutos por planta (18.7 vs 11.9 en control), la longitud del fruto (4.20 cm vs 3.20 cm), el diámetro (6.80 mm vs 4.24 mm), la masa fresca del fruto (81.3 g vs 46.5 g) y el rendimiento (24.0 $t \cdot ha^{-1}$ vs 15.0 $t \cdot ha^{-1}$). Un aspecto novedoso de este estudio fue la evaluación de la calidad nutricional: la dosis de 300 $mg \cdot ha^{-1}$ aumentó significativamente el contenido de vitamina C (381 g vs 316 g), carotenoides (11.0 vs 7.70), polifenoles (4.19 vs 3.31) y la actividad antioxidante (1.58 vs 1.40) en comparación con el control. La dosis de 400 $mg \cdot ha^{-1}$, aunque también superó al control, mostró valores inferiores

a los de 300 mg·ha⁻¹, lo que sugiere un efecto óptimo con un umbral más allá del cual los mecanismos de defensa inducidos podrían desviar recursos del crecimiento y la calidad (Reyes-Pérez et al., 2019).

Henríquez-Díaz et al. (2020) evaluaron el efecto de Quitomax en el control de *Pseudoperonospora cubensis*, agente causal del mildiú velloso en pepino cultivado en condiciones protegidas. Se aplicaron dosis de 300, 500 y 1000 mg·ha⁻¹ a los 15 y/o 40 días después del trasplante, comparándolas con el fungicida químico Verita® (fenamidona + fosetil aluminio). La dosis de 1000 mg·ha⁻¹ aplicada en ambos momentos redujo la incidencia de la enfermedad al 31.8% a los 60 días, frente al 84.5% del control químico. La severidad también fue significativamente menor (1.3 vs 10.5). El rendimiento en el tratamiento con Quitomax (1000 mg·ha⁻¹) alcanzó 90.5 t·ha⁻¹, superando las 77.7 t·ha⁻¹ del fungicida químico, y la proporción de frutos de primera calidad fue notablemente mayor (2265.5 kg vs 1779.2 kg). Los autores atribuyen este efecto a la formación de una película semipermeable sobre las hojas, que dificulta la infección, y a la inducción de respuestas defensivas sistémicas.

Torres-Rodríguez et al. (2018) compararon el tratamiento de semillas de maíz blanco (variedades Chuco y Cariaco) con QuitoMax, Azofert (biofertilizante con rizobios) y Ecomic (inoculante micorrízico). El QuitoMax (semillas embebidas en solución 1 g·L⁻¹) produjo los mejores resultados en ambas variedades, superando incluso a los biofertilizantes específicos. En la variedad Cariaco, el rendimiento con QuitoMax fue de 3.2 t·ha⁻¹, frente a 2.05 t·ha⁻¹ del control, 2.37 t·ha⁻¹ con Azofert y 2.36 t·ha⁻¹ con Ecomic. Este resultado sugiere que el efecto bioestimulante del quitosano puede ser superior al de inóculos microbianos específicos en condiciones de campo, posiblemente por su acción directa sobre el metabolismo vegetal y su efecto indirecto sobre la microbiota rizosférica.

Aunque los artículos proporcionados mencionan estudios en frijol (*Phaseolus vulgaris*) y papa (*Solanum tuberosum*) realizados por Morales et al. (2015, 2016), estos trabajos son referidos en las revisiones, pero no se incluyen como documentos completos en el acervo. No obstante, los autores de las revisiones (Rodríguez-Pedroso et al., 2021a; Ramírez et al., 2010) confirman que la aplicación de QuitoMax estimuló el crecimiento y el rendimiento de ambos cultivos, con dosis óptimas que variaron según la especie (150-200 mg·ha⁻¹ para papa y frijol).

Conclusiones

La revisión sistemática de la investigación del INCA sobre quitosano permite afirmar que se ha desarrollado un método propio de obtención a baja temperatura que produce un biopolímero con alta masa molecular y actividad biológica comparable a estándares

comerciales, utilizando residuos de la industria langostera cubana. Este quitosano ejerce una doble funcionalidad: actúa como agente antifúngico directo frente a patógenos del arroz (*P. grisea*, *B. oryzae*, *C. lunata*) e induce respuestas defensivas en las plantas, como lo demuestran el aumento de enzimas relacionadas con la defensa. Las formulaciones QuitoMax/Quitomax, aplicadas en dosis de 300-400 $mg \cdot ha^{-1}$, incrementan significativamente el rendimiento y la calidad nutricional de tomate, pimiento y pepino, y reducen la incidencia de enfermedades como el mildiú velloso por debajo de los niveles alcanzados con fungicidas químicos convencionales. Además, mejoran el rendimiento del maíz blanco incluso en comparación con biofertilizantes específicos. Estos resultados respaldan que el quitosano de origen cubano puede contribuir a una agricultura más sostenible, reduciendo la dependencia de agroquímicos sintéticos sin sacrificar la productividad.

Literatura citada

Henríquez-Díaz, F. M., Salgado-Valle, Y., Ramírez-Arrebato, M. Á., Reyes-Pérez, J. J., Rodríguez-Pedroso, A. T., Ruiz-Sánchez, M., & Hernández-Montiel, L. G. (2020). Efecto de Quitomax en el control del mildiú velloso en pepino (Cucumis sativus L.). Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 7(2), e2479. https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2479

Ramírez, M. A., Cabrera, G., Gutiérrez, A., & Rodríguez, T. (2000). Metodología de obtención de quitosana a bajas temperaturas a partir de quitina de langosta. Cultivos Tropicales, 21(1), 81-84.

Ramírez, M. A., Rodríguez, A. T., Alfonso, L., & Peniche, C. (2010). La quitina y sus derivados, biopolímeros con potencialidades de aplicación agrícola. Biotecnología Aplicada, 27(4), 270-276.

Reyes-Pérez, J. J., Enríquez-Acosta, E. A., Murillo-Amador, B., Ramírez-Arrebato, M. A., Rodríguez-Pedroso, A. T., Lara-Capistrán, L., & Hernández-Montiel, L. G. (2018). Physiological, phenological and productive responses of tomato (Solanum lycopersicum L.) plants treated with QuitoMax. Ciencia e Investigación Agraria, 45(2), 120-127. https://doi.org/10.7764/rcia.v45i2.1943

Reyes-Pérez, J. J., Enríquez-Acosta, E. A., Ramírez-Arrebato, M. Á., Rodríguez-Pedroso, A. T., Lara-Capistrán, L., & Hernández-Montiel, L. G. (2019). Evaluation of the growth, yield

and nutritional quality of pepper fruit with the application of Quitomax®. Ciencia e Investigación Agraria, 46(1), 23-29.

Reyes-Pérez, J. J., Ramos-Remache, R. A., Llerena-Ramos, L. T., Ramírez-Arrebato, M. Á., & Falcón-Rodríguez, A. B. (2021). Oligogalacturónidos y quitosacáridos en el enraizamiento vegetal. Terra Latinoamericana, 39, e846.

Rodríguez-Pedroso, A. T., Ramírez, M. A., Nápoles, M. C., Márquez, R., & Cárdenas, R. M. (2003). Antifungal activity of chitosan and one of its hydrolyzates on Pyricularia grisea, Sacc. fungus. Cultivos Tropicales, 24(2), 85-88.

Rodríguez-Pedroso, A. T., Ramírez, M. A., Cárdenas, R. M., Hernández, A. N., Velázquez, M. G., & Bautista, S. (2007). Induction of defense response of Oryza sativa L. against Pyricularia grisea (Cooke) Sacc. by treating seeds with chitosan and hydrolyzed chitosan. Pesticide Biochemistry and Physiology, 89(3), 206-215. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2007.06.007

Rodríguez-Pedroso, A. T., Ramírez-Arrebato, M. A., Rivero-González, D., Bosquez-Molina, E., Barrera-Necha, L. L., & Bautista-Baños, S. (2009). Propiedades químico-estructurales y actividad biológica de la quitosana en microorganismos fitopatógenos. Revista Chapingo Serie Horticultura, 15(3), 307-317.

Rodríguez-Pedroso, A. T., Plascencia-Jatomea, M., Bautista-Baños, S., Cortez Rocha, M. O., & Ramírez Arrebato, M. Á. (2016). Actividad antifúngica in vitro de quitosanos sobre Bipolaris oryzae patógeno del arroz. Acta Agronómica, 65(1), 98-103. https://doi.org/10.15446/acag.v65n1.44945

Rodríguez-Pedroso, A. T., Bautista-Baños, S., Ramírez-Arrebato, M. Á., Plascencia-Jatomea, M., & Hernández-Ferrer, L. (2021a). Quitosano y sus derivados, polímeros naturales con potencial para controlar Pyricularia oryzae (Cav.). Cultivos Tropicales, 42(4), e15.

Rodríguez-Pedroso, A. T., Plasencia-Jatomea, M., Bautista-Baños, S., Ventura-Zapata, E., Cortez-Rocha, M. O., & Ramírez Arrebato, M. Á. (2021b). Efecto in vitro de un quitosano de masa molecular media sobre dos cepas de Bipolaris oryzae aisladas en México y Cuba. Biotecnología Aplicada, 38(2), 2201-2205.

Torres-Rodríguez, J. A., Reyes-Pérez, J. J., González-Gómez, L. G., Jiménez-Pizarro, M., Boicet-Fabre, T., Enríquez-Acosta, E. A., Rodríguez-Pedroso, A. T., Ramírez-Arrebato, M. Á., & González-Rodríguez, J. C. (2018). Respuesta agronómica de dos variedades de maíz blanco (Zea mays L.) a la aplicación de Quitomax, Azofert y Ecomic. Biotecnia, 20(1), 3-7.

Valle-Fernández, Y., Rodríguez-Pedroso, A. T., Ramírez-Arrebato, M. A., Reyes-Pérez, J. J., Hernández-Montiel, L. G., & Cruz Pérez, R. (2021). Effect of chitosan of different molecular masses on the fungus Curvularia lunata. Biotecnología Aplicada, 38(4), 4221-4224.

Respuesta agronómica de tres genotipos de *Amaranthus* spp. a la bioestimulación con quitosano y ácido húmico al inicio de la fase reproductiva

Pablo Balderrama-Jiménez[43], José Bernardo Nieto-Flores[44]

Resumen

La respuesta agronómica del amaranto (*Amaranthus spp.*) a la aplicación de bioestimulantes depende del genotipo y del estado fenológico del cultivo; sin embargo, existe información limitada sobre su efecto cuando se aplican al inicio de la fase reproductiva. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta agronómica de tres genotipos de *Amaranthus spp.* (Bledo, Diego y PQ2) a la bioestimulación con quitosano y ácido húmico aplicada al inicio de dicha etapa. El experimento se estableció durante el ciclo agrícola 2024 en el Campo Experimental San Martín M-13 de la Universidad Autónoma Chapingo, bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 × 5 y tres repeticiones. Se evaluaron cinco tratamientos de bioestimulación mediante las variables altura de planta, altura de panoja, diámetro del tallo y número de hojas. El análisis de varianza mostró que los bioestimulantes no produjeron diferencias significativas ($P > 0.05$) en las variables evaluadas; sin embargo, se observaron tendencias de incremento en la altura de planta y la longitud de la panoja con las dosis más altas, particularmente en el genotipo PQ2. Se concluye que la aplicación de quitosano y ácido húmico al inicio de la fase reproductiva limita la expresión de sus efectos sobre el crecimiento vegetativo y que la respuesta agronómica depende de la interacción entre el genotipo y el momento de aplicación, aportando información para optimizar el uso de bioestimulantes en el cultivo de amaranto.

Palabras clave: *Amaranthus spp.*, bioestimulantes, estado fenológico, crecimiento vegetativo, quitosano.

Abstract

The agronomic response of amaranth (*Amaranthus spp.*) to the application of biostimulants depends on both genotype and crop phenological stage; however, information regarding their effects when applied at the onset of the reproductive stage remains limited. The objective of this study was to evaluate the agronomic response of three *Amaranthus spp.* genotypes (Bledo, Diego, and PQ2) to foliar application of chitosan and humic acid at the beginning of

[43] Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México–Texcoco, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México. al20101901@chapingo.mx.
[44] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México–Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56264, México. nieto.bernardo@colpos.mx

the reproductive stage. The experiment was conducted during the 2024 growing season at the San Martín M-13 Experimental Field of Universidad Autónoma Chapingo under a completely randomized 3 × 5 factorial design with three replications. Five biostimulant treatments were evaluated using plant height, panicle length, stem diameter, and number of leaves as agronomic variables. Analysis of variance showed that the biostimulants did not produce significant differences ($P > 0.05$) in any of the evaluated variables; however, increasing trends in plant height and panicle length were observed at the highest application rates, particularly in genotype PQ2. It is concluded that the application of chitosan and humic acid at the onset of the reproductive stage limits the expression of their effects on vegetative growth and that the agronomic response depends on the interaction between genotype and application timing, providing useful information for optimizing the use of biostimulants in amaranth cultivation.

Keywords: *Amaranthus spp.*, biostimulants, phenological stage, vegetative growth, chitosan.

Introducción

El amaranto (*Amaranthus* spp.) es un pseudocereal de creciente importancia debido a su elevado valor nutricional, su capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales y su potencial para contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles (Caselato-Sousa y Amaya-Farfán, 2012). Entre las estrategias orientadas a mejorar el desempeño fisiológico del cultivo destaca el uso de bioestimulantes, como el quitosano y las sustancias húmicas, los cuales estimulan procesos relacionados con el crecimiento vegetal, la absorción y utilización de nutrimentos, la eficiencia metabólica y la tolerancia al estrés (du Jardin *et al.*, 2020; Canellas *et al.*, 2020; Pichyangkura y Chadchawan, 2015).

No obstante, la respuesta de las plantas a estos compuestos depende de diversos factores, entre ellos el genotipo y el estado fenológico en el momento de su aplicación. En amaranto, aún existe información limitada acerca de la respuesta agronómica de distintos genotipos cuando los bioestimulantes se aplican al inicio de la fase reproductiva, etapa en la que la planta experimenta cambios fisiológicos asociados con la redistribución de fotoasimilados hacia el desarrollo de la inflorescencia. Esta limitación dificulta establecer criterios técnicos para definir el momento de aplicación más adecuado y maximizar la eficiencia de estas tecnologías en el cultivo.

Con base en lo anterior, se planteó la hipótesis de que la respuesta agronómica de los genotipos de *Amaranthus* spp. a la aplicación de quitosano y ácido húmico depende del

estado fenológico del cultivo, de manera que su aplicación al inicio de la fase reproductiva limita la expresión de sus efectos sobre las variables de crecimiento vegetativo.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta agronómica de tres genotipos de *Amaranthus* spp. a la bioestimulación con quitosano y ácido húmico aplicada al inicio de la fase reproductiva.

Materiales y métodos

El estudio se realizó durante el ciclo agrícola 2024 en el Campo Experimental San Martín M-13 del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. El experimento se estableció bajo condiciones de campo con el propósito de evaluar la respuesta agronómica de tres genotipos de Amaranthus spp. (Bledo, Diego y PQ2) a la aplicación foliar de dos bioestimulantes durante el inicio de la fase reproductiva.

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 × 5 y tres repeticiones, para un total de 45 unidades experimentales. El factor A correspondió al genotipo (Bledo, Diego y PQ2), mientras que el factor B estuvo constituido por cinco tratamientos de bioestimulación: quitosano a 125 y 250 mL L^{-1}, ácido húmico a 10 y 20 mL L^{-1} y un testigo sin aplicación. Cada genotipo se dividió en tres parcelas experimentales, correspondientes a las repeticiones, dentro de las cuales se distribuyeron los cinco tratamientos evaluados.

Los bioestimulantes se aplicaron mediante aspersión foliar utilizando una bomba de mochila, iniciando al comienzo de la fase reproductiva y continuando durante el desarrollo de dicha etapa fenológica. El quitosano empleado correspondió a quitosano de bajo peso molecular (*Chitosan, Low Molecular Weight*; Sigma-Aldrich®, Merck KGaA, Darmstadt, Alemania), mientras que el ácido húmico consistió en un lixiviado concentrado de humus de lombriz de origen comercial (Agro Natural®, México).

Las variables agronómicas evaluadas fueron altura de planta (cm), altura de panoja (cm), diámetro del tallo (mm) y número de hojas por planta. La altura de planta se determinó con cinta métrica graduada desde la base hasta el ápice de la planta; la altura de panoja se midió desde el inicio de la inflorescencia principal hasta su extremo superior; el diámetro del tallo se registró mediante un vernier analógico de acero inoxidable, y el número de hojas se obtuvo mediante conteo directo. En cada unidad experimental se evaluaron cinco plantas seleccionadas aleatoriamente.

Los datos obtenidos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) para un arreglo factorial y, cuando correspondió, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con

un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS®).

Resultados y discusión

El análisis de varianza mostró que la aplicación foliar de quitosano y ácido húmico al inicio de la fase reproductiva no produjo diferencias significativas ($P > 0.05$) en la altura de planta, altura de panoja, número de hojas ni diámetro del tallo de los tres genotipos de *Amaranthus spp.* evaluados. No obstante, las medias evidenciaron tendencias consistentes hacia un incremento en la altura de planta y la longitud de la panoja con las dosis más altas de ambos bioestimulantes, particularmente en el genotipo PQ2. Estos resultados indican que, aunque la respuesta agronómica no fue suficiente para alcanzar significancia estadística, existieron diferencias biológicas cuya magnitud estuvo condicionada por el genotipo y el momento de aplicación.

La respuesta observada fue diferente entre los materiales evaluados. El genotipo Bledo presentó el comportamiento más uniforme durante el experimento, con una variabilidad reducida entre repeticiones y una respuesta consistente entre tratamientos. En esta variedad se observaron ligeros incrementos en la altura de planta y la altura de panoja con las dosis más altas de quitosano y ácido húmico; sin embargo, el número de hojas y el diámetro del tallo permanecieron prácticamente sin modificaciones respecto al testigo. Esta respuesta sugiere que Bledo posee una mayor estabilidad fenotípica frente a la aplicación de bioestimulantes, aunque dicha estabilidad también pudo limitar la magnitud de la respuesta observable sobre las variables vegetativas.

En contraste, el genotipo Diego presentó la mayor dispersión entre unidades experimentales. Aun cuando el comportamiento promedio fue similar al registrado en Bledo, la elevada variabilidad incrementó el error experimental y redujo la capacidad del análisis estadístico para detectar diferencias entre tratamientos. Este comportamiento puede asociarse con una mayor plasticidad fenotípica, entendida como la capacidad de un genotipo para expresar distintos niveles de crecimiento bajo condiciones ambientales similares. En consecuencia, el posible efecto fisiológico inducido por los bioestimulantes quedó parcialmente enmascarado por la variación propia del material vegetal.

El genotipo PQ2 mostró las tendencias más consistentes hacia un incremento en la altura de planta y la longitud de la panoja cuando recibió las dosis más altas de ambos bioestimulantes. Aunque estas diferencias tampoco fueron estadísticamente significativas, el patrón observado fue más evidente que el registrado en Bledo y Diego. Este comportamiento sugiere una mayor sensibilidad fisiológica de PQ2 frente a la aplicación de quitosano y ácido húmico, indicando que la respuesta a los bioestimulantes puede depender de las características genéticas propias

de cada material. No obstante, esta respuesta debe interpretarse con cautela, ya que las tendencias observadas requieren ser confirmadas mediante evaluaciones en otras etapas fenológicas y bajo diferentes condiciones ambientales.

Los resultados obtenidos indican que el estado fenológico constituyó el principal factor que condicionó la respuesta agronómica del cultivo. Diversos estudios señalan que los bioestimulantes no actúan como fertilizantes convencionales, sino que estimulan procesos fisiológicos relacionados con la absorción y utilización de nutrimentos, la regulación hormonal, la actividad fotosintética y la tolerancia al estrés, cuya expresión depende del genotipo, el ambiente y la etapa de desarrollo de la planta (du Jardin *et al.,* 2020). En consecuencia, una mejora en la eficiencia fisiológica no necesariamente se refleja en incrementos inmediatos del crecimiento vegetativo cuando el cultivo ha iniciado la transición hacia la reproducción.

Las sustancias húmicas favorecen la activación de H⁺-ATPasas de membrana, estimulan el crecimiento radical, incrementan la disponibilidad y absorción de nutrimentos y participan en la regulación de diversas rutas hormonales relacionadas con el crecimiento vegetal (Canellas *et al.,* 2020). Por su parte, el quitosano actúa como un bioestimulante y elicitor fisiológico capaz de inducir mecanismos antioxidantes, modular la síntesis y señalización de fitohormonas, mejorar la actividad fotosintética y favorecer la adaptación de la planta frente a condiciones de estrés (Pichyangkura y Chadchawan, 2015). Sin embargo, la eficacia de ambos productos depende de que los tejidos vegetativos mantengan una elevada actividad de crecimiento, condición que probablemente ya había disminuido cuando iniciaron las aplicaciones en el presente estudio.

La limitada respuesta de las variables vegetativas puede explicarse mediante la dinámica fisiológica de la relación fuente-sumidero (*source-sink relationship*). Durante la etapa vegetativa, las hojas maduras constituyen las principales fuentes de fotoasimilados, mientras que tallos, hojas jóvenes y raíces funcionan como órganos sumidero en crecimiento. Conforme inicia la fase reproductiva, la inflorescencia incrementa progresivamente su capacidad de demanda y se convierte en el principal sumidero metabólico de la planta. Como consecuencia, una proporción importante de carbohidratos, aminoácidos y otros compuestos derivados de la fotosíntesis es redirigida hacia el desarrollo reproductivo, disminuyendo la disponibilidad de recursos para procesos como la elongación del tallo, la emisión de nuevas hojas o el crecimiento radial. En este sentido, aun cuando el quitosano y el ácido húmico hayan favorecido procesos fisiológicos relacionados con la fotosíntesis o la absorción nutrimental, dichos beneficios probablemente fueron destinados al sostenimiento del desarrollo reproductivo y no al incremento de las variables vegetativas evaluadas (Sharma y Sharma, 2021).

La ausencia de diferencias estadísticas tampoco debe interpretarse como evidencia de que los bioestimulantes fueron ineficaces. En investigaciones sobre bioestimulación vegetal es frecuente que los efectos fisiológicos precedan a las respuestas morfológicas y que su expresión dependa de la intensidad del estímulo, la duración del experimento, las condiciones ambientales y el estado de desarrollo del cultivo (du Jardin *et al.*, 2020). Bajo este enfoque, las tendencias observadas en el presente estudio adquieren relevancia biológica, ya que sugieren que ambos bioestimulantes ejercieron una influencia fisiológica cuya magnitud fue insuficiente para modificar significativamente el crecimiento vegetativo bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Los resultados obtenidos permiten además reconocer la importancia del componente genético en la respuesta a la bioestimulación. Aunque los tres genotipos compartieron un patrón fisiológico semejante, la magnitud de las tendencias observadas fue distinta entre ellos. Bledo destacó por su uniformidad, Diego por su elevada variabilidad y PQ2 por presentar la respuesta biológica más consistente hacia ambos bioestimulantes. Estas diferencias evidencian que la interacción entre genotipo y bioestimulante constituye un aspecto fundamental para optimizar el uso de estas tecnologías en programas de producción de amaranto y coincide con la premisa de que la eficacia de los bioestimulantes depende de la interacción entre el material vegetal y las condiciones de aplicación (du Jardin *et al.*, 2020).

Con respecto a la hipótesis planteada, los resultados indican que la aplicación de quitosano y ácido húmico al inicio de la fase reproductiva no incrementó significativamente las variables agronómicas evaluadas, por lo que la hipótesis de un efecto positivo sobre el crecimiento vegetativo no fue respaldada estadísticamente bajo las condiciones del presente experimento. Sin embargo, las tendencias observadas, particularmente en el genotipo PQ2, permiten inferir que la respuesta a los bioestimulantes estuvo modulada tanto por el estado fenológico como por las características genéticas del material vegetal. En consecuencia, la ausencia de significancia estadística no invalida el potencial agronómico de estos productos, sino que sugiere que su eficiencia puede depender del momento de aplicación y de la interacción específica entre bioestimulante y genotipo.

Desde una perspectiva agronómica, los resultados obtenidos indican que futuras investigaciones deberían evaluar la aplicación de quitosano y ácido húmico desde etapas vegetativas tempranas, cuando los órganos responsables del crecimiento presentan una mayor actividad fisiológica y una mayor capacidad para responder a la bioestimulación. Asimismo, sería conveniente incorporar variables directamente relacionadas con el rendimiento, como longitud y peso de la panoja, rendimiento de grano, biomasa reproductiva, índice de cosecha y calidad fisiológica de la semilla, con el propósito de determinar si los

efectos fisiológicos observados durante la fase reproductiva se reflejan finalmente en una mayor productividad del cultivo.

Conclusión

La aplicación foliar de quitosano y ácido húmico al inicio de la fase reproductiva no modificó significativamente las variables agronómicas evaluadas en los genotipos de *Amaranthus spp.*, lo que demuestra que, bajo las condiciones del presente estudio, este momento fenológico limita la expresión de la respuesta bioestimulante sobre el crecimiento vegetativo.

Asimismo, el estudio evidenció que la respuesta agronómica varía entre genotipos, confirmando que el efecto de los bioestimulantes depende de la interacción entre el material genético y el momento de aplicación. En este sentido, los resultados aportan evidencia para orientar la selección de estrategias de bioestimulación en amaranto y constituyen una base para futuras evaluaciones enfocadas en etapas fenológicas con mayor actividad vegetativa.

Literatura citada

Libros

du Jardin, P., Xu, L., & Geelen, D. (2020). Agricultural functions and action mechanisms of plant biostimulants (PBs). En D. Geelen & L. Xu (Eds.), *The Chemical Biology of Plant Biostimulants* (pp. 1–30). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119357254.ch1

Revistas

Canellas, L. P., Canellas, N. O. A., da S. Irineu, L. E., Olivares, F. L., & Piccolo, A. (2020). Plant chemical priming by humic acids. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 7*, 12. https://doi.org/10.1186/s40538-020-00178-4

Caselato-Sousa, V. M., & Amaya-Farfán, J. (2012). State of knowledge on amaranth grain: A comprehensive review. *Journal of Food Science, 77*(4), R93–R104. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x

Pichyangkura, R., & Chadchawan, S. (2015). Biostimulant activity of chitosan in horticulture. *Scientia Horticulturae, 196*, 49–65. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.031

Sharma, G., & Sharma, P. (2021). Chitosan nanofertilizer boost source activity in plant. *Journal of Plant Nutrition*, *44*(16), 2486–2499. https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1931744

TEMÁTICA 3. NUTRICIÓN VEGETAL, FERTILIZACIÓN Y SUSTRATOS

Aplicación edáfica de fosforo, potasio y magnesio en el crecimiento vegetativo, contenido de clorofila y número de estomas en *Stenocereus pruinosus*

Luis Antonio Olivera Baez[45]

Resumen

Stenocereus pruinosus (Otto Ex Pfeiff) Buxb es una cactácea columnar adaptada a ambientes áridos y semiáridos, caracterizada por su metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), con alta eficiencia en el uso del agua y por su capacidad para mantener procesos fisiológicos estables bajo condiciones ambientales adversas. Presenta un crecimiento vegetativo lento, tejidos especializados para el almacenamiento de agua y una anatomía estomática que favorece la regulación del intercambio gaseoso, lo que le permite tolerar periodos prolongados de sequía. Su fruto se consume fresco y se usa en la elaboración de bebidas, mermeladas y dulces tradicionales, constituye a una fuente de ingreso para productores rurales de estados como Puebla, Oaxaca y Guerrero.

El presente estudio tuvo el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación edáfica de dos distintas dosis de fósforo, potasio y magnesio sobre la pitaya fenotipo rojo (*Stenocereus pruinosus*), con el fin de analizar su influencia en el crecimiento vegetativo, el estado nutrimental de la planta y sus respuestas fisiológicas. Se evaluaron siete tratamientos que incluyeron un testigo sin fertilización y la aplicación individual de P, K y Mg en dosis de 150 g y 200 g por planta. Las variables evaluadas fueron el número de brotes, la altura, el ancho de los brotes, el peso del brote, el contenido de clorofila a y b, carotenoides y la densidad estomática.

Los resultados correspondientes al número de brotes, altura, ancho y peso del brote no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con fertilización y el testigo (Tukey $\alpha \leq = 0.05$). En relación con los pigmentos fotosintéticos, el contenido de clorofila a presentó diferencias significativas, la aplicación de 200 g de K mostró diferencias significativas con las aplicaciones de 200 g de P, 150 g K y 150 g de Mg, pero igual a la aplicación de 150 g de P, 200 g de Mg y del testigo. Por el contrario, la clorofila b y los carotenoides no mostraron diferencias significativas, ya que los contenidos de los tratamientos con fertilización fueron estadísticamente similares al tratamiento testigo (sin fertilización). Asimismo, la aplicación de 200 g de K presentó mayor densidad estomática, mostrando diferencias significativas con respecto al testigo.

[45] Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, al18118383@chapingo.mx

Palabras clave: cladodios, brote, clorofila, carotenoides, densidad estomática, cactáceas.

Abstract

Stenocereus pruinosus (Otto Ex Pfeiff) Buxb is a columnar cactus adapted to arid and semiarid environments, characterized by its Crassulacean acid metabolism (CAM), which allows for highly efficient water use, and by its ability to maintain stable physiological processes under adverse environmental conditions. It exhibits slow vegetative growth, specialized tissues for water storage, and a stomatal anatomy that facilitates the regulation of gas exchange, enabling it to tolerate prolonged periods of drought. Its fruit is consumed fresh and used in the production of beverages, jams, and traditional sweets, serving as a source of income for rural producers in states such as Puebla, Oaxaca, and Guerrero.

The objective of this study was to evaluate the effect of soil application of two different doses of phosphorus, potassium, and magnesium on the red-phenotype pitaya (Stenocereus pruinosus), in order to analyze their influence on vegetative growth, the plant's nutritional status, and its physiological responses. Seven treatments were evaluated, including a control without fertilization and the individual application of P, K, and Mg at doses of 150 g and 200 g per plant. The variables evaluated were the number of shoots, height, shoot width, shoot weight, chlorophyll a and b content, carotenoid content, and stomatal density.

No significant differences were observed between the fertilization treatments and the control in terms of the number of shoots, height, shoot width, and shoot weight (Tukey $\alpha \leq 0.05$). Regarding photosynthetic pigments, chlorophyll a content showed significant differences: the application of 200 g of K differed significantly from the applications of 200 g of P, 150 g of K, and 150 g of Mg, but was similar to the application of 150 g of P, 200 g of Mg, and the control. In contrast, chlorophyll b and carotenoids did not show significant differences, as the levels in the fertilized treatments were statistically similar to those in the control treatment (without fertilization). Furthermore, the application of 200 g of K resulted in higher stomatal density, showing significant differences compared to the control.

Keywords: cladodes, shoot, chlorophyll, carotenoids, stomatal density, cacti.

Introducción

La pitaya (*Stenocereus pruinosus*), conocida también como pitaya de mayo, es una cactácea nativa de México distribuida principalmente en los estados de Oaxaca, Puebla, Veracruz, Guerrero y Chiapas. Su gran importancia radica en su capacidad de adaptarse a condiciones climáticas extremas, como suelos someros, precipitación irregular y altas temperaturas, características de las zonas áridas y semiáridas del país, donde otros cultivos convencionales

no prosperan. Esto la convierte en una alternativa agrícola viable, tanto desde el punto de vista productivo como ecológico y social.

Económicamente, la pitaya representa la principal fuente de ingresos para numerosas familias rurales. Su fruto comestible puede transformarse en jugos, mermeladas, helados, bebidas fermentadas y productos deshidratados, lo que amplía sus posibilidades de comercialización. En 2020, la producción nacional alcanzó las 6,356 toneladas, con un valor de 110 millones de pesos mexicanos, mostrando una tendencia de crecimiento sostenido durante la década 2011-2020, con incrementos anuales promedio del 7.1 % en producción y del 11.4 % en valor económico total. En regiones como la mixteca oaxaqueña y poblana, se estiman producciones de aproximadamente 200 toneladas por municipio, aunque estas cifras varían según condiciones climáticas e incluso sísmicas, ya que los temblores provocan la caída de flores y afectan el rendimiento.

A pesar de su relevancia, el cultivo de la pitaya se ha desarrollado con escaso conocimiento técnico y agronómico. La información científica sobre sus requerimientos nutricionales bajo sistemas de producción intensiva es insuficiente y carece del rigor necesario para establecer protocolos de manejo confiables. Además, dado que las respuestas nutricionales pueden diferir considerablemente entre especies del mismo género, los resultados obtenidos en otras cactáceas no pueden aplicarse directamente a *Stenocereus pruinosus* sin validación experimental previa.

Ante esta problemática, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar la influencia de dos niveles de fósforo, potasio y magnesio incorporados al suelo sobre el desarrollo vegetativo, la nutrición y los procesos fisiológicos de la pitaya. Con ello, se busca generar bases científicas sólidas que orienten a los productores en el manejo nutricional del cultivo, contribuyendo al fortalecimiento de una actividad agrícola que sostiene económicamente a comunidades rurales en regiones con condiciones productivas limitantes.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en el municipio de Santiago Chazumba, Oaxaca, ubicado entre los paralelos 18°03' y 18°18' de latitud norte y meridianos 97°36' y 97°52' de longitud oeste, a una altitud de 1,300 a 2,300 m. La zona presenta suelos predominantemente Regosol, Leptosol y Phaeozem, con temperaturas de 16 a 24 °C y precipitación anual de 600 a 1,000 mm. Se utilizaron plantas de pitayo de cuatro años establecidas en un marco de plantación de 4 × 4 m, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con siete tratamientos y siete repeticiones, totalizando 49 unidades experimentales.

Los tratamientos consistieron en la aplicación edáfica de dos dosis de fósforo (150 y 200 g/planta), potasio (150 y 200 g/planta) y magnesio (150 y 200 g/planta), más un testigo sin fertilización. Las fuentes utilizadas fueron superfosfato triple, sulfato de potasio y sulfato de magnesio, respectivamente. Las aplicaciones se realizaron el 18 de diciembre de 2023 y el 18 de enero de 2024, con riegos semanales de aproximadamente 9 litros por planta durante dos meses tras cada aplicación.

Las variables evaluadas abarcaron aspectos morfológicos y fisiológicos. En cuanto al desarrollo vegetativo, se midieron el número, longitud, ancho y peso de brotes. Para los pigmentos fotosintéticos, se determinaron clorofila a, clorofila b y carotenoides totales mediante espectrofotometría con el método de Lichtenthaler (1987), utilizando acetona como solvente de extracción. La densidad estomática se evaluó mediante impresiones epidérmicas observadas con microscopio óptico a 40X.
El análisis estadístico se efectuó mediante análisis de varianza con un nivel de significancia del 5 %, y la comparación de medias entre tratamientos se realizó con la prueba de Tukey al mismo nivel de significancia, empleando el software estadístico SAS versión 9.4. Este diseño metodológico permitió evaluar de manera integral el efecto de los nutrimentos aplicados sobre el crecimiento, la fisiología y la nutrición de la pitaya bajo condiciones controladas de campo y laboratorio.

Resultados y discusión
El análisis de las variables morfológicas de los brotes de *Stenocereus pruinosus* mediante la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) no reveló diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para ninguna de las cuatro variables evaluadas: número, altura, ancho y peso de brotes. No obstante, se observaron diferencias numéricas biológicamente relevantes. La aplicación de 200 g de K produjo el mayor número de brotes (3.00), superando al testigo en un 110 %. En altura, el testigo registró el valor más alto con 8.78 cm, mientras que 200 g de P obtuvo el menor con 5.14 cm, una diferencia del 70.8 %. Para el ancho, 200 g de Mg presentó el mayor valor (7.09 cm) frente a 4.78 cm con 200 g de P, representando un 48.2 % de diferencia. En cuanto al peso, el testigo superó ampliamente a los tratamientos fertilizados con 185.71 g, mientras que 200 g de Mg registró el menor peso con 73.13 g, una diferencia del 153.95 %. Este comportamiento homogéneo podría explicarse por la capacidad de las especies CAM para mantener tasas de crecimiento estables ante variaciones nutrimentales.

En las variables fisiológicas, el contenido de clorofila a mostró diferencias estadísticamente significativas, donde los tratamientos con 200 g de P, 150 g de K y 150 g de Mg presentaron los mayores valores, siendo superiores al tratamiento con 200 g de K, que registró el menor contenido. La diferencia entre tratamientos extremos representó un incremento del 32.8 %,

lo cual es relevante fisiológicamente dado el papel central de este pigmento en la captura de energía lumínica. Por su parte, la clorofila b y los carotenoides totales no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, aunque 150 g de K presentó el mayor contenido de clorofila b con una diferencia del 66 % respecto a 200 g de K, y 150 g de Mg registró el mayor contenido de carotenoides frente a 200 g de K con un 30.3 % de diferencia.

Conclusiones

La densidad estomática fue la variable con mayor capacidad discriminante, mostrando diferencias estadísticamente significativas. La aplicación de 200 g de K indujo la mayor densidad con 20.63 estomas/mm², mientras que el testigo registró la menor con 8.14 estomas/mm², representando una diferencia del 153 %. Estos resultados sugieren que el potasio favorece el desarrollo estomático, lo que podría implicar mayor capacidad de intercambio gaseoso y eficiencia fotosintética en la especie estudiada.

La aplicación de 200 g de potasio por planta incrementó la densidad estomática en un 153 % respecto al testigo, y también duplicó el número de brotes, evidenciando un efecto positivo en el crecimiento vegetativo de *Stenocereus pruinosus*.

La aplicación de 150 g de fósforo resultó en una mayor acumulación de biomasa en brotes, superando a la dosis más alta evaluada. Esto indica que una aplicación excesiva de fósforo puede disminuir la acumulación de biomasa en plantas de pitaya, sugiriendo que existe un umbral óptimo de este nutriente más allá del cual su efecto se torna negativo.

El contenido de clorofila a aumentó con la aplicación de 200 g de P/planta, 150 g de K/planta y 150 g de Mg/planta, mientras que clorofila b y carotenoides permanecieron estables en los distintos tratamientos, lo que indica que estos pigmentos accesorios no responden de manera diferencial a las dosis de nutrimentos evaluadas bajo las condiciones del experimento.

La aplicación de 150 g de P/planta obtuvo los mayores contenidos de nitrógeno, calcio y magnesio en los cladodios. Por su parte, la aplicación de 200 g de Mg/planta incrementó el contenido nutrimental de nitrógeno y zinc, mientras que la aplicación de 150 g de K/planta aumentó el fósforo en los cladodios, evidenciando interacciones entre los nutrimentos aplicados y la absorción de otros elementos esenciales para el desarrollo de la planta.

Literatura citada

Abrahão, A., Lambers, H., Sawaya, A. C. H. F., Mazzafera, P., Oliveira, R. S., & Oliveira, R. S. (2014). Convergence of a specialized root trait in plants from nutrient-impoverished soils: Phosphorus-acquisition strategy in a nonmycorrhizal cactus. *Oecologia,* 176(2), 345–355. https://doi.org/10.1007/s00442-014-3033-4

Ahmed, N., Zhang, B., Bozdar, B., Chachar, S., Rai, M., Li, J., & Tu, P. (2023). The power of magnesium: Unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. Frontiers in Plant Science, 14. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1285512

Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition (2nd ed.). International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association.

Andrade, J. L., de la Barrera, E., Reyes, C., Ricalde, M. F., Vargas, G., & Cervera, J. C. (2007). El metabolismo ácido de las crasuláceas: Diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Boletín de la Sociedad Botánica de México, 81*, 37–50. https://doi.org/10.17129/botsci.1764

Arias, S. & Aquino, D. (2019). Familia Cactaceae I. En Flora del Bajío y de regiones adyacentes (Fascículo 209). *Instituto de Ecología A.C., Centro Regional del Bajío*. http://inecolbajio.inecol.mx/floradelbajio/

Arreola-Nava, H. J., & Terrazas, T. (2003). Especies de *Stenocereus* con aréolas morenas: Clave y descripciones. *Acta Botanica Mexicana, 64*, 1–18. https://doi.org/10.21829/abm64.2003.923 41

Arreola, H. 2017. Stenocereus pruinosus (amended version of 2013 assessment). *The IUCN Red List of Threatened Species* 2017. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T152139A121580469.en.

Bárcenas-Argüello, M. L., Terrazas, T., & Arias, S. (2014). Trichomes with crystals in the Cephalocereus Pfeiff. areoles. *Botanical Sciences*, 92(3), 335–342. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982014000300002&lng=es&tlng=en.

Bastian. C. O. A. (2021). Estadísticas de producción de pitaya en México. *Blog Agricultura*. SADER-DGSIAP.

Bhandal, I.S. & Malik, C.P. (1988) Potassium Estimation, Uptake, and Its Role in the Physiology and Metabolism of Flowering Plant. *International Review of Cytology,* 110, 205-254. https://doi.org/10.1016/S0074-7696(08)61851-3

Blanco-Valenzuela, G., Calderón, K., Ochoa-Meza, A., Penalba-Garmendia, M. C., & Tinoco-Ojanguren, C. (2024). Enhanced mycorrhization in four species of columnar cacti under the Sonoran Desert tree Olneya tesota. Botanical Sciences. 1*02 (3): 765-778.* https://doi.org/10.17129/botsci.3454

Borland, A. M., & Taybi, T. (2004). Synchronization of metabolic processes in plants with crassulacean acid metabolism. *Journal of Experimental Botany, 55*(400), 1255–1265. https://doi.org/10.1093/jxb/erh105

Bravo, A. D., Rendón, A. B., Zavala H., J. A., & Fornoni, J. (2014). Primer registro de Cactophagus spinolae (Coleoptera: Curculionidae) sobre dos especies de Stenocereus (Cactaceae) en el centro de México. *Revista Mexicana De Biodiversidad,* 85(3), 972–974. https://doi.org/10.7550/rmb.43764

Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. (2nd ed.). Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.academia.edu/39916393/Bravo_Hollis_H_Las_Cactaceas_de_Mexico_Vol

Bravo, A., D., Rendón-Aguilar, B., Guido, M., & Nieto-Garibay, A. (2024). Las pitayas de México recurso alimenticio en proceso de domesticación con grandes alternativas de aprovechamiento. *Recursos Naturales y Sociedad*. Vol. 10 (1): 115-126. https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.01.0010

Cakmak, I. & Yazici, Atilla. M. (2010). Magnesium: A forgotten element in crop production. Better Crops, 94(2), 23–25.

Casas, A., Pickersgill, B., Caballero, J., Valiente-Banuet, A. (1997). Ethnobotany and domestication in Xoconochtl, Stenocereus stellatus (Cactaceae), in the Tehuacán Valley and La Mixteca Baja, México. Economic Botany, 51(3), 279–292. https://doi.org/10.1007/BF02862097

CC-BY-SA. (14 de 08 de 2013). *Llifle*. Obtenido de Stenocereus pruinosus, Encyclopedia of Cacti: https://www.llifle.com/Encyclopedia/CACTI/Family/Cactaceae/7951/Stenocereus_pruinosus

Ceballos S., R. (2003). Potencial productivo y comercial de la pitya de mayo (Stenocereus griseus Hawort) en la mixteca baja. *Universidad Autónoma Chapingo.*

Chaicharoenaudomrung, N., Oonsivilai, A., & Oonsivilai, R. (2014). Chlorophylls Contents in Echinocactus grusonii Extract. Advanced Materials Research, 1507–1511. https://doi.org/*10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1507*

Chaicharoenaudomrung, N., Posridee, K., Oonsivilai, A., & Oonsivilai, R. (2024). Golden Barrel Cactus: Unveiling Its Potential as a Functional Food and Nutraceutical Source. Foods. 13(7), 1137. https://doi.org/10.3390/foods13071137

Aplicaciones de yodo y glutamina en la concentración de hierro, cobre y zinc en lechuga

Willian Kenneth Lizárraga-Estrada[46]; Fernando Carlos Gómez-Merino*; Libia I. Trejo-Téllez; Víctor Hugo Carbajal-Vázquez

Resumen

Los elementos benéficos, entre ellos el yodo (I), pueden actuar como bioestimulantes inorgánicos, favoreciendo crecimiento, productividad y tolerancia al estrés abiótico en las plantas. En particular, el I puede estimular el metabolismo antioxidante y detonar respuestas adaptativas ante embates ambientales. Asimismo, la glutamina (Gln) favorece la absorción y asimilación de nutrimentos y contribuye a mitigar los efectos del estrés abiótico. El objetivo de este estudio fue analizar el efecto de la aplicación individual y combinado de I y Gln en la concentración de hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Rhodenas en hidroponía. Se utilizó un diseño factorial 4 × 4 con cuatro dosis de yodo (0, 10, 20 y 30 µM) y cuatro de glutamina (0, 0.5, 1.0 y 1.5 mM), generando 16 tratamientos con 12 repeticiones. El I se aplicó mediante la solución nutritiva y la Gln vía foliar. Los resultados mostraron que, la concentración de Fe se incrementó con la dosis de 20 µM de I, y con las dosis con 0.5 y 1.5 mM Gln. En contraste, el I redujo las concentraciones de Cu y Zn, especialmente a dosis elevadas, siendo 30 µM la más perjudicial para el Zn. Por su parte, la aplicación de 1.5 mM de Gln incrementó el contenido de Cu, mientras que, las dosis de 0.5 y 1.5 mM aumentaron la concentración de Zn. Se concluye que el I y la Gln afectan diferencialmente la acumulación de micronutrientes en lechuga, dependiendo de la dosis aplicada.

Palabras clave: Aminoácidos, bioestimulación, hortalizas de hoja, nutrición vegetal.

Abstract

Beneficial elements, including iodine (I), can act as inorganic biostimulants, promoting growth, productivity, and tolerance to abiotic stress in plants. In particular, iodine can stimulate antioxidant metabolism and trigger adaptive responses to environmental stressors. Likewise, glutamine (Gln) promotes the absorption and assimilation of nutrients and helps mitigate the effects of abiotic stress. The objective of this study was to analyze the effect of

[46] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264. *Autor para correspondencia: fernandg@colpos.mx, fernandg@colpos.mx y cfmerinoagrocien@gmail.com

the individual and combined application of iodine and Gln on the concentration of iron (Fe), copper (Cu), and zinc (Zn) in hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) cv. Rhodenas. A 4 × 4 factorial design was used with four doses of iodine (0, 10, 20, and 30 µM) and four doses of glutamine (0, 0.5, 1.0, and 1.5 mM), resulting in 16 treatments with 12 replicates. Iodine was applied via the nutrient solution, and glutamine was applied foliarly. The results showed that iron concentration increased with the 20 µM dose of iodine and with the 0.5 and 1.5 mM glutamine doses. In contrast, iodine reduced copper and zinc concentrations, especially at higher doses, with 30 µM being the most detrimental to zinc. Meanwhile, the application of 1.5 mM glutamine increased copper content, while the 0.5 and 1.5 mM doses increased zinc concentration. It is concluded that I and Gln differentially affect the accumulation of micronutrients in lettuce, depending on the dose applied.

Keywords: Amino acids, biostimulation, leafy vegetables, plant nutrition.

Introducción

Además de los elementos esenciales, existe otro grupo de elementos benéficos representados por silicio (Si), cerio (Ce), cobalto (Co), selenio (Se), sodio (Na), aluminio (Al), titanio (Ti), vanadio (V), lantano (La) y yodo (I), que pueden actuar como bioestimulantes inorgánicos, promoviendo así, mejores respuestas en las plantas en cuanto a crecimiento, rendimiento, calidad y tolerancia a factores de estrés abiótico (Singhal *et al*., 2023; Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2023).

El yodo es un elemento esencial para la salud humana y desempeña un papel importante en la producción de hormonas tiroideas, en el metabolismo energético y el desarrollo físico y mental. Se encuentra principalmente en océanos, rocas, sedimentos y aguas superficial (en cantidades traza). En el suelo, el yodo se une fácilmente a la materia orgánica. La forma reducida del yodo es el yoduro (I^-) y su forma oxidada es el yodato (IO^-). Estas formas son generalmente solubles en agua o alcohol, lo que facilita su movilidad ambiental. Se utiliza como desinfectante, en jabones, vendajes, medicamentos y para purificar agua. También se incorpora a la sal de mesa para prevenir deficiencias y favorecer la producción de hormonas tiroideas. La principal fuente de yodo son los océanos, mediante el rocío marino y emisiones gaseosas, llega a la atmósfera y a través del aire y el agua de lluvia, depositándose sobre suelos y vegetación, donde puede asociarse con la materia orgánica (ATSDR, 2016; Dobosy *et al*., 2020; Ma *et al*., 2022).

Por otro lado, el yodo es un elemento no esencial para las plantas, aun así, se considera benéfico y bioestimulante, ya que la aplicación exógena de este elemento a los cultivos puede

potenciar el metabolismo redox, favorecer sinergias con minerales esenciales y aumentar la tolerancia a factores ambientales adversos (García-Fuentes *et al*., 2022). En lechuga, mejora el valor nutricional incrementado compuestos bioactivos antioxidantes (Maglione *et al*., 2022), además de aumentar la concentración de fósforo (P), hierro (Fe) y potasio (K) en tejido foliar (Ortega-Ramírez *et al*., 2025).

En 1883, el químico alemán Ernest Schulze aisló la glutamina (Gln) a partir del jugo de remolacha azucarera. A la postre, se ratificó su presencia en proteínas mediante el aislamiento de hidrolizados de gliadina. La Gln es un compuesto central en el metabolismo del nitrógeno (N) vegetal. Es el primer aminoácido producido durante la asimilación del N y se sintetiza mediante la acción de la enzima glutamina sintetasa (GS), la cual incorpora NH_4^+ al glutamato (Glu) utilizando ATP. Las plantas poseen diversas isoenzimas de GS que trabajan individualmente o de manera coordinada para mantener un suministro adecuado de Gln. Esta molécula es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en la síntesis de proteínas y funciona como donador de N para producir aminoácidos, ácidos nucleicos y coenzimas de vitamina B (Lee *et al*., 2023).

De esta manera, existe evidencia bibliográfica que sustenta el uso de la glutamina (Gln) como bioestimulante, ya que puede mejorar absorción y asimilación de nutrientes, además de contrarrestar los efectos provocados por estrés abiótico (Noroozlo *et al*., 2019). En cultivos como la zanahoria (*Daucus carota*) la glutamina mejora parámetros de germinación (Üstüner *et al*., 2023), en maíz (*Zea mays* L.) mejora la producción, rendimiento y características de calidad de grano (Islam *et al*., 2024) y en árboles de Álamo (*Populus alba*) promueve el equilibrio dinámico en la relación N:C (Han *et al*., 2022). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar el efecto de la aplicación individual de I y Gln en la concentración de hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Rhodenas en hidroponía.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México. En un invernadero tipo túnel y en un sistema de raíz flotante. El material vegetal utilizado fue lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. Rhodenas. Se estableció un diseño factorial 4 x 4, con distribución completamente al azar, con los factores yodo (0, 10, 20 y 30 µM) y glutamina (0, 0.5, 1.0 y 1.5 mM). La combinación de niveles correspondientes a cada factor de estudio produjo un total de 16 tratamientos con 12 repeticiones. Las unidades experimentales estuvieron constituidas por contenedores de plástico de 12 L, con tres plantas

(Figura 1). El I fue suministrado en solución nutritiva, mientras la Gln se aplicó vía foliar, respectivamente (Figura 2).



Figura 1. Unidad experimental: contenedor plástico con tres plántulas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. Rhodenas.

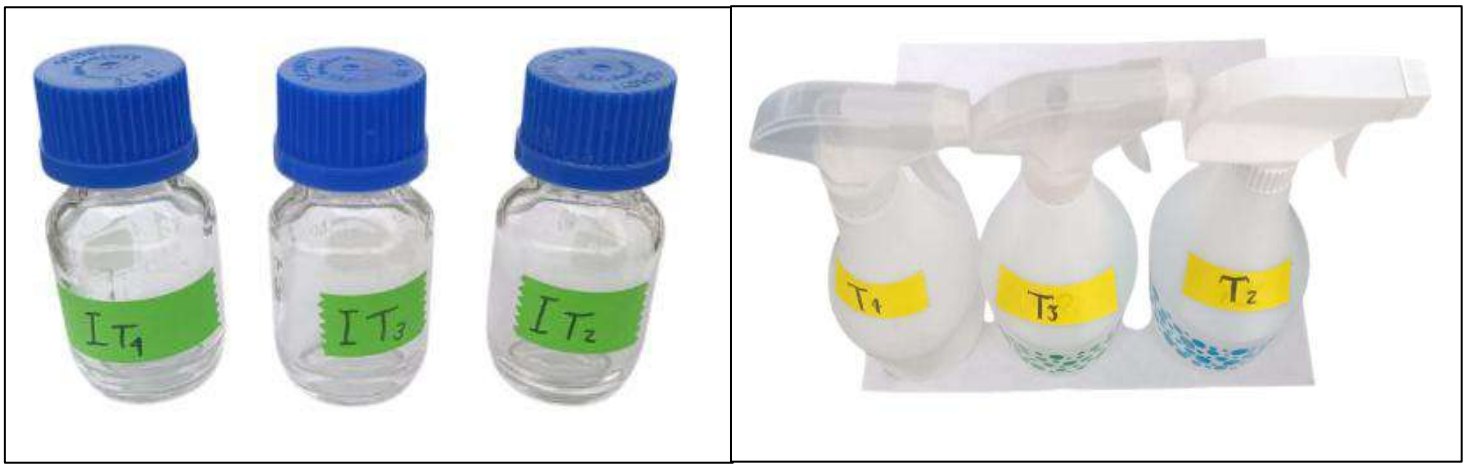


Figura 2. Equipo de dosificación y aplicación de tratamientos con yodo (vía solución nutritiva) y glutamina (vía foliar).

Para la germinación de las semillas se utilizó una charola de unicel de 200 cavidades, conteniendo una mezcla de sustratos con turba (Pro-Mix FLX, Premier Horticultura; Canadá) y perlita (Multiperl; México) en proporción 2:1 (v/v) con adecuada humedad, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Equipo de germinación: charolas de unicel con 200 cavidades y mezcla de turba y perlita como sustrato (2:1).

Las plantas se desarrollaron en solución nutritiva (SN) de Steiner (Steiner, 1984), a pH 5.5 y conductividad eléctrica de 2.0 ± 0.2 dS m^{-1}, la SN se renovó cada 7 d y se repuso agua diariamente para mantener el volumen de solución en 11 L. El trasplante se realizó 21 d después de la siembra en el sistema de raíz flotante, el cual requirió oxigenación constante de la SN, por lo cual, se utilizaron bombas de aire para acuario (Elite® 802, Rolf C. Hagen; Canadá). Además, se empleó un temporizador digital (Steren, TEMP-08E; México) programado para activar oxigenación durante 15 min cada 3 h, con ocho tiempos por día. Los tratamientos con I y Gln se realizaron a partir de 7 d después de trasplante, el I se aplicó en la SN cada 7 d. La Gln se aplicó en tres ocasiones, cada 10 d. El I se añadió a los contenedores con una micropipeta. La Gln se aplicó de manera foliar usando un atomizador, y aplicando

50 mL de tratamiento por planta. Se empleó polisorbato 20 (Tween® 20, Sigma-Aldrich; EE. UU.), a una concentración de 0.1 % como surfactante y a un pH 5.6. Se evaluaron variables de nutrimentales.

A la cosecha, se realizó un muestreo de hojas, las cuales se secaron a 70 °C por 72 h en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, Guadalajara, Jalisco, México). Del material obtenido (materia seca: MS), se pesaron 0.25 g y se colocaron en tubos de ensayo, acto seguido se les agregó una mezcla de ácidos (H_2SO_4:$HClO_4$; 2:1; v/v) para realizar digestión húmeda (Alcántar-González y Sandoval-Villa, 1999). Una vez digestada la materia orgánica, se aforó la muestra a 25 mL con agua desionizada y se filtró. Los micronutrimentos Fe, Cu y Zn se determinaron a través de un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (Agilent ICP OES 725-ES; Santa Bárbara, CA, EE. UU.).

Una vez comprobados los supuestos de normalidad y homogeneidad, los datos se analizaron mediante ANOVA y las medias fueron comparadas por la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Resultados y discusión

En el Cuadro 1 se presentan los efectos de los factores I y Gln analizados de forma individual, sobre las concentraciones de Fe, Cu y Zn en tejido foliar de lechuga. La concentración foliar de Fe se dividió en tres grupos de acuerdo con la prueba de comparación de medias, por efecto del tratamiento con yodo. La media más alta (110.96 mg kg^{-1} de MS) se registró con la dosis 20 µM I; el segundo grupo se tuvo con 0 y 10 µM I, que tuvieron en promedio 86.83 mg kg^{-1} de MS; finalmente, la menor concentración de Fe se tuvo con la dosis 30 µM I (75.40 mg kg^{-1} de MS). En lo que respecta a glutamina, las dosis 0.5 y 1.5 mM incrementaron la concentración de Fe en comparación con las dosis de 0 y 1 mM; con concentraciones medias de 96.31 y 83.70 mg kg^{-1} de MS.

Para el caso del Cu, los resultados relacionados con el factor yodo mostraron que el tratamiento 0 µM I, con media de 8.99 mg kg^{-1} de MS, fue estadísticamente mayor en 7.9 y 21% respecto a las dosis 10 y 20 µM I. El factor glutamina mostró diferencias estadísticas en la concentración de Cu en hojas únicamente entre las dosis 1.5 y 0 mM, con medias de 8.86 y 7.86 mg kg^{-1} de MS, respectivamente.

La concentración de Zn en hojas se relacionó de manera negativa con la concentración de yodo en la solución nutritiva, registrándose diferencias estadísticas entre las dosis 0 µM I (18.11 mg kg^{-1} de MS) y 30 µM I (16.68 mg kg^{-1} de MS). El factor glutamina ocasionó la formación de dos grupos estadísticos de acuerdo con la prueba de comparación de medias,

siendo las dosis 0.5 y 1.5 mM Gln superiores a 0 y 1.0 mM Gln, con valores medios de concentración de 18.19 y 16.87 mg kg^{-1} de MS, respectivamente.

En albahaca, formas reducidas de nitrógeno, tales como amonio, glicina o glutamina, aumentaron las concentraciones foliares de Fe y Zn (Noroozlo *et al*., 2019). La concentración foliar más alta de Zn y Cu se observó con 0 µM I. Sularz *et al*. (2020) observaron que la concentración más alta de Cu se presentó en el testigo (0 µM I).

Cuadro 1. Efectos principales de yodo y glutamina sobre concentración foliar de hierro, cobre y zinc en lechuga.

Tratamientos	Dosis	Hierro (mg kg^{-1} MS)	Cobre (mg kg^{-1} MS)	Zinc (mg kg^{-1} MS)
Yodo (µM)	0	85.95 ± 10.86 b	8.99 ± 1.01a	18.11 ± 2.03 a
	10	87.72 ± 7.18 b	8.33 ± 1.26 b	17.86 ± 1.30 a
	20	110.96 ± 17.94 a	7.43 ± 0.41 c	17.46 ± 1.23 ab
	30	75.40 ± 8.03 c	8.53 ± 2.09 ab	16.69 ± 1.37 b
Glutamina (mM)	0	86.14 ± 14.79 b	7.86 ± 0.78 b	16.99 ± 1.56 b
	0.5	96.94 ± 24.54 a	8.29 ± 1.13 ab	18.27 ± 1.73 a
	1	81.26 ± 8.76 b	8.27 ± 1.16 ab	16.74 ± 1.39 b
	1.5	95.69 ± 13.93 a	8.86 ± 2.18 a	18.11 ± 1.09 a

Medias ± DE con letras diferentes indican diferencias estadísticas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). MS: Materia seca.

Conclusiones

En este estudio de observó que la concentración de Fe en tejido foliar de lechuga se incrementó con la aplicación de 20 µM I y 0.5 mM Gln. El yodo mostró un efecto negativo en la concentración de Cu, pero la aplicación de 1.5 mM Gln aumentó su concentración estadísticamente con respecto al tratamiento sin Gln. La aplicación de 30 µM I disminuyó la concentración de Zn con respecto al testigo y a 10 µM I, en tanto que al aplicar 0.5 y 1.5 mM Gln la concentración de este elemento aumentó. Se concluye que las aplicaciones de I y de Gln afectan las concentraciones de Fe, Cu y Zn de manera diferencial en lechuga.

Literatura citada

Libro

Alcántar-González, G., & Sandoval-Villa, M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., Publicación Especial No. 10, Chapingo, México. 156 p.

Revistas

Dobosy, P., Endrédi, A., Sandil, S., Vetési, V., Rékási, M., Takács, T., & Záray, G. (2020). Biofortification of potato and carrot with iodine by applying different soils and irrigation with iodine-containing water. *Frontiers in Plant Science.* 11: 593047. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.593047

García-Fuentes, J. E., Herrera- Castellanos, B. F., Rivas-Martínez, E. N., Narváez-Ortiz, W. A., Benavides-Mendoza, A., Medrano-Macías, J. (2022). Outcomes of foliar iodine application on growth, minerals and antioxidants in plants under salt stress. *Folia Horticulturae*. 34: 27–37. https://doi.org/10.2478/fhort-2022-0003

Han, M., Xu, M., Wang, S., Wu, L., Sun, S., Su, T. (2022). Effects of exogenous L-glutamine as a sole nitrogen source on physiological characteristics and nitrogen use efficiency of poplar. *Plant Physiology and Biochemistry*. 172: 1–13. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.12.032

Islam, M. M., Hassan, M. U., Ishfaq, M., Ripa, F. A., Nadeem, F., Ahmad, Z., Xu, J., Ning, P., LI, X. (2024). Foliar glutamine application improves grain yield and nutritional quality of field-grown maize (*Zea mays* L.) Hybrid ZD958. *Journal of Plant Growth Regulation.* 43: 624–637. https://doi.org/10.1007/s00344-023-11121-w

Lee, K. T., Liao, H. S., & Hsieh, M. H. (2023). Glutamine metabolism, sensing and signaling in plants. *Plant and Cell Physiolgy*. 64(12): 1466–1481. https://doi.org/10.1093/pcp/pcad054

Ma, R., Yan, M., Han, P., Wang, T., Li, B. M., Zhou, S., Zheng, T., Hu, Y., Borthwick, A. G. L., Zheng, C., & Ni, J. (2022). Deficiency and excess of groundwater iodine and their health associations. *Nature Communications.* 13: 7354. https://doi.org/10.1038/s41467-022-35042-6

Maglione, G., Vitale, E., Costanzo, G., Polimeno, F., Arena, C., & Vitale, L. (2022). Iodine enhances the nutritional value but not the tolerance of lettuce to NaCl. *Horticulturae*. 8(7): 662. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070662

Ortega-Ramírez, A. T., Silva-Marrufo, O., Pérez-Rubio, Y. E., Alaniz-Villanueva, O. G., Herrera-Gamboa, J., Marín-Tinoco, R. I., Precido-Rangel, P., & Sariñana-Aldaco, O. (2025). Efectos bioestimulantes del yodo sobre la biomasa, las biomoléculas y el perfil nutricional de plántulas de lechuga. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* 25: 2763–2772. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02296-0

Noroozlo, Y. A., Souri, M. K., & Delshad, M. (2023). Effects of soil application of amino acids, ammonium, and nitrate on nutrient accumulation and growth characteristics of sweet basil. *Communications in Soil Science and Plant, Analysis*. 50(4): 485–495. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1689249

Steiner, A. (1984). The Universal Nutrient Solution. *In*: Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture, Lunteren, The Netherlands. April 29 to May 5, 1984; ISOSC: Wageningen, The Netherlands, pp. 633–649.

Singhal, R. K., Fahad, S., Kumar, P., Choyal, P., Javed, T., Jinger, D., Singh, P., Saha, D., Prathiba, Bose, B., Akash, H., Gupta, N. K., Sodani, R., Dev, D., Suthar, D. L., Liu, K., Harrison, M. T., Saud, S., Shah, A. N., & Nawaz, T. (2023). Beneficial elements: New players in improving nutrient use efficiency and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*. 100: 237–265. https://doi.org/10.1007/s10725-022-00843-8

Sularz, O., Smoleń, S., Koronowicz, A., Kowalska, I., & Leszczyńska, T. (2020). Chemical Composition of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) biofortified with iodine by KIO_3, 5-Iodo-, and 3.5-diiodosalicylic acid in a hydroponic cultivation. *Agronomy*. 10(7): 1022. https://doi.org/10.3390/agronomy10071022

Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2023). Beneficial elements: Novel players in plant biology for innovative crop production. *Frontiers in Plant Science*. 2(14): 1303462. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1303462

Üstüner, H., Ulukapı, K., & Nasırcılar, AG (2023). The effects of exogenous glutamine application on some germination parameters of different carrot cultivars grown in salinity conditions. *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*. 7(2): 231–240. https://doi.org/10.29329/ijiaar.2023.568.7

Referencias electrónicas

ATSDR. (2016). Resúmenes de salud pública: yodo (Iodine). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Atlanta, GA. EE. UU. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs158.html#:~:text=Los%20oc%C3%A9anos%20son%20la%20fuente,el%20agua%20y%20el%20suelo. Consultado el 3 de agosto de 2026.

Calidad nutrimental del grano de frijol y maíz en función al tipo de fertilización

Iralda Yadira Pérez González, José Alberto Salvador Escalante Estrada[47], Víctor F. Conde Martínez

Resumen

La calidad nutrimental del grano en sistemas agrícolas asociados depende de la disponibilidad y dinámica de los nutrimentos en el suelo, los cuales están determinados por el tipo de fertilización y las condiciones ambientales. En sistemas maíz-frijol, la interacción entre ambas especies y el manejo de la fertilización pueden modificar la síntesis y distribución de compuestos como proteínas, lípidos y carbohidratos, afectando así el valor nutricional del producto final. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del tipo de fertilización (orgánica e inorgánica) sobre la calidad nutrimental del grano de maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en un sistema asociado bajo condiciones de temporal en Montecillo, Texcoco, México. La calidad nutrimental se determinó mediante análisis proximal del grano. En maíz, la fertilización inorgánica incrementó el contenido de proteínas, lípidos y cenizas, mientras que la fertilización orgánica favoreció la acumulación de carbohidratos. En frijol, la fertilización orgánica promovió mayor contenido de proteína y cenizas, en comparación con la inorgánica.

Palabras clave: Asociación maíz-frijol, fertilización orgánica, fertilización inorgánica, calidad nutricional del grano y análisis proximal.

Abstract

Grain nutritional quality in intercropping systems depends on the availability and dynamics of soil nutrients, which are influenced by fertilization type and environmental conditions. In maize–common bean systems, interspecific interactions and fertilization management can modify the synthesis and partitioning of compounds such as proteins, lipids, and carbohydrates, thereby affecting the nutritional value of the harvested grain. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of organic and inorganic fertilization on the nutritional quality of maize (*Zea mays* L.) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grain in a rainfed intercropping system in Montecillo, Texcoco, Mexico. Grain nutritional quality was

[47] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México. C. P. 56264. Correo: perez.iralda@colpos,mx; jasee@colpos.mx.

determined through proximate analysis. In maize, inorganic fertilization increased protein, lipid, and ash contents, whereas organic fertilization favored carbohydrate accumulation. In common bean, organic fertilization resulted in higher protein and ash contents than inorganic fertilization.

Keywords: maize–bean intercropping, organic fertilization, inorganic fertilization, grain nutritional quality, proximate analysis.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) y el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) constituyen uno de los sistemas agrícolas tradicionales más importantes en Mesoamérica, no solo por su relevancia cultural, sino también por su contribución a la seguridad alimentaria, debido a su complementariedad nutricional y funcional (Lithourgidis *et al*., 2011; Suárez *et al*., 2022). En sistemas de asociación, particularmente cereal-leguminosa, se ha documentado una mayor eficiencia en el uso de recursos como luz, agua y nutrientes, lo que se traduce en incrementos en la producción por unidad de superficie y en mejoras en la calidad del sistema (Layek *et al*., 2018; Bitew *et al*., 2021).Desde el punto de vista fisiológico, la interacción entre especies en estos agrosistemas modifica procesos clave que intervienen en la producción y partición de fotoasimilados hacia los órganos de reserva (Watson, 1952; Taiz *et al*., 2015). En este contexto, el balance fuente–demanda resulta determinante para la acumulación de biomasa y la calidad del grano, ya que la disponibilidad de nitrógeno influye directamente en la síntesis de compuestos nitrogenados como las proteínas, mientras que su limitación puede favorecer la acumulación de carbohidratos (Drinkwater *et al*., 1998; Begam *et al*., 2024).El manejo de la fertilización constituye uno de los factores que mayor influencia ejerce sobre la dinámica de los nutrientes y el desempeño de los cultivos asociados. La fertilización inorgánica proporciona nutrientes de rápida disponibilidad, particularmente nitrógeno, lo que favorece la actividad fotosintética, el crecimiento vegetativo y el rendimiento del cultivo en el corto plazo. Sin embargo, su aplicación continua puede afectar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En contraste, la fertilización orgánica libera los nutrientes de manera gradual, incrementa la actividad biológica y mejora la calidad del suelo, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema productivo, aunque su mineralización más lenta puede limitar el suministro de nutrientes durante las etapas de mayor demanda del cultivo (Layek *et al*., 2018; Challa *et al*., 2024). En sistemas de asociación maíz-frijol, estas diferencias en la disponibilidad y dinámica de los nutrientes adquieren especial importancia debido a la capacidad del frijol para fijar nitrógeno atmosférico, proceso que modifica las interacciones de competencia y complementariedad entre las especies, influye en la acumulación, partición de biomasa y, en consecuencia, puede afectar la composición

nutrimental del grano (Lithourgidis *et al*., 2011; Suárez *et al*., 2022). Asimismo, diversos estudios han demostrado que la integración de fuentes orgánicas e inorgánicas de fertilización puede optimizar simultáneamente la productividad, la eficiencia en el uso de los nutrientes y la calidad nutrimental del grano en sistemas de cultivo asociados (Bitew *et al*., 2021; Begam *et al*., 2024).El análisis proximal del grano constituye una herramienta ampliamente utilizada para evaluar la calidad nutrimental mediante la cuantificación de componentes como proteínas, lípidos, fibra, cenizas y carbohidratos, cuya composición está influenciada por factores genéticos, las condiciones ambientales y el manejo agronómico (Bello *et al*., 2016; Mex-Álvarez *et al*., 2016). En los sistemas de asociación maíz-frijol, comprender la influencia del tipo de fertilización sobre la composición química del grano resulta esencial para desarrollar estrategias de manejo que, además de maximizar el rendimiento, mejoren el valor nutrimental de la producción y contribuyan a la sostenibilidad del sistema. Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del tipo de fertilización (orgánica e inorgánica) sobre la calidad nutrimental del grano de maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivados en un sistema de asociación bajo condiciones de régimen de lluvia (temporal).

Materiales y métodos

Establecimiento del cultivo

El cultivo se estableció bajo condiciones de lluvia en Montecillo, Texcoco, Estado de México (19°27'36.0"N y 98°54'13.5"O, 2250 msnm), con un clima templado con verano fresco y largo y poca oscilación térmica (Cb(w1)(w)(i´)g) (García, 2004), con una temperatura y precipitación media anual de 15.5 °C y 554 mm, respectivamente.El cultivo se estableció el 20 de junio de 2024 en camas de siembra de 4.50 x 1.60 m con una separación entre plantas de 0.30 m y entre hileras de 0.80 m y 0.54 m teniendo dos densidades de población de 8.33 y 12.35 plantas m^{-2}, respectivamente. Los cultivares utilizados fueron: maíz (*Zea mays* L.) nativo azul cv. San Miguel Tlaixpan y frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Tilantongo, Oaxaca de hábito de crecimiento indeterminado trepador.

Condiciones edáficas y climáticas

Para conocer la fertilidad del suelo, se realizó un muestreo a los 30 cm de profundidad que posteriormente se envió al Laboratorio de análisis de suelos y nutrición, Fertilidad de Suelos S. de R.L. Los resultados indican que es un suelo de textura arcillosa, con una densidad aparente de 1.1 g cm^{-3}, pH de 8.5 (alcalino), CE de 2.9 dS m^{-1}, MO de 3.5 %, P 38 ppm y N 62.5 ppm. Así también, se consideraron las variables meteorológicas como la temperatura

máxima (Tmáx), mínima (Tmín) y la precipitación (PP, mm); estos datos fueron proporcionados por la estación Agrometeorológica del Colegio de Postgraduados. La media decenal de las Tmáx y Tmín durante el ciclo del cultivo fluctuaron entre 20.4 °C y 32.5 °C y entre 9.0 °C y -0.3 °C, respectivamente. Durante el ciclo del cultivo se tuvo una precipitación acumulada de 329.7 mm.

Diseño experimental y aplicación de tratamientos

El diseño experimental fue bloques completamente al azar con arreglo de parcelas divididas y cuatro repeticiones. La unidad experimental (UE) fue de una cama de siembra de 1.60 x 4.50 m y como parcela útil se consideró la parte central de esta, contando con un total de 16 UE. Los tratamientos aplicados fueron 2 y 3 hileras (2H y 3H, respectivamente) con fertilización orgánica (FO) e inorgánica (FI); las combinaciones generadas fueron 2HFO, 2HFI, 3HFO y 3HFI. La aplicación de FO fue a base de nopal (V-BST) a una dosis de 20 L ha^{-1} diluido en agua a una razón de 10 mL por 1 L, aplicado vía foliar a los 15, 30 y 50 días después de la siembra (dds) y FI a una relación de 100N-100P-00K utilizando las siguientes fuentes: DAP (18-46-00) y urea (46-00-00), aplicándose el P y el 50 % del N a los 15 dds y el resto del N al momento de la escarda (45 dds).

A la madurez fisiológica se registró el rendimiento en grano de los cultivares asociados, a esta variable se le aplicó un análisis de varianza (ANDEVA), la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Posteriormente, se seleccionaron tres muestras de semilla de maíz y frijol, correspondientes a los tratamientos de tres hileras con fertilización orgánica e inorgánica, con la finalidad de conocer si el tipo de fertilización tuvo algún efecto en la composición química del grano. Las muestras se enviaron al laboratorio de bromatología de El Colegio de la Frontera Sur para la realización del análisis proximal. La proteína cruda se determinó mediante el método semimicro Kjeldahl; el contenido de cenizas, por incineración a 550 °C; la fibra cruda, mediante digestión ácido-alcalina; el extracto etéreo (lípidos), por extracción con solvente; y la humedad, mediante secado a 100 °C. El contenido de carbohidratos se estimó por diferencia respecto al resto de las determinaciones.

Resultados y discusión

Rendimiento en grano

De acuerdo con el Cuadro 1, el tratamiento con el que se obtuvieron los valores más altos en rendimiento el grano (RG) fue el de tres hileras con fertilización inorgánica (3HFI), con RG para maíz de 219.5 g m^{-2} y para frijol de 116.1 g m^{-2}. Como se puede observar, el mejor

desempeño observado en los tratamientos con fertilización inorgánica puede atribuirse a la disponibilidad inmediata de nutrientes esenciales, particularmente nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales se encuentran en formas solubles fácilmente absorbibles por las raíces de las plantas. Esta disponibilidad de nutrientes favorece el crecimiento vegetativo, el desarrollo de la mazorca y la formación de granos durante etapas críticas del cultivo (Suárez *et al*., 2022; Jiang *et al*., 2024). En contraste, los fertilizantes orgánicos requieren procesos de mineralización microbiana para liberar nutrientes al suelo, lo que puede retrasar su disponibilidad para el cultivo.

Cuadro 1. Rendimiento en grano (RG) de maíz y frijol en función al número de hileras (2H, 3H) y al tipo de fertilización: orgánica (FO) e inorgánica (FI). Montecillo, Texcoco, México. Junio-noviembre 2024.

Tratamiento	RG maíz g m^{-2}	RG frijol g m^{-2}
2HFI	175.9b[z]	96.7b
2HFO	149.9bc	51.1c
3HFI	219.5a	116.1a
3HFO	121.3c	89.4b
Tukey α = 0.05 (DMS)	35.9	7.4
Media general	166.7	88.3
CV (%)	42.1	16.3

[z] En columnas letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey α = 0.05). DMS: diferencia mínima significativa al 5% de probabilidad de error. CV: coeficiente de variación.

Calidad nutrimental del grano de maíz en función al tipo de fertilización

El análisis proximal del grano de maíz asociado con frijol, establecido en arreglo de tres hileras bajo fertilización inorgánica (3HFI) y orgánica (3HFO), evidenció diferencias marcadas en la composición química del grano (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis proximal para maíz asociado con frijol, sembrado a tres hileras con fertilización orgánica e inorgánica (FO, FI). Montecillo, Texcoco, México. Junio-noviembre 2024.

Variable	3HFI	3HFO
Humedad (%)	11.8	11.2
Cenizas (%)	2.2	1.1
Proteína cruda (%)	9.2	4.6
Fibra cruda (%)	2.4	1.9
Extracto etéreo (%)	7.4	3.7
Carbohidratos (%)	67.1	77.6
Rendimiento de proteína cruda (kg ha^{-1})	201.9	55.8
Valor energético (Kcal)	371.6	361.9

En cuanto al contenido de humedad, ambos tratamientos presentaron valores similares, con 11.8 % en 3HFI y 11.2 % en 3HFO. De acuerdo con López *et al.* (2007) y Agama *et al.* (2011), el contenido de humedad aceptable en cereales debe ser inferior al 14 %, ya que un bajo porcentaje de humedad favorece su conservación durante el almacenamiento (Mex-Álvarez *et al.*, 2016). Los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro de este intervalo y son comparables con los reportados por Agama *et al.* (2011), quienes encontraron contenidos de humedad entre 7.2 y 10.7 % en maíces azules de la raza Chalqueño. En relación con el contenido de cenizas, se registraron valores de 1.1 % y 2.2 % para los tratamientos 3HFO y 3HFI, respectivamente. Estos resultados son similares a los obtenidos por Agama *et al.* (2011) y García *et al.* (2020), quienes reportaron contenidos entre 1.4 y 1.8 %. Asimismo, Agama *et al.* (2011) señalan que el maíz azul se considera de buena calidad cuando el contenido de cenizas es inferior al 5 %, por lo que los valores obtenidos en este estudio cumplen con dicho criterio.

Para la proteína cruda, el tratamiento 3HFI presentó un valor de 9.2 % y para 3HFO fue de 4.6 %. En este caso, la literatura reporta valores de 8.8 % a 9.7 % (Ortiz, 2006; Agama *et al.,* 2011; García *et al.,* 2020). De acuerdo con Begam *et al.,* (2024), lo cultivos asociados o intercalados, principalmente cereal y leguminosa, muestran un mayor contenido de proteína cruda en comparación con el monocultivo. Además, se observa que la fertilización inorgánica favoreció la disponibilidad inmediata de nutrientes, particularmente nitrógeno, lo que promovió la síntesis de compuestos nitrogenados como las proteínas y, así mejorar la calidad nutricional del grano (López *et al*., 2007). En consecuencia, el mayor rendimiento de proteína cruda se registró para el tratamiento 3HFI (201.9 kg ha^{-1}) a diferencia del 3HFO (55.8 kg ha^{-1}).

Los resultados obtenidos de fibra cruda en este estudio, muestra una diferencia mínima entre la fertilización inorgánica y orgánica (2.4 y 1.9 %, respectivamente). Diversos estudios reportan valores entre 1.3 y 3.8 % (Ortiz, 2006; Chan *et al.,* 2021; Libron *et al.,* 2021; Valencia *et al.,* 2024), que se ajustan perfectamente a los valores obtenidos en el presente estudio. Además, como bien se sabe, la fibra tiene efectos protectores para la salud y beneficios contra enfermedades crónico-degenerativas (Anderson *et al.,* 2009); por esta razón, se considera relevante la selección de cultivares con alto contenido de fibra para mejoramiento genético, aunado a la actividad antioxidante de los maíces pigmentados (Libron *et al.,* 2021).

El contenido de extracto etéreo o grasa cruda presentó diferencias importantes entre tratamientos, aun cuando se evaluó el mismo cultivar. El tratamiento con fertilización inorgánica (3HFI) registró un valor de 7.4 %, superior a los intervalos reportados en la literatura, que oscilan entre 3 y 6 % (Watson, 2003) y entre 4.14 y 5.7 % (Libron *et al*., 2021). No obstante, Chan *et al.* (2021) reportaron contenidos de extracto etéreo de 5.0 a 7.1 % en cultivares nativos e híbridos de maíz del estado de Yucatán, por lo que el valor obtenido en 3HFI se ubica ligeramente por encima de este intervalo. En contraste, el tratamiento con fertilización orgánica (3HFO) presentó un contenido de 3.7 %, valor que se encuentra dentro de los rangos previamente documentados. Estos resultados sugieren que la mayor disponibilidad inmediata de nutrientes en el tratamiento con fertilización inorgánica pudo haber favorecido la actividad fotosintética y la producción de fotoasimilados, incrementando su translocación hacia el grano y, en consecuencia, la acumulación de lípidos, los cuales se concentran principalmente en el germen del maíz (Libron *et al*., 2021).

Los carbohidratos, son el componente mayoritario de reserva energética y se encuentra en el endospermo, principalmente en forma de almidón, representa el 78 % del peso seco del grano, aunque en maíz azul puede alcanzar el 84 % (Bello *et al.,* 2016). En este estudio, el tratamiento 3HFO registró un mayor contenido de carbohidratos (77.6 %) respecto a 3HFI (67.1 %); esta diferencia puede deberse a una deficiencia o pérdida de nitrógeno, donde la asimilación de carbono excede la capacidad de síntesis proteica, favoreciendo la acumulación de carbohidratos (Begam *et al.,* 2024). Otros estudios, reporta valores de 78 – 90 % para maíz azul (Agama *et al.,* 2011); del 70 – 75 % para maíces blanco, amarillo y morado (Mex-Alvárez *et al.,* 2016) y 60 % en un sistema asociado con frijol chino (*Vigna unguiculata* L.) (Begam *et al.,* 2024).

Desde un enfoque fisiológico, estos resultados pueden explicarse mediante la relación fuente–demanda, donde la fertilización inorgánica incrementa la capacidad fotosintética, favoreciendo la acumulación de proteína en el grano (Watson, 1952; Begam *et al.,* 2024). Por el contrario, en sistemas con fertilización orgánica, la liberación gradual de nutrientes puede limitar temporalmente la disponibilidad de nitrógeno, afectando la síntesis proteica y promoviendo la acumulación de carbohidratos (Drinkwater *et al*., 1998; Layek et al., 2018). En conjunto, los resultados indican que, aunque la fertilización orgánica puede contribuir a la acumulación de compuestos energéticos, la fertilización inorgánica mejora significativamente la calidad nutricional en términos de proteína y el rendimiento proteico por unidad de superficie.

Calidad nutrimental del grano de frijol en función al tipo de fertilización

El Cuadro 3, muestra la composición química proximal del frijol asociado con maíz, establecido en arreglo de tres hileras bajo fertilización inorgánica (3HFI) y orgánica (3HFO).

Cuadro 3. Análisis proximal para frijol asociado con maíz, sembrado a tres hileras con fertilización orgánica e inorgánica (FO, FI). Montecillo, Texcoco, México. Junio-noviembre 2024.

Variable	3HFI	3HFO
Humedad (%)	9.7	10.1
Cenizas (%)	4.3	4.7
Proteína cruda (%)	19.6	26.1
Fibra cruda (%)	7.4	7.1
Lípidos (%)	1.3	1.3
Carbohidratos (%)	57.7	50.8
Rendimiento de proteína cruda (kg ha^{-1})	227.6	233.3

El tratamiento con fertilización orgánica (3HFO) presentó mayor contenido de proteína cruda (26.1 %) y cenizas (4.7 %) en comparación con la fertilización inorgánica (3HFI), que registró 19.6% y 4.3%, respectivamente. Este comportamiento sugiere que la fertilización orgánica favorece una mayor acumulación de compuestos nitrogenados y minerales en el grano, probablemente debido a una liberación gradual de nutrientes y a mejoras en la actividad biológica del suelo, lo que incrementa la absorción sostenida de nitrógeno durante el llenado de grano (Challa *et al*., 2024). El mayor contenido de proteína en 3HFO también se reflejó en el rendimiento de proteína cruda (233.3 kg ha^{-1}) respecto a

3HFI (227.6 kg ha^{-1}), lo cual indica que, aunque el sistema inorgánico suele favorecer el crecimiento inicial, la nutrición orgánica puede optimizar la partición de asimilados hacia compuestos nitrogenados en el grano. Este resultado coincide con estudios en sistemas asociados maíz–leguminosa, donde la disponibilidad progresiva de nitrógeno y la fijación biológica contribuyen a mejorar la calidad proteica del cultivo (Bitew *et al*., 2021; Suárez *et al.,* 2022).

En contraste, el tratamiento 3HFI presentó un mayor contenido de carbohidratos (57.7 %) que el tratamiento 3HFO (50.8 %), lo que indica una mayor acumulación de compuestos de reserva en el grano. Este comportamiento podría atribuirse a una mayor disponibilidad de nitrógeno mineral en el tratamiento con fertilización inorgánica, la cual pudo favorecer la actividad fotosintética, la producción de biomasa y, en consecuencia, la síntesis y acumulación de carbohidratos (Suárez *et al*., 2022). Por otra parte, el contenido de fibra cruda fue similar entre tratamientos (7.1–7.4 %), lo que sugiere que este componente estructural presenta menor sensibilidad al tipo de fertilización y depende en mayor medida del genotipo y del estado de madurez del grano, como ha sido reportado para frijol común (Sotelo *et al*., 1995). Asimismo, el contenido de lípidos permaneció constante (1.3 %) en ambos tratamientos, lo que indica que este componente no fue afectado por el tipo de fertilización bajo las condiciones evaluadas.

El mayor contenido de cenizas registrado en 3HFO indica una mayor concentración de la fracción mineral del grano en comparación con 3HFI. Esta respuesta podría estar asociada con diferencias en la disponibilidad, absorción y acumulación de nutrientes derivadas del tipo de fertilización. La materia orgánica puede modificar las condiciones químicas y biológicas del suelo y, con ello, la dinámica de los nutrientes; sin embargo, la magnitud de estos efectos depende de las características del suelo y de la fuente orgánica utilizada (Taiz, 2015). Adicionalmente, la asociación maíz-frijol puede favorecer una utilización complementaria de los recursos edáficos y modificar la nutrición de ambos cultivos, debido, entre otros factores, a la capacidad del frijol para fijar nitrógeno atmosférico (Lithourgidis *et al*., 2011).

Conclusiones

La fertilización inorgánica favoreció en el maíz un mayor contenido de proteína cruda, lípidos y cenizas y mayor rendimiento de grano, mientras que la fertilización orgánica promovió una mayor acumulación de carbohidratos y rendimiento más bajo.

En frijol, la fertilización orgánica favoreció un mayor contenido de proteína y cenizas, evidenciando un efecto diferencial del tipo de fertilización sobre la composición nutrimental del grano, pero con rendimiento más bajo.

Literatura citada

Agama, A.E., Salinas, M.Y., Pacheco, V.G. & Bello, P.L.A. (2011). Características físicas y químicas en dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícola, 2*(3), 319-329.

Anderson, J.W., Baird, P., Davis, Jr.R.H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., Waters, V. & Williams, C.L. (2009). Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews, 67*(4), 188-205. https://doi: 10.1111/j.1753-4887.2009.00189.x.

Begam, A., Pramanick, M., Dutta, S., Paramanik, B., Dutta, G., Patra, P.S., Kundu, A., & Biswas, A. (2024). Inter-cropping patterns and nutrient management effects on maize growth, yield and quality. *Field Crops Research, 310,* 1–13. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109363.

Bello, P.L.A., Camelo, M.G.A., Agama, A.E. & Utrilla, C.R.G. (2016). Aspectos nutracéuticos de los maíces pigmentados: digestibilidad de los carbohidratos y antocianinas. *Agrociencia, 50,* 1041-1063.

Bitew, Y., Derebe, B., Worku, A. & Chakelie, G. (2021). Response of maize and common bean to spatial and temporal differentiation in maize-common bean intercropping. *PLOS ONE, 16*(10), 1-17. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257203.

Challa, A., Workina, M. & Kitila, K. (2024). Effect of Intercropping of Different Varieties of Haricot Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and Maize (*Zea mays* L.) on Soil Fertility and Yield at Shashamene, Ethiopia. *International Journal of Environmental Chemistry, 8*(1), 12-17. https://doi.org/10.11648/j.ijec.20240801.12.

Chan, C.M., Moguel, O.Y., Gallegos, T.S., Chel, G.L. & Betancurt, A.D. (2021). Caracterización química y nutrimental de variedades de maíz (*Zea mays* L.) de alta calidad de proteína (QPM) desarrolladas en Yucatán, México. *Biotecnia, 23*(2), 11-21. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i2.1334.

Drinkwater, L.E., Wagoner, P. & Sarrantonio, M. (1998). Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature, 36*, 262-265. https://doi.org/10.1038/24376.

García, E. (2004). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. D.F.: Instituto de Geografía-UNAM.

García, C.A.U., Cruz, M.R.G., Rayas, A.A.A., Jiménez, G.J., Fabela, M.M.F., Salgado, C.M. de la P., Cortés, S.A. de J., Villanueva, C.A. & Díaz, R.M. (2020). Caracterización físico-química de maíz (*Zea mays* L.) criollo (azul y rojo) del Estado de México. *Agroproductividad, 13*(7), 95-100. https://doi.org/ 10.32854/agrop.vi.1728.

Jiang, M., Dong, C., Bian, W., Zhang, W., & Wang, Y. (2024). Effects of different fertilization practices on maize yield, soil nutrients, soil moisture, and water use efficiency in northern China based on a meta-analysis. *Scientific Reports. 14*(6480), 1-17. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57031-z.

Layek, J., Das, A., Mitran, T., Nath, C., Meena, R.S., Yadav, G.S., Shivakumar, B.G., Kumar, S. & Lal, R. (2018). Cereal+Legume Intercropping: An Option for Improving Productivity and Sustaining Soil Health. In: Meena, R., Das, A., Yadav, G., Lal, R. (eds) Legumes for Soil Health and Sustainable Management. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_11.

Libron, J.A.M.A., Cardona, D.E.M., Mateo, J.M.C., Beltran, A.K.M., Tuaño, A.P.P. & Laude, T.P. (2021). Nutritional properties and phenolic acid profile of selected Philippine pigmented maize with high antioxidant activity. Journal of Food Composition and Analysis, *101*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103954.

Lithourgidis, A.S., Dordas, C.A., Damalas, C.A. & Vlachostergios, D.N. (2011). Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science, 5*(4), 396-410.

López, P.P., Prieto, G.F., Gaytán, M.M. & Román, G.A.D. (2007). Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la región centro de México. *Revista Chilena de nutrición, 34*(1), 1-8. http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182007000100008.

Mex-Álvarez, R.M.J., Garma-Quen, P.M., Bolívar-Fernández, N.J. & Guillén-Morales, M.M. (2016). Análisis proximal y fitoquímico de cinco variedades de maíz del Estado de Campeche, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 12*(2), 74-80.

Ortiz, P.S. del A. (2006). Determinación de la composición química proximal y fibra dietaria de 43 variedades criollas de maíz de 7 municipios del sureste del Estado de Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca Hidalgo. 68 pp. Tesis de Licenciatura. http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/630.

Sotelo, A., Sousa, H. & Sánchez, M. (1995). Comparative study of the chemical composition of wild and cultivated beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Foods for Human Nutrition, 47*, 93-100. https://doi.org/10.1007/BF01089257.

Suárez, J.C., Anzola, J.A., Contreras, A.T., Salas, D.L., Vanegas, J.I., Urban, M.O., Beebe, S.E. & Rao, I.M. (2022). Influence of simultaneous intercropping of maize-bean with input of inorganic or organic fertilizer on growth, development, and dry matter

partitioning to yield components of two lines of common bean. *Agronomy, 12*(5), 1-20. https://doi.org/10.3390/agronomy12051216.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M. & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development.* (6ta Ed). Sinauer Associates, Inc.

Valencia, H.L., Camacho, L.C., Romo, G.C., Castañeda, O.A., Contreras, L.E. & Acevedo, S.O.A. (2024). Caracterización proximal de maíz cultivado con riego de agua residual y temporal. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 13*(25), 151–156. https://doi.org/10.29057/icbi.v13i25.12919.

Watson, D.J. (1952). The physiological basis of variation in yield. *Advances in Agronomy, 4,* 101–145. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60307-7.

Consorcio bacteriano nativo del compostaje elicitado con nanopartículas SBA-15 como estrategia para aumentar el fósforo disponible

María del Pueblito Guevara Santana[48], Ramón Gerardo Guevara González, Rebeca Xilotl Jurado[49], Adrián Esteban Ortega Torres

Resumen

La baja disponibilidad de fósforo (P) en los suelos agrícolas constituye una de las principales limitantes para la productividad de los cultivos, lo que ha incrementado la dependencia de fertilizantes fosfatados obtenidos a partir de roca fosfórica, un recurso no renovable. Los microorganismos solubilizadores de P representan una alternativa sostenible para mejorar la disponibilidad de este nutriente; sin embargo, su eficiencia puede potenciarse mediante la elicitación. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de nanoestructuras mesoporosas de sílice SBA-15 (tradicional y modificada) sobre la actividad solubilizadora de microorganismos nativos aislados del compostaje de estiércol bovino. Se aislaron microorganismos de las fases mesofílicas del compostaje y se evaluó su capacidad de solubilización y mineralización de fósforo en medios Pikovskaya y NBRIP. Posteriormente, las cepas fueron elicitadas con nanoestructuras SBA-15, seleccionándose aquellas con mayor actividad enzimática y capacidad solubilizadora para conformar un consorcio bacteriano. Se aislaron 20 microorganismos, de los cuales 10 presentaron actividad solubilizadora y mineralizadora, cuatro cepas mostraron la mayor respuesta a la elicitación con SBA-15 tradicional a 100 ppm. El consorcio bacteriano incrementó la disponibilidad de fósforo en composta madura hasta en un 21.75 %, resultado asociado con un efecto sinérgico entre las nanoestructuras y la actividad metabólica de los microorganismos. Estos hallazgos demuestran que la elicitación con nanoestructuras SBA-15 fortalece el potencial de microorganismos nativos del compostaje para el desarrollo de bioinsumos orientados a mejorar la disponibilidad de fósforo y promover una agricultura sostenible.

Palabras clave: composta; microorganismos solubilizadores de fósforo; nanoestructuras; solubilización y mineralización de fósforo.

[48] Centro de Investigaciones Aplicadas en Biosistemas (CIAB), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carr, Amazcala-Chichimequillas Km 1.0, El Marqués 76265, México. E-mail: mariagusa0412@gmail.com; ramonggg66@gmail.com; adrianesotorres@gmail.com
[49] Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, México. E-mail: rexilotl@gmail.com

Abstract

Low phosphorus (P) availability in agricultural soils is one of the major constraints limiting crop productivity, increasing the reliance on phosphate fertilizers derived from phosphate rock, a non-renewable resource. Phosphate-solubilizing microorganisms represents a sustainable alternative for improving phosphorus availability; however, their efficiency can be enhanced through elicitation. The aim of this study was to evaluate the effect of mesoporous silica SBA-15 nanostructures (conventional and modified) on the phosphate-solubilizing activity of native microorganisms isolated from cattle manure composting. Microorganisms were isolated from the mesophilic phases of the composting process, and their phosphorus solubilization and mineralization capacities were evaluated using Pikovskaya and NBRIP media. Subsequently, the isolates were elicited with SBA-15 nanostructures, and those exhibiting the highest enzymatic activity and phosphate-solubilizing capacity were selected to form a bacterial consortium. A total of 20 microorganisms were isolated, of which 10 exhibited phosphorus-solubilizing and mineralizing activity. Four isolates showed the greatest response to elicitation with conventional SBA-15 at a concentration of 100 ppm. The bacterial consortium increased phosphorus availability in mature compost by up to 21.75%, a result associated with a synergistic effect between the nanostructures and the metabolic activity of the microorganisms. These findings demonstrate that elicitation with SBA-15 nanostructures enhances the potential of native composting microorganisms for the development of bioinputs aimed at improving phosphorus availability and promoting sustainable agriculture.

Keywords: compost; phosphate-solubilizing microorganisms; nanostructures; phosphorus solubilization and mineralization.

Introducción

El fósforo (P) es uno de los macronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en procesos como la transferencia de energía, la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de ácidos nucleicos. Sin embargo, aunque muchos suelos contienen cantidades importantes de fósforo total, entre el 80 y 90 % se encuentra en formas insolubles o fijadas por compuestos de calcio, hierro y aluminio, lo que limita su absorción por los cultivos (Billah et al., 2019; Hakim et al., 2021). Esta baja disponibilidad ha propiciado una elevada dependencia de fertilizantes fosfatados, cuya producción se basa principalmente en la extracción de roca fosfórica, un recurso no renovable cuya disponibilidad podría verse comprometida en las próximas décadas (Giannini et al., 2022).

Ante esto, el desarrollo de alternativas que incrementen la disponibilidad de P constituye una prioridad para avanzar hacia sistemas agrícolas sostenibles. Entre estas alternativas se encuentran los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF), los cuales transforman compuestos insolubles de P en formas asimilables mediante la producción de ácidos orgánicos, enzimas fosfatasas y otros metabolitos que favorecen la movilización del nutriente (Billah et al., 2019; Hakim et al., 2021; Menezes-Blackburn et al., 2018).

El proceso de compostaje representa una fuente importante de microorganismos con elevado potencial metabólico, durante las fases mesofílica, termofílica y de maduración, ocurre una selección natural de comunidades microbianas, las cuales son capaces de trabajar en condiciones aerobias, realizan complejas reacciones metabólicas empleando el nitrógeno y el carbono disponibles para formar su biomasa. Durante este proceso también se genera calor y un residuo sólido. (Chandna et al., 2013; Li et al., 2019).

Asimismo, las nanopartículas mesoporosas de dióxido de silicio tipo SBA-15 han demostrado ser benéficas para las plantas y microorganismos, esto podría deberse gracias a que poseen elevada área superficial, tamaño de poro uniforme, estabilidad química y alta biocompatibilidad, propiedades que favorecen la interacción con las células microbianas (Guevara-Santana et al., 2026; Magaña-López et al., 2022; Zhao et al., 1998). Las nanoestructuras de sílice han demostrado que pueden actuar como elicitores, induciendo respuestas fisiológicas que incrementan la producción de metabolitos secundarios, enzimas y compuestos relacionados con la movilización de nutrientes (Ferrusquía-Jiménez et al., 2022; Hincapié-Rojas et al., 2020). A pesar de estos avances, existe información limitada sobre su aplicación para potenciar microorganismos nativos aislados del compostaje y sobre su efecto en la disponibilidad de P durante la maduración de la composta.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la elicitación con nanoestructuras mesoporosas de sílice SBA-15 sobre microorganismos solubilizadores de P aislados de las fases mesofílicas del compostaje de estiércol bovino, así como determinar su capacidad para incrementar el P disponible en composta madura mediante la construcción de un consorcio bacteriano.

Materiales y métodos

Sitio experimental

La investigación se desarrolló en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). El proceso de compostaje se realizó en el Campus Amazcala, utilizando

estiércol bovino procedente del establo lechero. Los análisis microbiológicos se efectuaron en los laboratorios del Centro de Investigaciones Aplicadas en Biosistemas (CIAB), mientras que las nanopartículas mesoporosas de sílice SBA-15 fueron sintetizadas y caracterizadas en el Laboratorio de Nanotecnología del Campus Aeropuerto.

Obtención de microorganismos solubilizadores de fósforo

Se establecieron pilas de compostaje de estiércol bovino con dimensiones aproximadas de 2 m de altura por 1 m de ancho y un periodo de maduración de 12 semanas. Durante el proceso se monitoreó la temperatura, humedad y aireación conforme a la metodología descrita por Alavi et al. (2017) y Ortega-Torres et al. (2021). Las muestras microbiológicas se obtuvieron durante las fases mesofílicas inicial y de enfriamiento.

A partir de muestras compuestas de composta se realizaron diluciones seriadas hasta 10^{-5} y se sembraron en medio Pikovskaya (PVK) y NBRIP con pH ácido, neutro y básico para el aislamiento de microorganismos solubilizadores y mineralizadores de P. Los aislados fueron purificados mediante resiembras sucesivas hasta obtener cultivos axénicos.

Elicitación con nanopartículas SBA-15

Los microorganismos seleccionados se cultivaron en caldo LB durante 24 h a 30 °C con agitación de 200 rpm. Posteriormente, los cultivos se inocularon en medio LB liquido con dos tipos de nanopartículas mesoporosas de sílice SBA-15: una en su forma tradicional (denominada S) y otra modificada (denominada C), a concentraciones de 1, 10 y 100 ppm, incubándose nuevamente durante 24 h bajo las mismas condiciones (Ferrusquía-Jiménez et al., 2022).

Posteriormente la solubilización de P se determinó en medio PVK mediante la medición del halo de solubilización durante seis días, mientras que la actividad específica enzimática de fosfatasas ácida, neutra y alcalina se evaluó en medio NBRIP por espectrofotometría a 420 nm a las 24 h, siguiendo la metodología descrita por Ortega-Torres (2021).

Construcción del consorcio bacteriano

Las cepas con mayor capacidad solubilizadora y actividad enzimática fueron sometidas a pruebas de compatibilidad en medio LB para verificar la ausencia de antagonismo. Posteriormente, se construyó un consorcio bacteriano utilizando los microorganismos compatibles previamente elicitados con 100 ppm de nanopartículas SBA-15 (S y C),

concentración seleccionada por presentar la mayor respuesta fisiológica. En el cuadro 1 se muestra la nomenclatura para la construcción del consorcio.

Cuadro 1. Nomenclatura inicial y nomenclatura final de las cepas bacterianas utilizadas para el consorcio.

Nomenclatura inicial	Nomenclatura utilizada para el consorcio
F3P3	A
F3P6	B
F3N2	C
F1B1	D

El consorcio se evaluó en medio PVK y NBRIP para determinar su capacidad de solubilización y mineralización de P. Los tratamientos con mayor desempeño fueron aplicados en composta madura para cuantificar el P disponible y evaluar el efecto de la elicitación sobre la disponibilidad del P (Cuadro 2) (Rojas Padilla et al., 2020).

Cuadro 2. Combinaciones para consorcios de los microorganismos.

Medio	Concentración	Consorcio
PVK,	C-100	
A,	S-100	AB AC AD BC BD CD ABC ACD ABD BCD ABCD
N y B	Control	

Identificación molecular

Las cepas que conformaron el consorcio fueron identificadas mediante secuenciación del gen 16S rRNA. El ADN genómico, se evaluó su calidad y concentración mediante espectrofotometría y posteriormente se realizó la amplificación por PCR. Los resultados obtenidos fueron secuenciados y comparados con secuencias depositadas en la base de datos GenBank del NCBI para su identificación taxonómica (Rojas Padilla et al., 2020).

Incremento del fósforo disponible en composta madura

Finalmente, el mejor consorcio se aplicó en composta madura, para esto primero se preparó la composta madura la cual fue tamizada mediante una malla de 20 mesh y posteriormente hidratada hasta capacidad de campo (1:1, volumen/peso). Los tratamientos consistieron en la inoculación del consorcio bacteriano ABCD elicitado con S100 y sin nanopartículas como se muestra en el Cuadro 3. Los tratamientos se aplicaron por aspersión sobre la composta en una proporción del 20 %, ajustando la humedad con agua isotónica para favorecer una distribución homogénea, de acuerdo con el procedimiento descrito por Ortega-Torres et al. (2021). Posteriormente, se determinó el contenido de P total mediante el método de Bray (1945) y el P disponible mediante el método de Olsen (Hunter, 1977), análisis realizados en el Laboratorio de Suelos del INIFAP, Centro Experimental Bajío.

Cuadro 3. Descripción de tratamientos del consorcio MSF (ABCD) aplicados a la composta madura.

Descripción	Tratamiento
Consorcio elicitado	ME
Sobrenadante elicitado	SE
Consorcio elicitado + sobrenadante	ME+SE
Consorcio no elicitado	M
Sobrenadante no elicitado	S
Consorcio no elicitado + sobrenadante	M+S
Agua isotónica	C

Análisis estadístico

Todos los experimentos se realizaron por triplicado bajo un diseño completamente al azar. Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza y la comparación de medias se efectuó mediante la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0,05$), utilizando el software statgraphics.

Resultados y discusión

Aislamiento y selección de microorganismos solubilizadores de fósforo

El proceso de compostaje permitió el aislamiento de 20 microorganismos provenientes de las fases mesofílicas (Cuadro 4). Posteriormente la evaluación en los medios PVK y NBRIP permitió identificar diez aislados con capacidad para solubilizar y mineralizar P en diferentes condiciones de pH, evidenciando la diversidad funcional de la microbiota nativa del compostaje.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Billah et al. (2019), quienes señalan que los sistemas ricos en materia orgánica constituyen reservorios importantes de MSF. Asimismo, Li et al. (2019) describieron que las fases mesofílicas del compostaje favorecen el establecimiento de comunidades microbianas con elevada actividad metabólica, capaces de producir metabolitos involucrados en la movilización de nutrientes.

Cuadro 4. Microorganismos aislados de las fases mesófilas del proceso de compostaje.

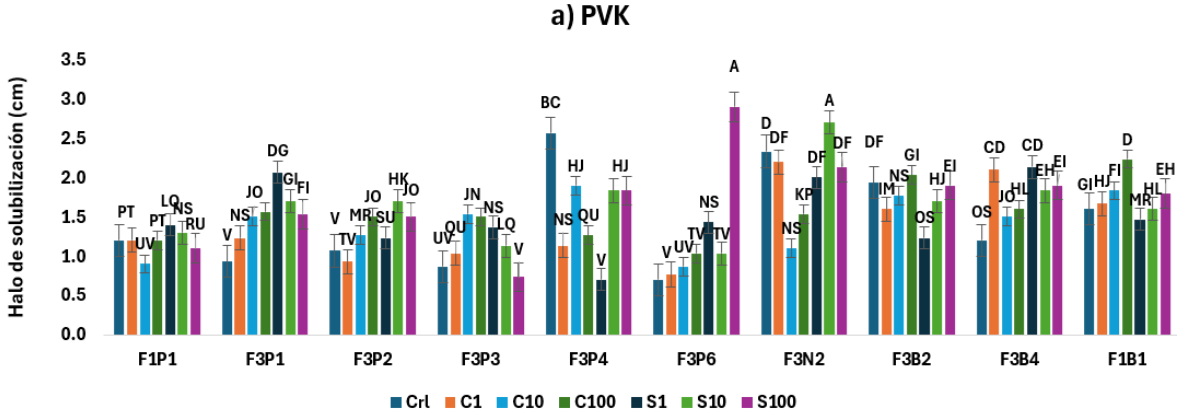
Solubilizadores		Mineralizadores	
Fase I	Fase III	Fase I	Fase III
F1P1	F3P1	F1B1	F3B1
F1P2	F3P2	F1A1	F3B2
F1P3	F3P3		F3B3
F1P4	F3P4		F3B4
FIP5	F3P5		F3N1
	F3P6		F3N2
			F3A2

Efecto de la elicitación con nanopartículas SBA-15

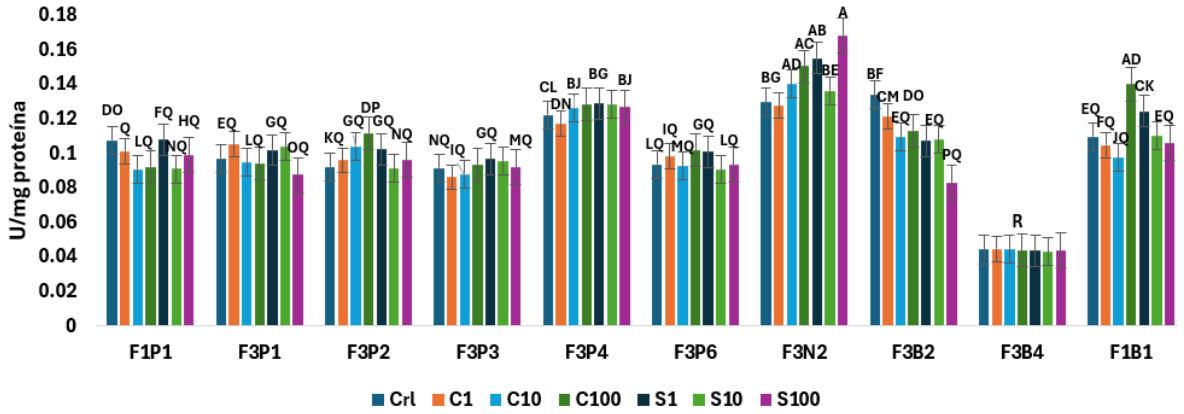
La elicitación con nanopartículas mesoporosas de sílice SBA-15 modificó la respuesta fisiológica de los microorganismos evaluados; sin embargo, el efecto dependió de la cepa, el tipo de nanopartícula y la concentración utilizada. La concentración de 100 ppm produjo las respuestas más consistentes, particularmente con la nanoestructura SBA-15 tradicional (S100). En la cepa F3P6, el diámetro del halo de solubilización aumentó aproximadamente tres veces respecto al control (3.0 frente a 0.9 cm), mientras que en otras cepas el incremento vario entre 1.0 y 2.5 cm (Figura 1a).

En la actividad fosfatasa ácida se observaron las mayores respuestas en las cepas F3P4, F3N2 y F1B1, con valores entre 0.13 y 0.17 U mg^{-1} de proteína (Figura 1b), mientras que la fosfatasa neutra mostró incrementos principalmente en las cepas F3P3, F3P6, F3N2 y F1B1 tras la aplicación de ambas nanoestructuras a 100 ppm (Figura 1c). En contraste, la fosfatasa básica presentó una respuesta menos uniforme, indicando que el efecto elicitor depende tanto del metabolismo de cada cepa como del sistema enzimático evaluado (Figura 1d).

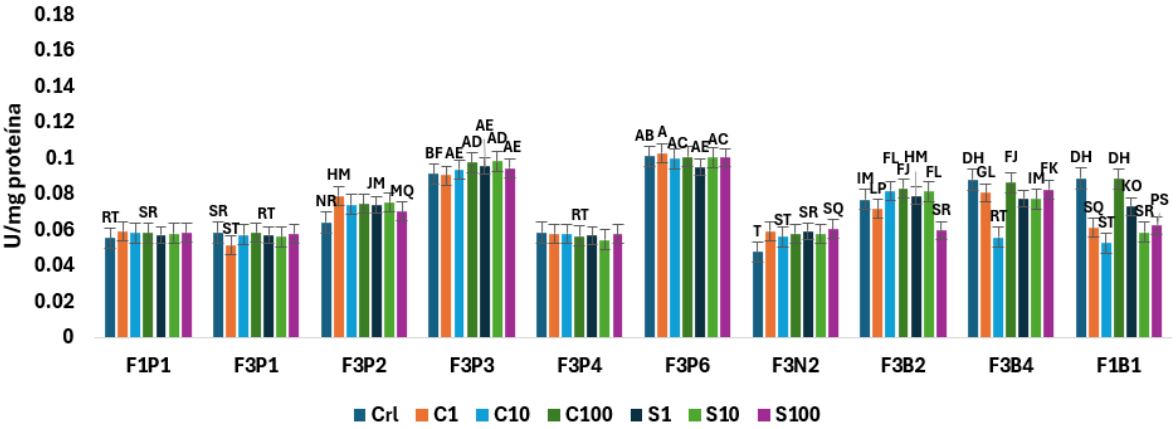
Estos resultados sugieren que las nanopartículas SBA-15 actuaron como elicitores fisiológicos, promoviendo una mayor producción de metabolitos relacionados con la solubilización y mineralización de P. Hallazgos similares fueron reportados por Ferrusquía-Jiménez et al. (2022), quienes observaron un incremento en la capacidad solubilizadora de bacterias promotoras del crecimiento vegetal después de la elicitación con nanopartículas de SiO_2. De igual manera, Hincapié-Rojas et al. (2020) indicaron que las nanoestructuras de sílice pueden inducir respuestas metabólicas que favorecen la síntesis de compuestos relacionados con la adquisición de nutrientes.



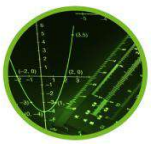
b) Fosfatasa ácida



c) Fosfatasa neutra



Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

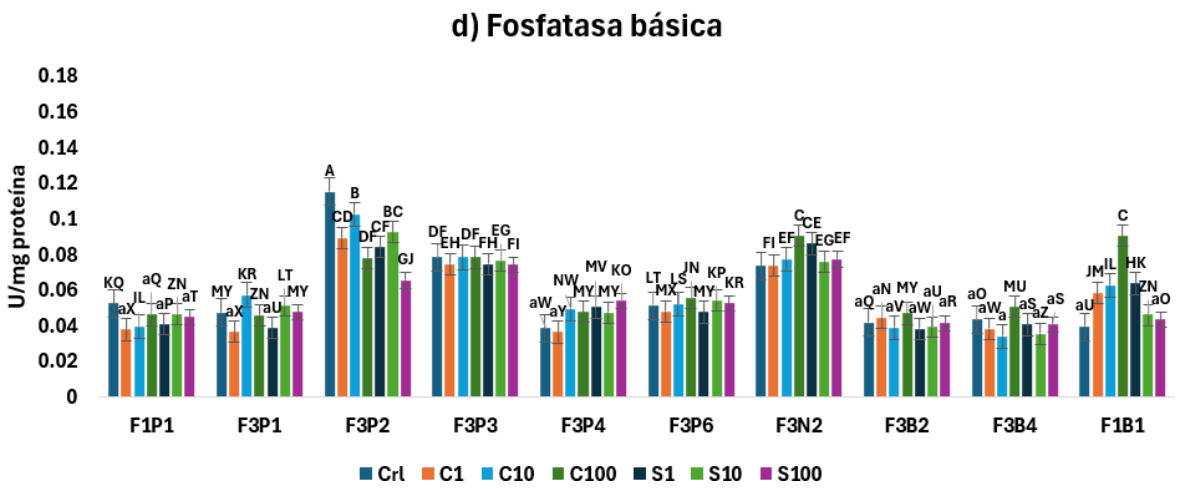


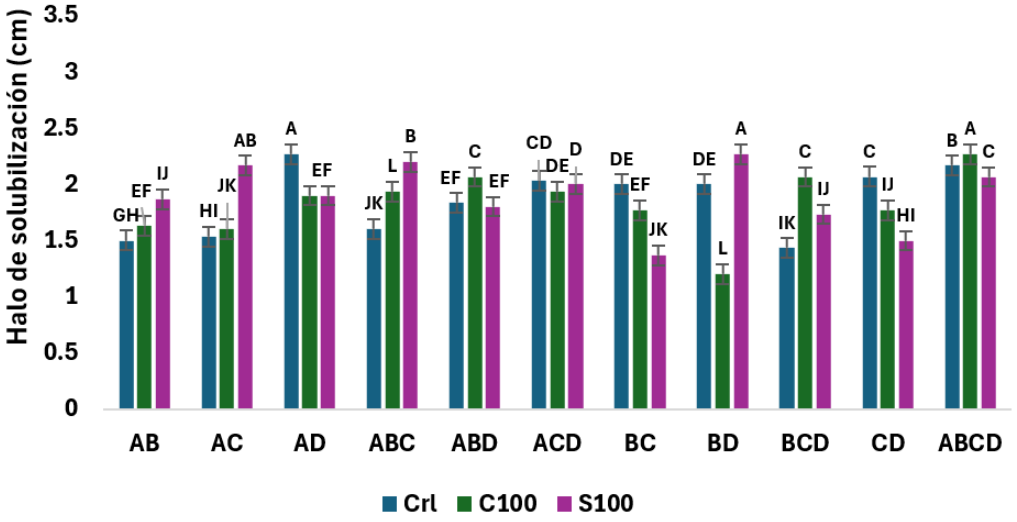
Figura 1. Microorganismos solubilizadores de fósforo aislados del compostaje con la capacidad metabólica de solubilizar y mineralizar en cada pH y elicitados con nanoestructuras de SiO2 SBA15 tradicional (S) y modificada (C). a) halos de solubilización de fósforo en PVK (cm). b) actividad específica enzimática fosfatasa ácida. c) fosfatasa neutra. e) fosfatasa básica.

Construcción del consorcio bacteriano

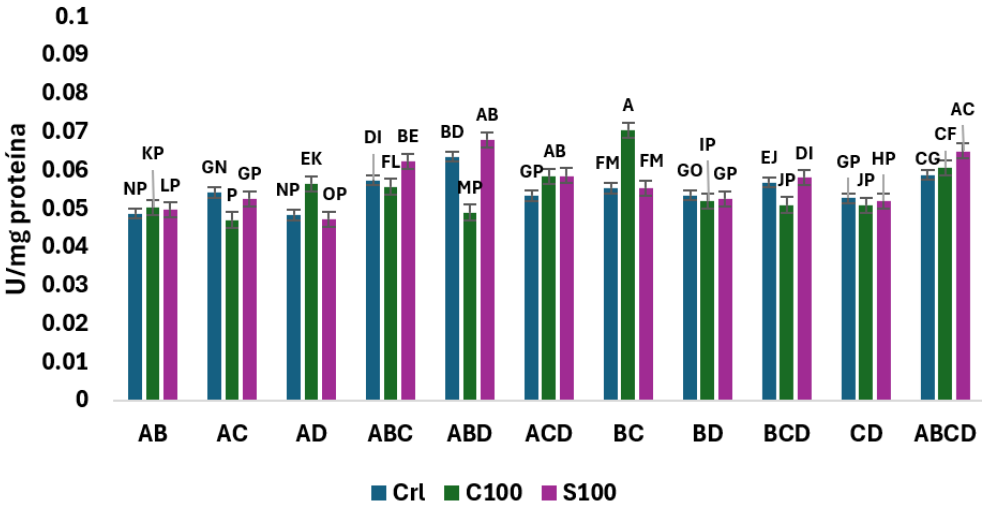
Las pruebas de biocompatibilidad demostraron que las cuatro cepas seleccionadas pudieron coexistir sin presentar antagonismo, permitiendo la formación del consorcio ABCD (Tabla 1). La evaluación de los diferentes consorcios reveló que la respuesta no fue lineal, ya que dependió de la combinación de microorganismos y del tipo de nanopartícula usada. El consorcio ABCD presentó el comportamiento más estable, alcanzando los mayores halos de solubilización con la nanoestructura C100 (Figura 2a) y los mayores valores de actividad fosfatasa ácida (Figura 2b) y neutra con S100 (Figura 2c), mientras que en fosfatasa básica no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 2d).

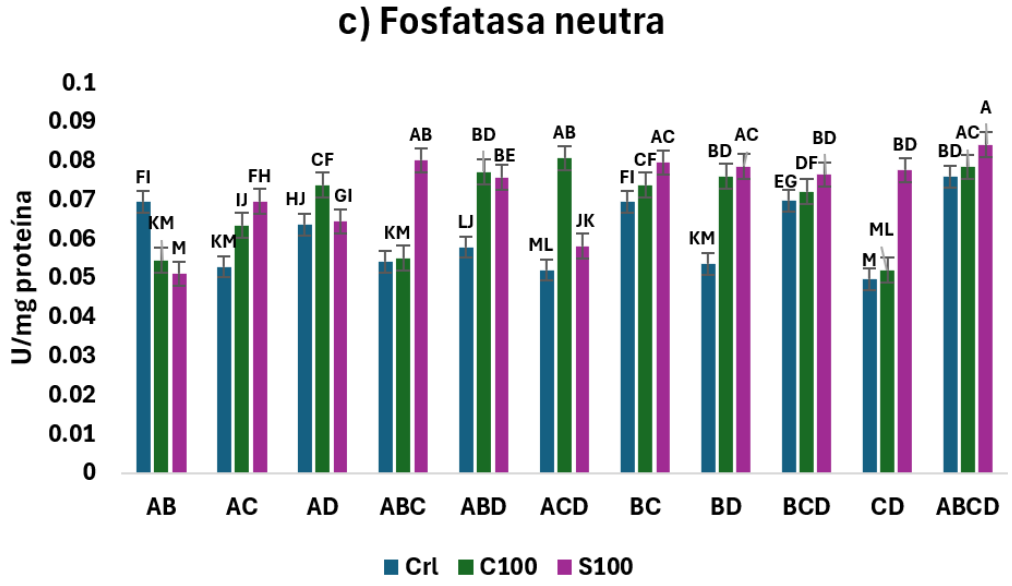
La superioridad del consorcio ABCD sugiere la existencia de interacciones sinérgicas entre los microorganismos que favorecieron la producción de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas, incrementando la movilización de P. Este comportamiento coincide con lo descrito por Díaz-Chuquizuta et al. (2024), quienes señalaron que los consorcios microbianos presentan mayor estabilidad funcional que las cepas individuales debido a la complementariedad metabólica entre sus integrantes.

a) PVK



b) Fosfatasa ácida





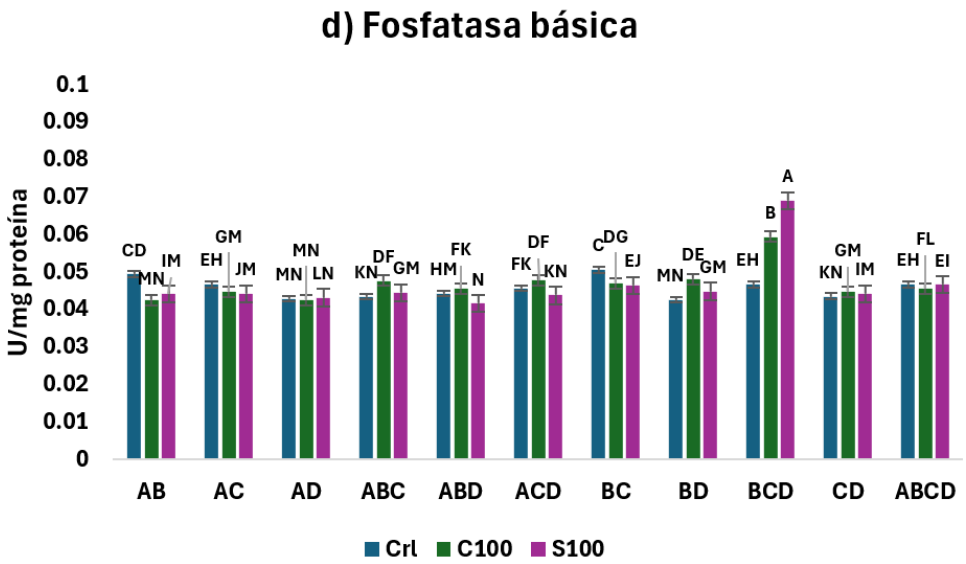


Figura 2. Construcción de consorcio solubilizador de fósforo nativo del compostaje elicitados con nanoestructuras de SiO2 SBA-15 tradicional (S) y modificada (C) en una concentración de 100 ppm. a) halo de solubilización. b) actividad específica enzimática fosfatasa ácida. c) fosfatasa neutra. d) fosfatasa básica.

Identificación molecular

La identificación molecular mediante secuenciación del gen 16S rRNA indicó que las cepas del consorcio correspondieron F3P3 y F1B1 presentaron mayor similitud con *Proteus vulgaris*, con porcentajes de identidad del 94 % y 48 %, respectivamente. Por su parte, las cepas F3P6 y F3N2 fueron identificadas como *Proteus mirabilis*, con identidades del 97 % y 94 %, respectivamente (Cuadro 5). Aunque estas especies son ampliamente conocidas por otros contextos biológicos, también se han reportado cepas ambientales con capacidad para participar en la transformación de nutrientes y promover procesos asociados con la disponibilidad de P.

Cuadro 5. Identificación de las cepas bacterianas mediante secuenciación del gen ARNr 16S y sus características morfológicas.

Cepa	Nombre científico	Similitud	Morfología
F3P3	*Proteus vulgaris*	94% de identidad	Bacilos rosados y agrupados
F3P6	*Proteus mirabilis*	97% de identidad	Bacilos rosados y empalizados
F3N2	*Proteus mirabilis*	94% de identidad	Bacilos y diplobacilos agrupados
F1B1	*Proteus spp.*	48% de identidad	Bacilos empalizados y estreptobacilos rosados

Incremento del fósforo disponible en composta madura

La aplicación del consorcio bacteriano elicitado en composta madura produjo el mayor incremento en la disponibilidad de P, alcanzando hasta un 21.75 % de solubilización del P total, equivalente a aproximadamente tres veces el valor obtenido en el tratamiento control. Los tratamientos basados únicamente en el consorcio o en sus sobrenadantes presentaron una respuesta inferior, lo que evidencia que la combinación entre microorganismos, sus metabolitos y la elicitación con SBA-15 genera un efecto sinérgico que favorece la movilización del P (Figura 3).

El porcentaje de P disponible obtenido en este estudio superó el 12 % reportado por Ortega-Torres et al. (2021), quienes emplearon un cóctel de fosfatasas y fitasas provenientes de *Pseudomonas aeruginosa*. La mayor eficiencia observada puede atribuirse al uso de microorganismos nativos del propio proceso de compostaje, adaptados al sustrato, así como

al efecto elicitor de las nanopartículas SBA-15, que promovieron una mayor producción de metabolitos relacionados con la solubilización y mineralización del P. Estos resultados demuestran que la integración de microbiología y nanotecnología constituye una estrategia para el desarrollo de bioinsumos capaces de incrementar la disponibilidad de P en sistemas agrícolas sostenibles.

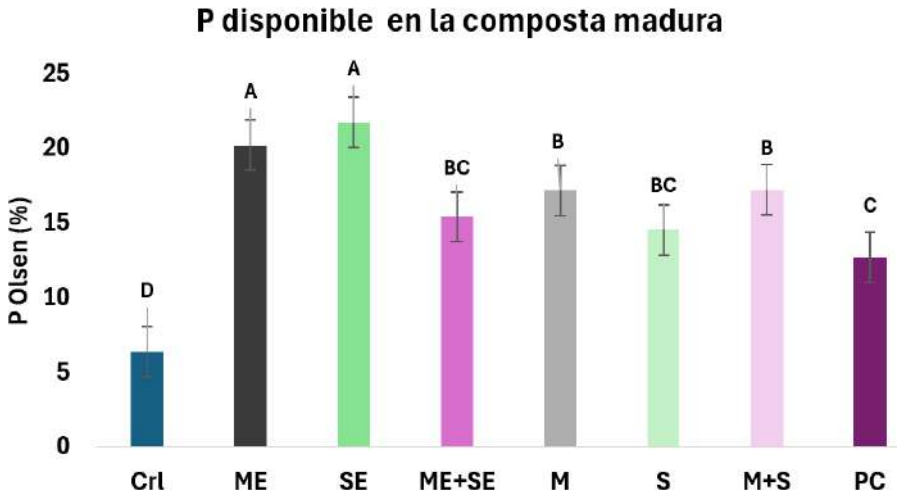


Figura 3. Conversión del P Total a P Olsen en composta madura de las pruebas de solubilización de fósforo, con agua desionizada como control

Conclusión

El aislamiento de microorganismos nativos provenientes de las fases mesofílicas del compostaje permitió identificar cepas con alta capacidad para solubilizar y mineralizar P, confirmando que este proceso constituye una fuente importante de microorganismos con potencial para el desarrollo de bioinsumos agrícolas. La elicitación con nanopartículas mesoporosas de sílice SBA-15 incrementó la actividad solubilizadora y mineralizadora de las cepas seleccionadas, favoreciendo la conformación de un consorcio bacteriano con mayor eficiencia en la movilización del P.

La aplicación del consorcio bacteriano elicitado incrementó la disponibilidad de P en composta madura hasta en un 21.75 %, superando los tratamientos sin elicitación y demostrando un efecto sinérgico entre los microorganismos y las nanopartículas SBA-15. Estos resultados evidencian que la integración de microbiología del compostaje y nanotecnología representa una estrategia innovadora para el desarrollo de bioinsumos que

mejoren el aprovechamiento del P y contribuyan a disminuir la dependencia de fertilizantes fosfatados convencionales.

Literatura citada

Billah, M., Khan, M., Bano, A., Hassan, T. U., Munir, A., & Gurmani, A. R. (2019). Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. *Geomicrobiology Journal, 36*(10), 904–916. https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1654043

Chandna, P., Nain, L., Singh, S., & Kuhad, R. C. (2013). Assessment of bacterial diversity during composting of agricultural residues. *BMC Microbiology, 13*, 99. https://doi.org/10.1186/1471-2180-13-99

Ferrusquía-Jiménez, N. I., Magaña-López, E., Palos-Barba, V., Zuverza-Mena, N., Vázquez-Hernández, M. C., White, J. C., Nava-Mendoza, R., Feregrino-Pérez, A. A., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2022). Elicitation of plant secondary metabolism by mesoporous silica nanoparticles. *Plants, 11*(24), 3445. https://doi.org/10.3390/plants11243445

Guevara-Santana, M. del P., Guevara-González, R. G., Angole-Tierrablanca, J., Rico-García, E., Torres-Pacheco, I., Palos-Barba, V., de los Santos-Villalobos, S., & Ortega-Torres, A. E. (2026). Phosphate-Solubilizing Microbiota of Compost Elicited with Different Silicon Oxide Nanostructures to Increase Their Mineralization and Solubilization Properties. *Microorganisms*, *14*(3), 519. https://doi.org/10.3390/microorganisms14030519

Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., & Mirza, M. S. (2021). Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 5*, 617157. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157

Kalayu, G. (2019). Phosphate solubilizing microorganisms: Promising approach as biofertilizers. *International Journal of Agronomy, 2019*, 4917256. https://doi.org/10.1155/2019/4917256

Li, Y., Li, W., Yang, X., et al. (2019). Dynamics of microbial communities and physicochemical properties during composting: A review. *Bioresource Technology, 284*, 1–11.

Lambers, H., Finnegan, P. M., Jost, R., Plaxton, W. C., Shane, M. W., & Stitt, M. (2015). Phosphorus nutrition in Proteaceae and beyond. *Nature Plants, 1*, 15109. https://doi.org/10.1038/nplants.2015.109

Magaña-López, E., Palos-Barba, V., Moreno-Martell, A., Vázquez-Hernández, M. C., White, J. C., Nava-Mendoza, R., Feregrino-Pérez, A. A., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2022). *Nanostructured mesoporous silica materials induce hormesis in pepper (Capsicum annuum L.) under greenhouse conditions*. *Heliyon, 8*, e09049. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09049

Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T. S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D. S., Wearing, C., Zhang, H., & Haygarth, P. M. (2018). Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: A review. *Plant and Soil, 427*, 5–16. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2

Ortega-Torres, A. E., Rico-García, E., Guzmán-Cruz, R., Torres-Pacheco, I., Tovar-Pérez, E. G., & Guevara-González, R. G. (2021). Addition of phosphatases and phytases to mature compost to increase available phosphorus: A short study. *Agronomy, 11*(12), 2555. https://doi.org/10.3390/agronomy11122555

Pikovskaya, R. I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connection with the vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya, 17*, 362–370.

Rojas Padilla, J., Chaparro Encinas, L. A., Robles Montoya, R. I., & De los Santos Villalobos, S. (2020). Promoción de crecimiento en trigo (*Triticum turgidum L. subsp. durum*) por la co-inoculación de cepas nativas de *Bacillus* aisladas del Valle del Yaqui, México. *Nova Scientia*, *12*(24). https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2136

Efecto del lixiviado de lombriz frente a fertilizantes químicos en el desarrollo del cultivo de rábano (*Raphanus sativus*)

Myrian Barrera-Abundes[50], Susana Martínez-Martínez[51], José Antonio Menes-Escalera[52]

Resumen

El rábano es un cultivo modelo que nos permite evaluar en corto tiempo el efecto de los fertilizantes, debido a ello el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de los fertilizantes orgánicos (lixiviado de lombriz) frente a los químicos, promoviendo una cultura sustentable, para esto se estableció un experimento en campo con la var. de rábano Seed Champion, una vez que germinaron las semillas se realizaron las aplicaciones de los fertilizantes en los tratamientos y sus tres repeticiones cada uno, estos consistieron en 500 ml/5 L-1 de lixiviado de lombriz, Bayfolan® 20 ml/5L-1 y el Testigo (5L-1 agua), las aplicaciones se realizaron vía foliar con la ayuda de un aspersor manual. Una vez que las plantas contaban con 27 días, se realizaron las mediciones respectivas de raíz, diámetro de fruto y peso. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de medias de Tukey para la correlación de raíz y diámetro de fruto considerando un nivel de significancia de $\alpha \leq 0.05$. De acuerdo con los resultados se encontraron diferencias estadísticas significativas (α=0.05) en diámetro y peso del fruto con el lixiviado de lombriz (3.13 cm) comparadas con el fertilizante Bayfolan® (2.60 cm) y el testigo (2.79 cm) y en peso el lixiviado de lombriz (40.00 g) supero de manera significativa al testigo (28.00 g) y al fertilizante Bayfolan® (23.65 g). El lixiviado de lombriz favoreció el crecimiento y desarrollo de las plantas, por ello, es recomendable su uso, además, es una práctica sustentable como lo requiere la producción de alimentos en el mercado actual.

Palabras clave: : *Eisenia foetida*; biofertilizantes; materia orgánica; biotecnología agrícola.

Abstract

Radish is a model crop that allows the evaluation of fertilizer effects within a short period of time. Therefore, the objective of this study was to evaluate the efficiency of organic fertilizers (vermicompost leachate) compared to chemical fertilizers, while promoting a sustainable culture. To

[50] Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos. Km. 2.35. Col. 24 de febrero, Morelos, México, CP. 62660. miryanbarrera7@gmail.com
[51] Área de Entomología y Acarología Agrícola, Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México Carretera Km. 36.5. México, CP. 56230. susyeid11@gmail.com
[52] [3]Escuela Secundaria No. 27. Calle No Reelección s/n, Colonia Josefa Ortiz de Domínguez, San Nicolás Galeana, Municipio de Zacatepec, Morelos, México. Código postal: 62780. Lic.menez@outlook.com

achieve this, a field experiment was established using the Seed Champion radish var. Once the seeds had germinated, fertilizer applications were carried out in the treatments **and** their three respective replicates. The treatments consisted of 500 mL/5 L^{-1} of vermicompost leachate, Bayfolan® 20 mL/5 L^{-1}, and the control treatment (5 L^{-1} water). Applications were performed via foliar spraying with the aid of a manual sprayer. When the plants reached 27 days of growth, the corresponding measurements of root length, fruit diameter, and weight were recorded. An analysis of variance (ANOVA) and Tukey's mean comparison test were applied to determine the correlation between root length and fruit diameter, considering a significance level of $\alpha \leq 0.05$. According to the results, statistically significant differences ($\alpha = 0.05$) were found in fruit diameter and weight with the vermicompost leachate treatment (3.13 cm) compared to the Bayfolan® fertilizer treatment (2.60 cm) and the control treatment (2.79 cm). In terms of weight, the vermicompost leachate treatment (40.00 g) significantly outperformed both the control treatment (28.00 g) and the Bayfolan® fertilizer treatment (23.65 g). Vermicompost leachate promoted plant growth and development; therefore, its use is recommended. Furthermore, it represents a sustainable practice, as required by current food production systems and market demands.

Keywords: *Eisenia foetida*, biofertilizers; organic matter; agricultural biotechnology.

Introducción

El cultivo del rábano (*Raphanus sativus*), es una hortaliza de raíz comestible perteneciente a la familia Brassicaceae, se conoce principalmente por su sabor picante y su textura crujiente, en México se siembran aproximadamente 2,423 hectáreas y se producen 55,640 ton de rábano por año, por ser de rápido crecimiento y sensible a las condiciones del suelo, se presenta como un modelo ideal para evaluar el impacto de diferentes tipos de fertilización (Mamani 2015). En este caso la elección de fertilizantes adecuados es muy importante para garantizar la productividad y la calidad de los cultivos, sin embargo, la decisión entre fertilizantes orgánicos o químicos es muy compleja y siempre depende de varios factores como el precio, el clima, tipo de cultivo, suelo y en ocasiones algunos objetivos de producción. El tema de los fertilizantes químicos que son productos sintéticos diseñados para proporcionar nutrientes muy específicos a las plantas de una manera más rápida y eficiente, pueden ser de origen mineral o síntesis química y se comercializan en polvo, granulados o líquidos ya que así se pueden aplicar de una forma más precisa (Guardiola-Márquez et al., 2019) Sin embargo, el uso intensivo de fertilizantes químicos ha contribuido significativamente al aumento de la productividad de los cultivos, su aplicación continua y excesiva ha generado preocupaciones ambientales, como la contaminación del suelo y del agua, así como la disminución de la fertilidad natural del suelo a largo plazo, debido a que ha alcalinizado los suelos (Chittora 2023).

Por otro lado, están los fertilizantes orgánicos que se derivan de los materiales naturales como el estiércol, compost (desechos de hortalizas), minerales, entre otros, está es una opción más sostenible y respetuosa con el ambiente, el lixiviado de lombriz es un biofertilizante natural que contiene macro y microelementos esenciales para las plantas, así como microorganismos y algunos otros compuestos

(Márquez et al. 2019). Sin embargo, existe una falta de estudios comparativos sistemáticos que analicen de manera cuantitativa y cualitativa los efectos del lixiviado de lombriz en contraste con los fertilizantes químicos convencionales en términos de crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo. Ante esta situación, surge la necesidad de investigar cuál de estos fertilizantes genera un mayor beneficio para el desarrollo del rábano, tanto desde una perspectiva agronómica como ambiental. ¿Cuál es el efecto real del lixiviado de lombriz en comparación con los fertilizantes químicos sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del rábano? ¿Es posible sustituir o complementar el uso de fertilizantes químicos con alternativas orgánicas más sostenibles sin afectar negativamente la productividad? de ahí surge la hipótesis, el uso de fertilizante orgánico (lixiviado de lombriz) produce un efecto significativamente diferente en el crecimiento del rábano en comparación con el fertilizante químico. Bajo este contexto, se planteó el objetivo general que fue evaluar el efecto del lixiviado de lombriz frente a fertilizantes químicos en el desarrollo del rábano, promoviendo una cultura sustentable, bajo los objetivos específicos, comparar el rendimiento del cultivo (peso y tamaño) entre tratamientos con lixiviado de lombriz y químico, analizar la correlación de la raíz y el diámetro del fruto.

Materiales y Métodos

El experimento se realizó en terrenos de la escuela secundaria técnica no. 11. Ubicada en Zacatepec de Hidalgo, Morelos. Para establecer el experimento en campo, se prepararon las camas de siembra (2.5 x 1 m) con lo cual inicio el proceso de establecimiento del experimento.

Se realizo la siembra directa de semillas de rábano NORTON seed variedad Champion a 5 cm de distancia entre semilla y 1cm de profundidad esto con la finalidad de que el fruto presentara un buen desarrollo radicular (Sánchez, 2018) en un espacio amplio y sin complicaciones, al terminar la siembra se cubrió con una ligera capa de rastrojo seco y se regó hasta humedecer completamente la tierra, con la finalidad de que el suelo retuviera la humedad por más tiempo hasta la emergencia de las semillas.

Los riegos se realizaron por las mañanas (7:00 am) y por las tardes (2:00 pm), para que las plantas no perdieran humedad por las altas temperaturas presentes en la zona de estudio, además, se tuvo especial cuidado evitando el exceso de riego cercano a la madurez para evitar inducir que la planta desarrollara raíces laterales.
Para la producción del lombricompost y por consiguiente la obtención del lixiviado de lombriz se llevó a cabo de la siguiente forma. Un bidón reciclado se cortó a la mitad y se colocó sobre una base de metal para proteger la lombricomposta de algún agente externo. La estructura posee una pendiente de 0.2 m para facilitar la recolección del lixiviado, el cual es drenado hasta un contenedor de 20 L donde posteriormente es recolectado y filtrado para su utilización, metodología propuesta por Guardiola-Márquez et al. (2019). El sustrato para el compostaje consistió en colocar capas, primero se depositó un bulto de estiércol de vaca y uno borrego a cada contenedor, se integraron residuos vegetales que fueron proporcionados por los integrantes de la escuela secundaria (estudiantes,

administrativos etc.) y finalmente se incorporó lombriz roja californiana y se regó dos veces por semana con la cantidad de 5 L-1 dependiendo de la temperatura, posteriormente fue regada con menor cantidad 2.5 L-1 debido a la presencia de lluvias.

Una vez seleccionado el lugar de los tratamientos, se realizaron las aplicaciones de los productos con una mochila aspersora, en el tratamiento lixiviado de lombriz (500ml/5L-1 de agua), Bayfolan® (20ml/5L-1 de agua), y el testigo (5L-1 de agua), las aplicaciones se hicieron cada dos días durante 3 semanas, posteriormente ya no se regó por la presencia de lluvias sólo en el caso del testigo, los demás tratamientos siguieron igual.
A la par de las aplicaciones se estuvo monitoreando el desarrollo de los frutos en cada tratamiento, esto se realizó para ir viendo el crecimiento y saber el momento exacto de la cosecha. La técnica utilizada para la recolección de plantas se consideró tomando en cuenta la observación directa y el tiempo que fue de 27 días. Para ello, realizó una revisión diaria, esto con la finalidad de monitorear el desarrollo y crecimiento adecuado de los rábanos, así como también asegurar que las plantas estuvieran libres de plagas y enfermedades o que tuviera presencia de alguna maleza.

Análisis de datos

La investigación corresponde a un diseño experimental, en el cual la variable independiente correspondió al fertilizante aplicado (lixiviado de lombriz y fertilizante químico), con la finalidad de evaluar el efecto de estos sobre el crecimiento y desarrollo del rábano. Para ello se empleó un diseño completo al azar, en el que las unidades experimentales (plantas) se distribuyeron en 2 tratamientos y un testigo con 3 repeticiones cada una. En el caso del tratamiento con lixiviado de lombriz (biofertilizante orgánico) y Bayfolan® (fertilizante químico) y el tratamiento testigo. Es importante mencionar que los tratamientos se desarrollaron en las mismas condiciones de suelo (pH de 6.5, textura arcillo arenoso y manejo del cultivo).

Durante el establecimiento del experimento se registraron variables como diámetro del fruto, pesos y largo de raíz al momento de la cosecha que ocurrió a los 27 días. Los datos obtenidos se analizaron y se compararon para determinar cuál de los tratamientos presento mejores resultados en las variables antes mencionadas del rábano. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de medias de Tukey para la correlación de raíz y diámetro de fruto considerando el nivel de significancia de $\alpha \leq 0.05$.

Resultados y discusión

El crecimiento de los cultivos depende en gran medida de los fertilizantes, ya sean químicos u orgánicos debido a que aportan nutrientes esenciales para el óptimo crecimiento y desarrollo. Se evaluó el efecto de dos tratamientos uno a base de lixiviado de lombriz y el otro de un fertilizante químico en el desarrollo del rábano que incluye diámetro y peso. De acuerdo con los análisis estadísticos, se encontraron diferencias estadísticas significativas en las variables evaluadas, en el

caso del diámetro (Figura 1) fue significativamente mayor (α=0.05) usando lixiviado de lombriz (3.13 cm) en comparación con el fertilizante Bayfolan® (2.60 cm) y el testigo (2.79 cm), tal como lo reporta Mamani (2015) quien menciona valores similares en el diámetro de los rábanos (3.52 a 3.4 cm) al aplicar compuestos a base de lombricompostas o lixiviados. Por otro lado Bidabadi *et al*., (2017) y Guardiola-Márquez *et al*., (2019) mencionan que al incorporar lixiviado de lombriz como fertilizante encontraron efectos significativos en el desarrollo y rendimiento de *Alllium cepa* (cebolla) y *Spinacia oleracea* (espinaca), esto es debido a que se están incorporando nutrientes asimilables como potasio, nitrógeno, manganeso y zinc, además de estos, se adicionan microorganismos involucrados en procesos de nitrificación, solubilización de minerales del suelo, lo cual repercute directamente sobre el desarrollo, crecimiento y sanidad de las plantas.

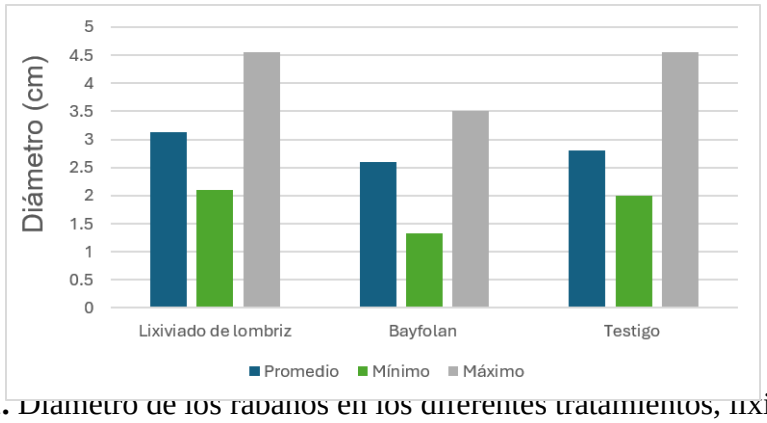


Figura 1. Diámetro de los rábanos en los diferentes tratamientos, lixiviado de lombriz, Bayfolan® y testigo.

Con respecto al tratamiento de fertilizante sintético (Bayfolan®) que incluso fue superado de manera significativa por el testigo, esto pudo deberse a las diferencias encontradas entre los tratamientos como son los factores edafológicos y climáticos (suelo y temperatura),

En cuanto a la longitud de raíz de estos, no se observaron diferencias estadísticas significativas (α=0.05), cuyos valores fueron de 5.05 cm, 5.47 cm y 4.94 cm para el lixiviado de lombriz, Bayfolan® y el testigo respectivamente (Figura 2).

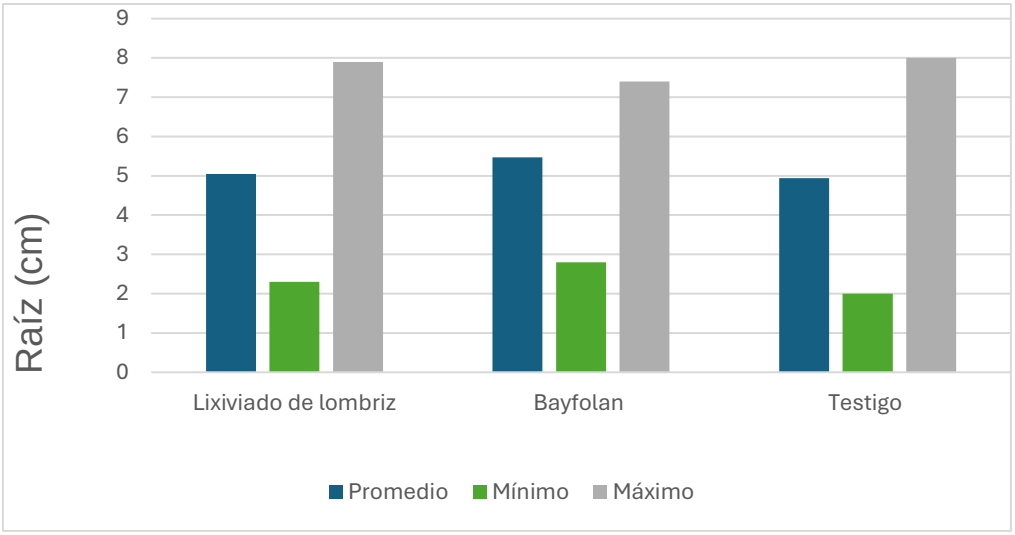


Figura 2. Longitud de la raíz del rábano en los diferentes tratamientos

El peso de los rábanos con el lixiviado de lombriz (40.00 g) supero de manera significativa al testigo (28.00 g) y al fertilizante Bayfolan® (23.65 g), con lo que se destaca que el uso del lixiviado de lombriz es más recomendable para la fertilización de los rábanos y es una práctica sustentable como lo requiere la producción de alimentos en el mercado actual (Figura 3), datos similares fueron mencionados por Chugchilan *et al*. (2024) y Carrera (2015), quienes al evaluar el peso del rabanito que fue fertilizado con biofertilizante a base de lombricomposta presento mayor peso comparado con uno al que sólo le fue administrada agua, estos autores mencionan que la utilización del lixiviado de lombriz es recomendable para la fertilización de los rábanos, además, de ser una práctica sustentable como lo requiere la producción de alimentos en el mercado actual.

Conclusiones

De acuerdo con los datos presentados de variables evaluadas, se encontró que la concentración de 500 ml/L agua de lixiviado de lombriz presento un efecto favorecedor en el peso, diámetro del fruto comparado con el producto químico y testigo, por lo que la utilización de este biofertilizante, sumado a las características propias de la planta, suelo y las condiciones ambientales, favorecen el crecimiento de las plantas y garantizan su crecimiento y desarrollo óptimo.

Literatura Citada

Bidabadi, S.S., Dehghanipoodeh, S., and Wright, G.C. (2017). Vermicompost leachate reduces some negative effects of salt stress in pomegranate. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 6(3), 255-263.

Carrera, J. (2015). Respuesta agronómica del cultivo de rábano (Raphanus sativus, L.) a la aplicación de abonos orgánicos. Tesis de Grado. Universidad Técnica de Cotopaxi. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales 63p.

Chittora, D., Parveen, T., Yadav, J., Meena, B.R., Jain, T., Sharma, K. (2023). Harmful Impact of Synthetic Fertilizers on Growing Agriculture and Environment. Glob J Pharmaceu Sci. 2023; 11(1): 555804 http://dx.doi.org/10.19080/GJPPS.2022.11.555804

Chugchilan, A. B. R., Quishpe, G. J. A. (2024). "Evaluación de la producción y calidad de rábano (Raphanus sativus) con la aplicación de diferentes abonos orgánicos". La Maná, Ecuador. 10pp.

Guardiola-Márquez, C. E., Pacheco, M. A., Senés-Guerrero, C. (2019). Evaluación de biofertilizantes a base de microorganismos y lixiviado de vermicomposta en cultivos de interés económico en México. Agroproductividad (12):3. pp 53-61.

Mamani, R. (2015). Evaluación del cultivo de rábano chino (*Raphanus sativus* L.) con la aplicación de compost y humus de lombriz a dos densidades de siembra bajo condiciones atemperadas en la zona de Achumani, Municipio de la Paz. [Tesis de Grado]. La Paz. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Ingenieria Agronómica. p 112.

Efecto del neodimio en el contenido foliar de Fe, Cu y Zn en lechuga cultivada en hidroponía

Imelda Rueda-López[53], Fernando Carlos Gómez-Merino, Libia Iris Trejo-Téllez[54], Manuel Sandoval-Villa

Resumen

El uso de bioestimulantes es una estrategia prometedora para optimizar la nutrición mineral y la productividad en cultivos de interés económico. Entre ellos, los elementos benéficos como el neodimio (Nd), han mostrado efectos positivos en el crecimiento vegetal y la absorción de nutrimentos; sin embargo, existe información limitada sobre la influencia de este elemento benéfico en la acumulación de micronutrimentos en hortalizas hidropónicas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de Nd en el contenido foliar de Fe, Cu y Zn en lechuga cv. Starfighter cultivada en un sistema hidropónico de raíz flotante bajo condiciones de invernadero. Durante 48 d se evaluaron cuatro dosis de Nd (0, 20, 40 y 60 µM), suministradas a la solución nutritiva universal Steiner a partir de $NdCl3 \cdot 6H2O$. Al finalizar el ciclo de cultivo, se cuantificó el contenido foliar de los micronutrimentos. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando SAS. Todas las dosis de Nd incrementaron los contenidos de Fe, Cu y Zn, siendo 60 µM la que produjo los mayores incrementos, de 123.6, 69.9 y 148.7%, respectivamente, en comparación con el testigo. Estos resultados indican que el suministro de Nd favorece la acumulación foliar de micronutrimentos, mejorando la calidad nutrimental de la lechuga cultivada en hidroponía.

Palabras clave: lantánidos, biofortificación, bioestimulación, nutrición mineral, micronutrimentos

Abstract

The use of biostimulants is a promising strategy for optimizing mineral nutrition and productivity in economically important crops. Among these, beneficial elements such as neodymium (Nd), have demonstrated positive effects on plant growth and nutrient uptake;

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

however, information regarding the influence of this beneficial element on micronutrient accumulation in hydroponic vegetables is limited. This study aimed to evaluate the effect of different Nd concentrations on the foliar contents of Fe, Cu, and Zn in Starfighter lettuce grown in a floating-root hydroponic system under greenhouse conditions. Four Nd concentrations (0, 20, 40, and 60 µM), supplied as $NdCl_3 \cdot 6H_2O$ through the universal Steiner nutrient solution, were evaluated over 48 days. At the end of the cultivation cycle, foliar micronutrient contents were quantified. Data were subjected to analysis of variance and Tukey's mean comparison test ($p \leq 0.05$) using SAS. All Nd concentrations increased the foliar contents of Fe, Cu, and Zn, with the 60 µM treatment producing the greatest increases of 123.6, 69.9, and 148.7%, respectively, compared with the control. These results indicate that Nd supplementation promotes foliar micronutrient accumulation, suggesting its potential as a complementary strategy to improve the mineral nutrition of hydroponically grown lettuce.

Keywords: lanthanides, biofortification, biostimulation, mineral nutrition, micronutrient

Introducción

El suministro de alimentos suficientes, nutritivos y producidos de manera sostenible para una población mundial en crecimiento representa uno de los principales desafíos de la agricultura. El contenido de micronutrimentos en los cultivos alimentarios requiere especial atención, debido a que su disponibilidad en el medio de cultivo y su acumulación en los tejidos vegetales influyen en la productividad y la calidad nutricional de las plantas (Assunção et al., 2022). Un contenido insuficiente de micronutrimentos en los alimentos de origen vegetal puede contribuir a una ingesta inadecuada y tener consecuencias para la salud humana, particularmente en poblaciones cuya dieta depende en gran medida de este tipo de alimentos (Van der Straeten et al., 2020).

Las plantas requieren ocho micronutrimentos: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn), para completar adecuadamente su ciclo de vida (Broadley et al., 2012). Si bien son requeridos en concentraciones relativamente bajas, Fe, Cu y Zn desempeñan funciones esenciales en el desarrollo vegetal. El Fe participa en la fotosíntesis, la respiración, la biosíntesis de clorofilas y la asimilación de N y S; el Cu interviene en la fotosíntesis, la eliminación de especies reactivas de oxígeno y la síntesis de la pared celular; mientras que el Zn cumple funciones estructurales y catalíticas en numerosas proteínas y enzimas. Por tanto, mantener niveles adecuadas de estos

elementos es indispensable para el funcionamiento metabólico y el desarrollo de las plantas (Lilay et al., 2024).

La lechuga (Lactuca sativa L.) es un cultivo de interés tanto por su amplia distribución y consumo como por su contribución a la alimentación humana. Además de su bajo aporte calórico, sus hojas aportan diversos compuestos de interés nutricional, entre ellos vitaminas, fibra y minerales. El perfil nutrimental de la lechuga puede variar entre tipos y cultivares, y esta influenciada por las condiciones del cultivo y el manejo nutrimental (Yang et al., 2022; Sahin, 2023).

La hidroponía constituye una alternativa de producción agrícola sin suelo que permite cultivar las plantas bajo condiciones controladas de crecimiento. Este sistema ha adquirido relevancia debido a su capacidad para mejorar la eficiencia en el uso de recursos y producir cultivos de alto rendimiento y calidad por unidad de superficie, particularmente en contextos donde existen limitaciones de agua o suelo agrícola (Wang et al., 2024). En sistemas hidropónicos, donde la nutrición mineral depende directamente de la composición de la solución nutritiva, es importante evaluar estrategias que favorezcan la adquisición y acumulación de nutrimentos en los tejidos vegetales (Sambo et al., 2019).

Los bioestimulantes constituyen una herramienta complementaria para mejorar el desempeño de los cultivos, al estimular procesos naturales de las plantas relacionados con la eficiencia en el uso de nutrimentos, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad del cultivo, independientemente de su contenido nutrimental (du Jardin, 2015; Quille et al., 2026).

Actualmente existen siete categorías de bioestimulantes: ácidos húmicos y fúlvicos; hidrolizados de proteínas y compuestos nitrogenados; extractos de algas y plantas superiores; quitosano y otros biopolímeros; compuestos inorgánicos; hongos benéficos; y bacterias benéficas (du Jardin, 2015).

Dentro de los compuestos inorgánicos con potencial bioestimulante, los lantánidos han cobrado interés debido a su capacidad para modular diversos procesos fisiológicos, bioquímicos y metabólicos en las plantas. Cuando se aplican en dosis adecuadas, estos elementos pueden promover el crecimiento, modificar el estado nutrimental y activar respuestas adaptativas frente a condiciones de estrés abiótico. No obstante, la magnitud de estos efectos puede variar en función de la especie vegetal, el elemento aplicado y la concentración utilizada (Gómez-Merino et al., 2023).

El neodimio (Nd), miembro del grupo de los lantánidos, ha mostrado efectos positivos en plantas, al estimular la germinación, el crecimiento vegetativo, la síntesis de clorofilas y el desarrollo radicular, así como la calidad y rendimiento de los cultivos (Zhang et al., 2013; Abou El-Nour y Attia, 2022). A pesar de estos avances, la información disponible sobre la influencia del Nd en la acumulación de micronutrimentos en hortalizas de hoja cultivadas en hidroponía aún es limitada.

Por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de Nd en el contenido foliar de Fe, Cu y Zn en plantas de lechuga (Lactuca sativa L.) cultivadas en hidroponía.

Materiales y métodos

Ubicación

El experimento se realizó en condiciones de invernadero, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, en Montecillo, Estado de México (19.96° LN, 98.9° LO y 2244 m de altitud).

Almácigo

Semillas de lechuga (Lactuca sativa L.) cv. Starfighter se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades con turba (PRO-MIX FLX, Canadá) como sustrato. Se colocó una semilla por cavidad a una profundidad aproximada de 5 mm. Las charolas se regaron con agua potable cada dos días y las plántulas se monitorearon periódicamente para evaluar su crecimiento.

Condiciones de cultivo

Plántulas de 40 d de edad se establecieron en un sistema hidropónico de raíz flotante, utilizando contenedores de plástico con capacidad de 900 mL. La nutrición se aportó con la solución nutritiva Universal Steiner (Steiner, 1984), suministrada al 50% durante los primeros 10 d después del trasplante y al 100% hasta la cosecha. La solución nutritiva se oxigenó mediante un sistema de aireación programado cada 3 h durante 15 min (Figura 1).

Diseño experimental y tratamientos

Se estableció un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en la aplicación de 0, 20, 40 y 60 µM de Nd, suministrado como $NdCl_3 \cdot 6H_2O$ (Sigma-Aldrich, EE. UU.) mediante la solución nutritiva Universal

Steiner. La unidad experimental fue una planta de lechuga cultivada individualmente en un contenedor en el sistema hidropónico de raíz flotante. Los tratamientos iniciaron en plantas de 50 d de edad y se aplicaron durante 48 días. El agua consumida se repuso cada 3 d y el pH de la solución nutritiva se ajustó a 5.5 con H_2SO_4 1 N.

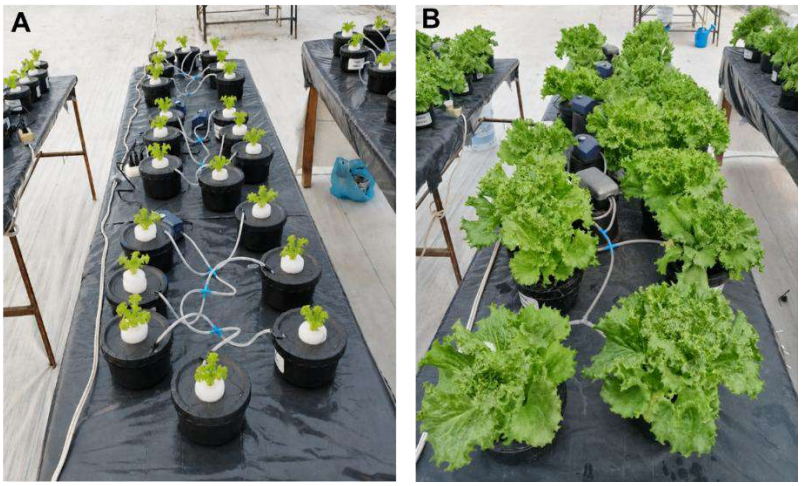


Figura 1. Sistema hidropónico de raíz flotante utilizado para evaluar la respuesta de las plantas de lechuga (Lactuca sativa L.) cv. Starfighter a diferentes concentraciones de Nd (0, 20, 40 y 60 µM). Plantas al inicio del experimento (A). Plantas al final del ciclo de cultivo (B).

Variables evaluadas

Al finalizar el ciclo de cultivo, se cosecharon las plantas de lechuga. Las hojas se secaron en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125; Guadalajara, México) a 70 °C durante 72 h. El tejido seco se molió hasta obtener partículas menores de 2 mm. Para la determinación de Fe, Cu y Zn, se pesaron 0.5 g de tejido vegetal seco y se adicionó una mezcla de HNO3:HClO4 (2:1, v:v). Las muestras se colocaron en una plancha de digestión a 160 °C, posteriormente se filtraron y se aforaron a 25 mL con agua desionizada. Las concentraciones de Fe, Cu y Zn se determinaron mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES; Agilent, 725-ES, EE. UU.). Con los valores de la biomasa seca foliar y las concentraciones de estos elementos se estimó su contenido.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el software Statistical Analysis System (SAS, 2009), versión 9.4.

Resultados y discusión

Los lantánidos pueden modificar diversos procesos fisiológicos de las plantas. Aunque no se consideran elementos esenciales, algunos elementos pueden ejercer respuestas horméticas, con efectos favorables a determinadas concentraciones y respuestas inhibitorias cuando se supera un umbral de tolerancia. Estas respuestas se han relacionado con cambios en la absorción y distribución de nutrimentos, la actividad metabólica, la fotosíntesis y el crecimiento vegetal (Hu et al., 2004; Dang et al., 2024; Grosjean et al., 2024).

Los lantánidos pueden interactuar de manera sinérgica o antagónica con otros elementos esenciales, modulando la absorción, acumulación y utilización nutrimental. Por ejemplo, en soya (Glycine max), de Oliveira et al. (2015) evaluaron concentraciones de 5-160 µM La y observaron incrementos en los contenidos de Ca, P, K y Mn, mientras que Cu y Fe disminuyeron con la aplicación de La. De manera similar, en arroz (Oryza sativa), la aplicación de Ce modificó la nutrición mineral de raíces y brotes, con respuestas diferenciadas entre los elementos evaluados (Liu et al., 2012). Este comportamiento evidencia que la respuesta nutricional frente a un mismo lantánido no es uniforme entre nutrimentos.

En contraste con estas respuestas diferenciales, bajo nuestras condiciones experimentales, la aplicación de Nd incrementó significativamente el contenido foliar de los micronutrimentos evaluados en las plantas de lechuga. El tratamiento con 60 µM Nd presentó los mayores contenidos de Fe, Cu y Zn, con incrementos de 123.6, 69.9 y 148.7 %, respectivamente, en comparación con el testigo (Figuras 2–4). El Fe mostró una respuesta claramente progresiva, ya que su contenido aumentó conforme se incrementó la concentración de Nd en la solución nutritiva. Cada tratamiento presentó diferencias significativas respecto al anterior (Figura 2), lo que evidencia una respuesta dependiente de la dosis dentro del intervalo evaluado. Esta tendencia resulta relevante debido a que el Fe participa en procesos fundamentales como la transferencia de electrones, la síntesis de clorofila, la fotosíntesis, la respiración y el metabolismo energético (Ning et al., 2023); por tanto, una mayor disponibilidad o acumulación foliar de este elemento puede contribuir al mantenimiento de procesos fisiológicos asociados con el crecimiento.

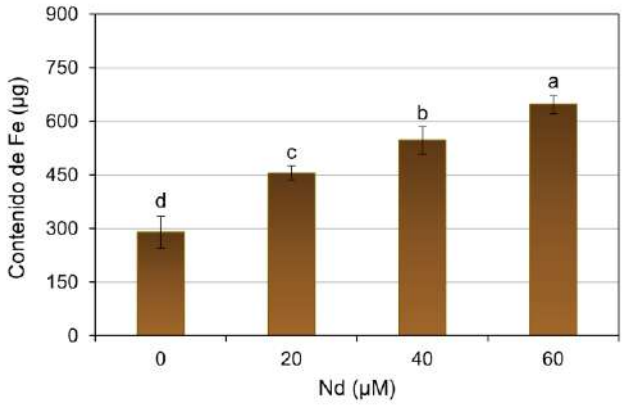


Figura 2. Contenido foliar de Fe en lechuga (Lactuca sativa L.) cv. Starfighter en respuesta a diferentes niveles de neodimio (Nd). Medias ± DE con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

En contraste, el contenido de Cu presentó un comportamiento distinto, debido a que los tratamientos de 0, 20 y 40 µM Nd no difirieron estadísticamente entre sí, mientras que la aplicación de 60 µM Nd incrementó significativamente su contenido (Figura 3). Por su parte, el contenido de Zn aumentó con la aplicación de Nd; sin embargo, los tratamientos de 20 y 40 µM Nd fueron estadísticamente similares, alcanzándose el mayor contenido con 60 µM Nd (Figura 4). En conjunto, estas respuestas muestran patrones diferenciales de acumulación de Fe, Cu y Zn en respuesta a las concentraciones de Nd evaluadas.

Nuestros resultados coinciden con lo reportado en lechuga cv. Ruby Sky donde la aplicación de Nd favoreció la acumulación de macro y micronutrimentos, además de ejercer un efecto bioestimulante que mejora la nutrición vegetal y potencia la biofortificación con Zn (Rueda-López et al., 2025). De manera similar, Ramírez-Antonio et al. (2023) demostraron que la aplicación de Nd en caña de azúcar Mex 69-290 cultivada en hidroponía promovió el crecimiento vegetal, favoreció la concentración de N, P y K, y estimuló procesos metabólicos asociados con un mejor desempeño fisiológico. En contraste, Shi et al. (2021) reportaron decrementos en las concentraciones foliares de K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu y Zn, al tratar plántulas de arroz con dosis de 100 y 1000 µM Nd.

La diferencia entre ambos estudios indica que el Nd puede presentar una ventana de respuesta en la que sus efectos sobre la planta son favorables antes de alcanzar concentraciones capaces de alterar negativamente la homeostasis celular. En consecuencia, el incremento de Fe, Cu y

Zn registrado a 60 µM Nd podría representar una respuesta bioestimulante dentro del intervalo evaluado. Estos antecedentes respaldan que el Nd favorece la adquisición y acumulación de nutrimentos en diferentes especies vegetales, lo que coincide con el incremento en el contenido foliar de Fe, Cu y Zn observado en el presente estudio.

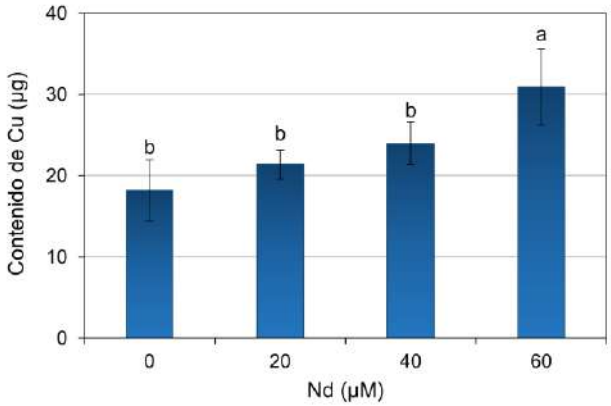


Figura 3. Contenido foliar de Cu en lechuga (Lactuca sativa L.) cv. Starfighter en respuesta a diferentes niveles de neodimio (Nd). Medias ± DE con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

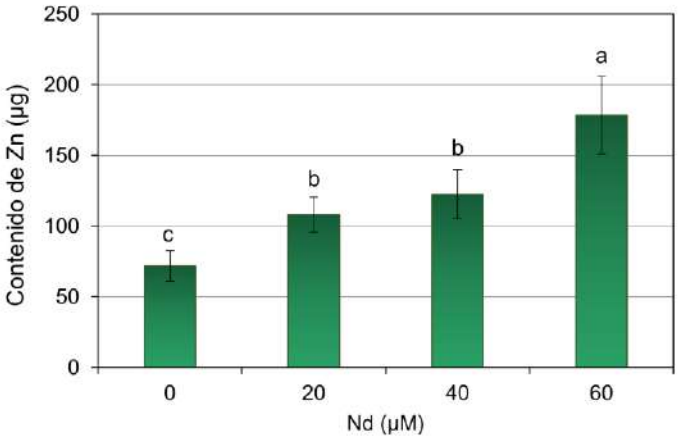


Figura 4. Contenido foliar de Zn en lechuga (Lactuca sativa L.) cv. Starfighter en respuesta a diferentes niveles de neodimio (Nd). Medias ± DE con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Conclusiones

La aplicación de Nd incrementó el contenido foliar de Fe, Cu y Zn en plantas de lechuga cv. Starfighter cultivadas en hidroponía. El Fe presentó un incremento progresivo conforme aumentó la concentración de Nd, mientras que Cu y Zn mostraron respuestas diferenciadas entre las concentraciones evaluadas. La aplicación de 60 µM Nd produjo los mayores contenidos de los tres micronutrimentos, con incrementos de 123.6, 69.9 y 148.7% para Fe, Cu y Zn, respectivamente, en comparación con el testigo. Estos resultados respaldan el potencial del Nd como bioestimulante para favorecer la nutrición mineral de la lechuga, particularmente al promover la acumulación foliar de micronutrimentos.

Los incrementos notables de Fe y Zn observados con la aplicación de Nd demuestran su capacidad para favorecer la acumulación foliar de micronutrimentos de importancia nutricional. Esta respuesta posiciona al Nd como una alternativa de interés para su incorporación en estrategias de biofortificación de cultivos hortícolas, particularmente en sistemas hidropónicos. No obstante, se requieren estudios adicionales para evaluar la respuesta del Nd bajo diferentes condiciones de cultivo y determinar la biodisponibilidad de los micronutrimentos acumulados.

Literatura citada

Abou El-Nour, H. H., & Attia, R. M. (2022). Evaluate the effects of rare earth elements on sweet pepper seeds germination process, seedlings growth and plants productivity. GSC Advanced Research and Reviews. 13(1): 023–038. https://doi.org/10.30574/gscarr.2022.13.1.0250

Assunção, A. G., Cakmak, I., Clemens, S., González-Guerrero, M., Nawrocki, A., & Thomine, S. (2022). Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. Journal of Experimental Botany. 73(6): 1789–1799. https://doi.org/10.1093/jxb/erac014

Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Function of Nutrients: Micronutrients. In: H. Marschner (ed.). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. London. Academic Press. pp. 191–248. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8

Dang, D. H., Kernaghan, A., Emery, R. N., Thompson, K. A., Kisiala, A., & Wang, W. (2024). The mixed blessings of rare earth element supplements for tomatoes and ferns. Science of the Total Environment. 906: 167822. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167822

de Oliveira, C., Ramos, S. J., Siqueira, J. O., Faquin, V., de Castro, E. M., Amaral, D. C., Techio, V. H., Coelho, L. C., e Silva, P. H., Schnug, E., & Guilherme, L. R. (2015). Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. Ecotoxicology and Environmental Safety. 122, 136–144. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.020

du Jardin, P. (2015). Bioestimulantes vegetales: Definición, concepto, categorías principales y regulación. Scientia Horticulturae. 196, 3-14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Gómez-Merino, F. C., Gómez-Trejo, L. F., Ruvalcaba-Ramírez, R., & Trejo-Téllez, L. I. (2023). Lanthanides as beneficial elements for plants. In: S. Pandey, D. K. Tripathi, V. P. Singh, S. Sharma, & D. K. Chauhan (eds). Beneficial Chemical Elements of Plants: Recent Developments and Future Prospects. Wiley: New York. pp. 349–369. https://doi.org/10.1002/9781119691419.ch15

Grosjean, N., Purwadi, I., Sirguey, C., Chalot, M., Le Jean, M., van der Ent, A., & Blaudez, D. (2024). Rare earth elements in plants: Transfer, transport, accumulation, impacts and perspectives. Advances in Botanical Research. 109: 19–61. https://doi.org/10.1016/bs.abr.2023.10.005

Hu, Z., Richter, H., Sparovek, G., & Schnug, E. (2004). Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: a review. Journal of Plant Nutrition. 27(1): 183–220. https://doi.org/10.1081/PLN-120027555

Lilay, G. H., Thiébaut, N., du Mee, D., Assunção, A. G., Schjoerring, J. K., Husted, S., & Persson, D. P. (2024). Linking the key physiological functions of essential micronutrients to their deficiency symptoms in plants. New Phytologist. 242(3): 881–902. https://doi.org/10.1111/nph.19645

Liu, D., Wang, X., Lin, Y., Chen, Z., Xu, H., & Wang, L. (2012). The effects of cerium on the growth and some antioxidant metabolisms in rice seedlings. Environmental Science and Pollution Research. 19(8): 3282–3291. https://doi.org/10.1007/s11356-012-0844-

Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. Frontiers in Plant Science. 14, 1190768. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768

Quille, P., Kacprzyk, J., OConnell, S., & Ng, C. K. Y. (2026). Plant biostimulants and their potential role in achieving the United Nations sustainable development goals. Plants, People, Planet. 1–8. https://doi.org/10.1002/ppp3.70161

Ramírez-Antonio, V. J., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., & Hidalgo-Contreras, J. V. (2023). Neodymium stimulates growth, nutrient concentration, and metabolism in sugarcane in hydroponics. Sugar Tech. 25(6): 1385–1395. https://doi.org/10.1007/s12355-023-01283-y

Rueda-López, I., Gómez-Merino, F. C., Peralta Sánchez, M. G., & Trejo-Téllez, L. I. (2025). Neodymium exerts biostimulant and synergistic effects on the nutrition and biofortification of lettuce with zinc. Horticulturae. 11(7): 776. https://doi.org/10.3390/horticulturae11070776

Sahin, O. (2023). Growing media effect on essential and non-essential mineral composition of lettuce. Journal of Plant Nutrition. 46(5): 665–674. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2087087

Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., & Cesco, S. (2019). Hydroponic solutions for soilless production systems: Issues and opportunities in a smart agriculture perspective. Frontiers in Plant Science. 10: 923. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923

SAS. (2009). Base SAS® 9.4 Procedures Guide: Statistical Procedures, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Shi, K., Liu, C., Lyu, K., Chen, J., & Wang, X. (2021). The bioaccumulation and detoxification mechanism of neodymium on the shoot of rice seedlings. American Journal of Biochemistry and Biotechnology. 17(2): 140–147. https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2021.140.147

Steiner, A. (1984). The Universal Nutrient Solution. In: Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture, Lunteren, The Netherlands, April 29 – May 5, 1984; ISOSC: Wageningen, The Netherlands. pp. 633-649.

Van der Straeten, D., Bhullar, N. K., De Steur, H., Gruissem, W., MacKenzie, D., Pfeiffer, W., Qaim, M., Slamet-Loedin, I., Strobbe, S., Tohme, J., Trijatmiko, K., Vanderschuren, H.,

Van Montagu, M., Zhang, C., & Bouis, H. (2020). Multiplying the efficiency and impact of biofortification through metabolic engineering. Nature Communications. 11(1): 5203. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19020-4

Wang, S., Kleiner, Y., Clark, S. M., Raghavan, V., & Tartakovsky, B. (2024). Review of current hydroponic food production practices and the potential role of bioelectrochemical systems. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 23(3): 897–921. https://doi.org/10.1007/s11157-024-09699-y

Yang, X., Gil, M. I., Yang, Q., & Tomás-Barberán, F. A. (2022). Bioactive compounds in lettuce: Highlighting the benefits to human health and impacts of preharvest and postharvest practices. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 21(1): 4–45. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12877

Zhang, C., Li, Q., Zhang, M., Zhang, N., & Li, M. (2013). Effects of rare earth elements on growth and metabolism of medicinal plants. Acta Pharmaceutica Sinica B. 3(1): 20–24. https://doi.org/10.1016/j.apsb.2012.12.005

Efecto del tipo de sustrato sobre el prendimiento y brotación de esquejes de morera (*Morus alba* L.)

Filiberto Anzures-Olvera[55]; Celi Gloria Calixto Valencia; Oscar M. Antúnez-Ocampo; Fernando Edgar Martínez-Silva

Resumen

Morus alba L. es una especie forrajera de alto contenido proteico y biomasa alimenticia, que se adapta a terrenos con escasa disponibilidad de nutrientes y agua, por lo que es una opción para la alimentación del ganado, principalmente en época de sequía. El objetivo fue evaluar sustratos y su efecto en el prendimiento y rebrote de las estacas de *M. alba*. El experimento se estableció en el Campo Experimental de Iguala del INIFAP, Guerrero, México. Se evaluaron cinco tratamientos que consistieron en mezclas de tres sustratos (peat moss 50% + perlita 30% + aserrín 20%) complementados con humus de lombriz en concentraciones ascendentes: 0, 25, 50, 75 y 100% y un testigo (tierra lama). Se utilizaron estacas de 40 cm de longitud y diámetro entre 15 y 20 mm. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar; cada tratamiento contó con 20 repeticiones, una estaca como unidad experimental. A los 45 días se realizó la evaluación del prendimiento y conteo total de brotes en las estacas. Se realizó un ANOVA y una comparación de medias mediante la prueba de Tukey, utilizando el programa estadístico SAS. De acuerdo con los resultados, la tierra lama 100% y 75% de lombricomposta + mezcla presentaron los valores más altos en prendimiento y número de brotes. Los sustratos evaluados presentan las características necesarias para la propagación asexual de *M. alba.* En estudios posteriores se recomienda evaluar las propiedades físico-químicas de los sustratos y su efecto morfológico y fisiológico en estacas de *M. alba.*

Palabras clave: propagación asexual, sustratos, morera.

Abstract

Morus alba L. is a forage species with high protein content and biomass yield that adapts to soils with limited nutrient and water availability, making it a viable option for livestock feed, particularly during the dry season. The objective was to evaluate various substrates and their effect on the rooting and sprouting of *M. alba* cuttings. The experiment was conducted at the

[55] Campo Experimental Iguala-INIFAP, Iguala de la Independencia, Guerrero. México. C.P. 40000. [2]Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. Santo Domingo Barrio Bajo, Villa de Etla, Oaxaca. México. C.P. 68200. Correos: anzures.filiberto@inifap.gob.mx,antunez.oscar@inifap.gob.mx,calixto.celi@inifap.gob.mx, martinez.fernando@inifap.gob.mx

INIFAP Iguala Experimental Station in Guerrero, Mexico. Five treatments were evaluated, consisting of mixtures of three substrates (50% peat moss, 30% perlite, and 20% sawdust) supplemented with increasing concentrations of earthworm humus (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%), alongside a control treatment (silt loam soil). Cuttings measuring 40 cm in length and 15–20 mm in diameter were used. A completely randomized experimental design was employed, with 20 replicates per treatment, using a single cutting as the experimental unit. Rooting success and the total number of sprouts per cutting were evaluated after45 days. Data were analyzed using ANOVA and mean comparison via Tukey's test, with the SAS statistical software package. Results indicated that 100% silt loam soil and the mixture containing 75% vermicompost yielded the highest values for rooting success and sprout count. The evaluated substrates possess the characteristics necessary for the asexual propagation of *M. alba*. Future studies should evaluate the physicochemical properties of these substrates and their morphological and physiological effects on *M. alba* cuttings.

Keywords: asexual propagation, substrates, mulberry.

Introducción

Morus alba L. se considera una especie de usos múltiples, se emplea en la sericultura y su fruto es comestible; es una planta de ornato; tiene uso medicinal; es fuente de leña y también se utiliza como forraje para el ganado (Medina *et al*., 2007; Martín *et al*., 2014). En la parte de forraje, proporciona alta cantidad de biomasa y alto contenido de proteína para la alimentación del ganado; se caracteriza por presentar alta capacidad de rebrote y adaptarse fácilmente a suelos con poca disponibilidad de nutrientes y agua (Monteiro *et al*., 2024). Por lo anterior, se considera una opción viable para la alimentación del ganado, principalmente en época de sequía. Sin embargo, esta especie presenta dificultades para su establecimiento en campo cuando su siembra es directa, por lo que la propagación en vivero para su posterior trasplante en campo puede ser una estrategia factible para superar esas limitaciones (Monteiro *et al*., 2024).

La propagación asexual en vivero permite obtener una planta seleccionada con las mejores características y mayor grado de desarrollo en menor tiempo, favoreciendo mayor prendimiento y una alta probabilidad de éxito durante el establecimiento en campo (Villalta-Zúñiga *et al*., 2022). No obstante, para la producción de planta se requieren buenas prácticas de manejo en vivero y de diversos factores, entre los cuales está el tipo de sustrato, mismo que desempeña un papel fundamental pues influye en la disponibilidad de agua y nutrientes, que se verán reflejados en un buen crecimiento y desarrollo de la planta. Por tal motivo, evaluar el efecto de diferentes sustratos sobre el prendimiento y la brotación de esquejes de

morera constituye una estrategia para identificar alternativas que optimicen la producción de planta en vivero. Esto permitirá tener éxito en el establecimiento del cultivo, incrementar la supervivencia de las plantas y contribuir a una producción más eficiente.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el Campo Experimental Iguala del INIFAP, localizado en Iguala de la Independencia, Guerrero, México (18.35° N, 99.50° W y 751 msnm). El sitio experimental presenta clima cálido subhúmedo (Aw0) con lluvias en verano y precipitación anual de 1100 mm (García, 2004). Para la formulación de los sustratos se utilizaron cinco componentes: lombricomposta, peat moss, perlita, aserrín de pino y tierra lama. Se preparó sustrato combinando mezcla (peat moss 50%, perlita 30% y aserrín crudo 20%) y lombricomposta en distintas proporciones; se evaluaron seis tratamientos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Sustratos evaluados para la producción de planta de morera.

Descripción	Componentes		
	Lombricomposta	Mezcla*	Tierra lama
Tratamiento 1 (T1)	0%	100%	-
Tratamiento 2 (T2)	25%	75%	-
Tratamiento 3 (T3)	50%	50%	-
Tratamiento 4 (T4)	75%	25%	-
Tratamiento 5 (T5)	100%	-	-
Tratamiento 6 (T6)	-	-	100%

*La mezcla contenía peat moss 50% + perlita 30% + aserrín 20%.

Las estacas seleccionadas para la siembra del ensayo tuvieron entre 15 y 20 mm de diámetro, con longitud de 15 o 20 cm y de 3 a 4 yemas en buen estado. Se escogieron las estacas medias de las varetas. El corte de las estacas fue en bisel en el extremo superior e inferior; en la parte superior fue realizado en sentido contrario a la ubicación de la yema para evitar que el agua descienda sobre esta y provoque pudrición. La siembra se efectuó de forma vertical a 5 cm de profundidad en el sustrato, en contenedores (bolsa de vivero de 15 x 25 cm perforada negra). Previo a ello, se le realizó en la punta un corte en forma de bisel retirando la corteza con ayuda de un escarpelo. El riego fue diario, manteniendo el suelo a su capacidad de campo, así como, labores de limpieza para eliminar las plantas arvenses. No se aplicó ningún tipo de fertilizante químico.

El diseño experimental fue completamente al azar; cada tratamiento contó con 20 repeticiones, una estaca como unidad experimental (6 tratamientos * 20 repeticiones * 1

unidad experimental (UE)= 6* 20* 1=120 UE). La medición se realizó a los 45 días en 20 plantas por tratamiento identificadas como unidades de muestreo. Las variables de respuesta evaluadas fueron las siguientes: brotación o prendimiento (conteo de estacas que presentaron brotes, relacionadas con el total de estacas y expresadas en porcentaje) y número de brotes (se registró el número de rebrotes totales en la planta). Los resultados cuantitativos obtenidos se sometieron a un ANOVA ($\alpha \leq 0.05$) y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el programa estadístico SAS (SAS, 2004).

Resultados y discusión

El Cuadro 2 describe el porcentaje de prendimiento de las estacas en función de cada uno de los sustratos evaluados. Se consideró la influencia de los sustratos en función de la capacidad de retención y provisión de humedad, para activar el desarrollo de las yemas que formarán el nuevo tallo. En el porcentaje de prendimiento, las mejores respuestas fueron los tratamientos T4 (75% lombricomposta + 25% mezcla) y T6 (tierra lama) con 100% de estacas prendidas; el resto de los sustratos presentaron el 95%. Resultados similares fueron reportados por Ahuanari (2018) usando sustratos orgánicos en el enraizamiento y prendimiento de estacas de *Morus nigra* en Chile. En Cuba, Martín *et al*. (2014) reportaron resultados similares en el prendimiento de estacas de *Morus alba* variedades Yu-12 y tigreada, con 100 y 98%. Esto es consistente con los resultados de Villalta-Zúñiga *et al*. (2022) quienes reportaron un 70 a 80 por ciento de estacas brotadas de *Morus alba* L. usando compost como sustrato.

En la variable de número de brotes, se observan diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 2). El tratamiento T6 (100% tierra-lama) fue el tratamiento que mostró el mayor número de brotes (2.65), y el menor valor, 1.63, fue el T1 (100% mezcla); el resto de los tratamientos presentó valores similares estadísticamente. Lo anterior coincide con la respuesta de la variable de estacas prendidas donde el T6 presentó la mejor respuesta. En Cuba, se evaluó la dinámica de emergencia de las yemas durante 120 días y se encontraron diferencias significativas entre variedades y en la tasa promedio de desarrollo de nuevas ramas, lo que repercute en la producción de hojas (Penton *et al*., 2007). En Venezuela, Medina *et al*. (2007) evaluaron el crecimiento durante la fase de vivero, así como la longitud, el diámetro y el número de yemas de la estaca de *Morus alba* (L.) *var.* Criolla y no observaron interacción alguna entre los factores estudiados.

Cuadro 2. Efecto de los sustratos sobre el porcentaje de prendimiento y número de brotes en esquejes de moras.

Indicador	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Porcentaje de prendimiento (%)	95	95	95	100	95	100
Brotes/estaca + EE*	1.63±0.14	2.35±0.24	2.05±0.13	2.05±0.17	2.25±0.19	2.65±0.24
Significancia ($p < 0.05$)	c	ab	ab	ab	ab	a

*Error estándar

Conclusión

De acuerdo con los resultados evidenciados, la tierra de enlame y la lombricomposta más mezcla pueden ser utilizadas para la propagación asexual de M. alba, pues presentan las características necesarias para propiciar prendimiento de las estacas, así como generar mayor cantidad de rebrote. Se recomienda que en estudios posteriores se evalúen las propiedades físico-químicas de los sustratos y su efecto morfológico y fisiológico.

Agradecimientos

Parte de este estudio fue financiada por el proyecto fiscal “Banco de germoplasma de especies forrajeras en Guerrero”, SIGI: 925166915.

A los estudiantes de servicio social de la Universidad Autónoma del Estado de Guerrero (UAGro) y del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero (CSAEGro).

Literatura citada

Ahuanari, C. P. 2018. Efecto de 3 tipos de sustratos en el enraizamiento y prendimiento de estacas, media, apical y basal de Morus nigra L (morera) en Zungarococha-2016. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Quinta, No. (UNAM, editor.). Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Martín, G., Y. Noda, Y. Arias, G. Pentón, M. Prieto, J. Brunet, and L. Castañeda. 2014. Evaluación de la capacidad de reproducción vegetativa de variedades de morera (Morus alba L.). Pastos y Forrajes. 37:151–157.

Medina, M. G., D. E. García, T. Clavero, J. M. Iglesias, and J. G. López. 2007. Evaluación inicial de la morera (Morus alba L.) en condiciones de vivero. Zootec. Trop. 25:43–49.

Monteiro, K. A., C. E. O. Bazalha, G. D. Shimizu, J. C. B. de Paula, H. R. Guariz, and R. T. de Faria. 2024. Enhancing Rooting in Morus alba Cuttings: Effects of Indolebutyric Acid and a Commercial Rooting Agent across Branch Positions. Cienc. Tecnol. Agropecu. 25. doi:10.21930/rcta.vol25_num2_art:3392.
SAS, S. A. S. 2004. User´s guide, Software versión 9.2. (I. SAS, editor.). SAS Inst. Cary, NC, USA.

Villalta-Zúñiga, O. N., J. A. Elizondo-Salazar, and R. O. Russo. 2022. Vegetative propagation of mulberry cuttings (Morus alba L.), in greenhouse conditions: communication. Brazilian J. Anim. Environ. Res. 5:2474–2483. doi:10.34188/bjaerv5n2-083

Evaluación de la eficiencia de fertilizantes químicos y orgánicos en el crecimiento de plantas de pimienta gorda (*Pimenta dioica* L.) producidas en vivero

Luis Guadalupe Sierra[56], Olga Santiago Trinidad[57], Cristal Arany Guerrero Ortiz

Resumen

La pimienta gorda (*Pimenta dioica* L.) es un cultivo tropical de alta relevancia económica en México, cuya productividad depende en gran medida de la calidad del material vegetal producido en vivero. Sin embargo, la escasa información técnica sobre su manejo nutricional propicia el uso inadecuado de fertilizantes, lo que encarece su desarrollo fisiológico para el injerto. Con el objetivo evaluar el efecto de los fertilizantes orgánicos y químicos en el crecimiento de plantas de pimienta gorda durante su producción en vivero, se estableció un diseño de bloques completamente al azar con trece tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos incluyeron dos fertilizantes orgánicos (Nutri Forte y Nutripro Mix) en dosis de 5, 10 y 15 ml/L, y dos fertilizantes químicos (YaraMila COMPLEX y Blaukorn Classic) en dosis de 2.5, 5 y 7.5 g/L, además de un testigo sin fertilización. Se evaluaron altura, diámetro del tallo, lignificación, biomasa seca, longitud de raíz, área foliar, contenido de nutrientes foliares (N, P, K) e Índice de Calidad de Dickson (ICD). El fertilizante orgánico Nutri Forte a 10 ml/L presentó la mayor tasa de crecimiento en altura (8.35 cm/mes) y diámetro (0.711 mm/mes), mientras que el fertilizante químico YaraMila COMPLEX a 7.5 g/L favoreció la lignificación. El fertilizante orgánico Nutripro Mix a 15 ml/L registró el ICD más alto (2.20). Los fertilizantes orgánicos mostraron mayor eficiencia en el crecimiento estructural y promovieron mayor absorción de fósforo, mientras que los químicos optimizaron la disponibilidad de potasio.

Palabras clave: *Pimenta dioica*, fertilizante orgánico, injerto, vivero.

Abstract

Allspice (Pimenta dioica L.) is a tropical crop of high economic relevance in Mexico, whose productivity largely depends on the quality of the plant material produced in nurseries.

[56] Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Carretera a la Compañía, Tepetitlanapa, Km 4, CP 95005, Zongolica, Ver. Correo de contacto: 216w0729@zongolica.tecnm.mx, Cristal-_guerrero_iias@zongolica.tecnm.mx.

[57] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, INIFAP Campo Experimental El Palmar, cristal_guerrero_iias@zongolica.tecnm.mx. Tezonapa, Veracruz, México. Correo de contacto: santiago.olga@inifap.gob.mx

However, the scarce technical information regarding its nutritional management leads to an inappropriate use of fertilizers, which increases the costs of its physiological development for grafting. To evaluate the effect of organic and chemical fertilizers on the growth of allspice plants during nursery production, a randomized complete block design was established with thirteen treatments and three replications. The treatments included two organic fertilizers (Nutri Forte and Nutripro Mix) at doses of 5, 10, and 15 ml/L, and two chemical fertilizers (YaraMila COMPLEX and Blaukorn Classic) at doses of 2.5, 5, and 7.5 g/L, plus an unfertilized control. Height, stem diameter, lignification, dry biomass, root length, leaf area, foliar nutrient content (N, P, K), and the Dickson Quality Index (DQI) were evaluated. The organic fertilizer Nutri Forte at 10 ml/L showed the highest growth rate in height (8.35 cm/month) and diameter (0.711 mm/month), while the chemical fertilizer YaraMila COMPLEX at 7.5 g/L favored lignification. The organic fertilizer Nutripro Mix at 15 ml/L recorded the highest DQI (2.20). Organic fertilizers showed greater efficiency in structural growth and promoted higher phosphorus absorption, whereas chemical fertilizers optimized potassium availability.

Keywords: *Pimenta dioica*, organic fertilizer, grafting, nursery.

Introducción

La pimienta gorda [*Pimenta dioica* (L.) Merrill] es una especie tropical de la familia Myrtaceae, originaria de México y el Caribe, reconocida por su valor gastronómico, medicinal y cosmético. México ocupa el segundo lugar en producción y exportación de pimienta en Latinoamérica, siendo Veracruz el principal estado productor con 7,440.89 toneladas registradas en 2023, cuyo valor económico superó los 101 millones de pesos (SIAP, 2023). A pesar de este potencial, la producción nacional no ha logrado superar el pico de 10,399 ton alcanzado en 2020, evidenciando limitantes técnicas que comprometen su crecimiento sostenido (SIAP, 2024).

La productividad del cultivo está estrechamente vinculada a la calidad de las plantas producidas en vivero, etapa en la que la fertilización resulta determinante para el desarrollo fisiológico y la preparación del material vegetal para el injerto. El injerto de enchapado lateral, técnica desarrollada en el Campo Experimental El Palmar del INIFAP, permite garantizar la producción de plantas femeninas que fructifiquen a partir de los tres años, evitando la dioecia característica de la especie (INIFAP, 2022). Sin embargo, la escasa información técnica sobre el manejo nutricional de pimienta en vivero obliga a los productores a fertilizar con base en experiencia empírica, ocasionando uso inadecuado o

excesivo de insumos y repercutiendo negativamente en los costos de producción y en el ambiente.

Ante este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes dosis de fertilizantes orgánicos y químicos sobre el crecimiento, calidad y prendimiento del injerto en plántulas de pimienta gorda (*Pimenta dioica* L.) producidas en vivero, con el fin de identificar las dosis y fuentes de fertilización que optimicen su desarrollo como portainjertos para plantaciones comerciales.

Materiales y Métodos

El experimento se estableció en el Campo Experimental El Palmar del INIFAP, ubicado en el kilómetro 16 de la carretera Tezonapa, Veracruz (18°30'48" N, 96°45'47" O; 120 msnm). Las semillas se obtuvieron de frutos maduros de la plantación de pimienta gorda del campo experimental. Las plántulas germinadas en almácigo fueron trasplantadas a bolsas de polietileno de 1.5 L con sustrato compuesto por cascarilla de café, cachaza composteada y tierra (25:25:50 v/v). El experimento inició dos meses después del trasplante.

Se aplicó un diseño de bloques completamente al azar (BCA) con 13 tratamientos y 3 repeticiones (bloques), con 15 plantas por bloque. Los tratamientos correspondieron a: fertilizante orgánico Nutri Forte (Orgánico I, base de guano de murciélago y humus de lombriz; N 1.7%, P 0.98%, K 1.16%) en dosis de 5, 10 y 15 ml/L (T1, T2, T3); fertilizante orgánico Nutripro Mix (Orgánico II, ácidos húmicos 5.97% y fúlvicos 6.91%) en dosis de 5, 10 y 15 ml/L (T4, T5, T6); fertilizante químico YaraMila COMPLEX NPK 12-11-18 (Químico I) en dosis de 2.5, 5 y 7.5 g/L (T7, T8, T9); fertilizante químico Blaukorn Classic NPK 12-8-16 (Químico II) en dosis de 2.5, 5 y 7.5 g/L (T10, T11, T12); y un testigo sin fertilizante (T13).

Se evaluaron ocho variables de respuesta: altura (cm), diámetro del tallo (mm) y lignificación (cm), medidas mensualmente durante doce meses (marzo–febrero); y en muestreo destructivo final: longitud de raíz (cm), número de raíces secundarias, biomasa seca aérea y radicular (g), área foliar (cm²) con el software ImageJ, y contenido foliar de N, P y K (realizado por el laboratorio de suelo de la Universidad Autónoma Chapingo).

La calidad de planta se determinó con el Índice de Calidad de Dickson (ICD) y el prendimiento del injerto mediante la técnica de enchapado lateral.

Para las variables de monitoreo periódico (altura, diámetro y lignificación), se calcularon las tasas de crecimiento y se ajustó un modelo lineal mixto con medidas repetidas bajo un diseño de bloques completamente al azar (BCA). El modelo incluyó efectos fijos de tratamiento, tiempo (lineal y cuadrático) e interacciones, así como intercepto y pendiente aleatorios por planta para controlar la correlación intraindividual, según la siguiente especificación (1):

$$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_{\text{trat}} \cdot \text{TRAT}_i + \beta_1 \cdot \text{MES}_k + \beta_2 \cdot \text{MES}_k^2 + \beta_{\text{int}} \cdot (\text{TRAT}_i \times \text{MES}_k) + \beta_\beta \cdot \text{BLOQUE}_j + u_{0i} + u_{1i} \cdot \text{MES}_k + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

La significancia se evaluó mediante el estadístico de Wald χ^2 y las comparaciones de medias con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), descomponiendo la varianza explicada en R^2 marginal y condicional según Nakagawa y Schielzeth (2013). Para las variables del muestreo destructivo (longitud de raíz, biomasa seca, área foliar), se aplicó un ANOVA bajo el diseño BCA con prueba de Tukey para las variables con diferencias significativas; adicionalmente, los contenidos foliares de N, P y K se compararon descriptivamente con rangos de suficiencia para especies tropicales y se analizó su relación con las variables de crecimiento mediante correlación de Pearson. Todos los análisis se implementaron en R utilizando los paquetes lme4, lmerTest, emmeans y performance.

Resultados y Discusión

El tratamiento, el tiempo y sus interacciones fueron estadísticamente significativos ($p < 0.001$) para altura, diámetro y lignificación. El R^2 condicional de los modelos mixtos fue superior a 0.80 en los tres casos, indicando alta capacidad explicativa. El tratamiento T2 (Orgánico I, 10 ml/L) destacó como el más eficiente para altura y diámetro, con tasas de 8.35 cm/mes y 0.711 mm/mes, respectivamente, superando significativamente a los tratamientos T3 (Orgánico I, 15 ml/L) y T12 (Químico II, 7.5 g/L). Estos resultados coinciden con lo reportado por Monsalve *et al*. (2009) en plantas de eucalipto de la misma familia botánica, quienes documentaron mayor desarrollo vegetativo con dosis intermedias de nitrógeno. La superioridad del T2 se atribuye al aporte equilibrado de N, P, K y Ca del guano de murciélago y humus de lombriz, que estimuló la división celular en el cámbium vascular y promovió tallos más robustos (Hurtado *et al*., 2023).

Para la lignificación, el tratamiento T9 (Químico I, 7.5 g/L) registró la mayor tasa (3.476 cm/mes, grupo a), seguido de un amplio grupo intermedio estadísticamente homogéneo. El proceso de lignificación se aceleró a partir del mes de noviembre en todos los tratamientos, comportamiento asociado al descenso térmico y a la acumulación de carbohidratos en etapas

previas de crecimiento. El efecto significativo del bloque en esta variable ($p < 0.001$) indica sensibilidad a factores ambientales como la intensidad lumínica y la temperatura. En el muestreo destructivo, una variable presento diferencias significativas entre tratamientos: longitud de raíz ($p = 0.0046$). El testigo (T13) mostró la mayor longitud radicular (32.17 cm, grupo a), mientras que T9 y T12 registraron los valores más bajos (18.83 y 18.30 cm, grupo b), indicando que las dosis altas de fertilizantes químicos generan competencia osmótica que restringe la exploración radicular profunda.

El análisis del contenido foliar evidenció que todos los tratamientos presentaron concentraciones de nitrógeno por debajo del umbral de suficiencia para especies tropicales leñosas (1.5% según USDA, 2014), siendo T2 (1.10%) y T10 (1.09%) los valores más cercanos. Los fertilizantes orgánicos favorecieron la absorción de fósforo con T1 (0.24%) y T2 (0.16%) dentro del rango de suficiencia (0.10–0.30%), mientras que los fertilizantes químicos promovieron consistentemente mayores concentraciones de potasio, con T9 (1.16%), T10 (1.11%) y T12 (1.07%) superando el umbral de suficiencia (1.0%). La correlación de Pearson reveló que el fósforo fue el nutriente con mayor relación con las variables de crecimiento, presentando correlaciones negativas significativas con la biomasa seca radicular ($r = -0.831$, $p < 0.001$) y aérea ($r = -0.713$, $p = 0.01$). Este patrón se debe al efecto de dilución, el cual explica que, en los tratamientos con mayor acumulación de tejido vegetal, el fósforo absorbido se distribuyó en un mayor volumen de materia seca, provocando una disminución en su concentración porcentual.
Respecto a la calidad de planta, el ICD varió entre 1.21 (T1) y 2.20 (T6), siendo T6 (Orgánico II, 15 ml/L) el único tratamiento clasificado en categoría muy buena. Todos los demás tratamientos superaron el valor mínimo de ICD = 0.5, considerado apto para trasplante a condiciones de campo. Dado que el destino productivo de estas plantas es la injertación, la calidad definitiva depende de que los portainjertos alcancen una altura mínima de 60 cm y un diámetro superior a 10 mm en el tallo, criterios que la mayoría de los tratamientos satisfacen hacia el final del ciclo evaluado. El prendimiento del injerto fue del 100% en todos los tratamientos, confirmando que ninguna fuente ni dosis de fertilización interfirió en el proceso fisiológico de unión entre la púa y el patrón, resultado consistente con lo documentado por Hartmann *et al*. (2014) quienes señalan que el éxito de un injerto depende principalmente de la habilidad de la persona que lo realiza, la compatibilidad genética y las condiciones ambientales sobre el éxito del injerto.

Conclusiones

Las dosis intermedias de fertilización orgánica y química determinaron mayor eficiencia en el crecimiento estructural, en tanto que las dosis altas de fertilizantes químicos deprimieron

variables como el diámetro del tallo y la longitud radicular. Las dosis altas de fertilizante orgánico promovieron mayor acumulación de biomasa seca aérea y radicular, fortaleciendo la calidad estructural de las plantas para su establecimiento en campo. Todos los tratamientos produjeron plantas con ICD superior a 0.5 y prendimiento de injerto del 100%, confirmando que las plantas son aptas para la injertación independientemente del fertilizante aplicado. Los resultados sustentan la viabilidad técnica de los fertilizantes orgánicos como alternativa sostenible a la fertilización química convencional en la producción de portainjertos de pimienta gorda.

Literatura citada

Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies, F. T., & Geneve, R. L. (2014). *Hartmann & Kester's plant propagation: principles and practices*. Pearson Education Limited.

Hurtado, G. Y. H., Chico, R. J. R., Campos, R. J., Cerna Rebaza, L., & Campos, R. S. N. (2023). Efecto de los fertilizantes fosforados y nitrogenados en el crecimiento de 'eucalipto arcoiris' *Eucalyptus deglupta* Blume (Myrtacea). *Arnaldoa, 30*(2), 169–192. https://doi.org/10.22497/arnaldoa.302.30206

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2022). *Pimienta gorda, cultivo emblemático del trópico húmedo mexicano*. https://www.gob.mx/inifap/articulos/pimienta-gorda-cultivo-emblematico-del-tropico-humedo-mexicano

Monsalve, J., Escobar, R., Acevedo, M., Sánchez, M., & Coopman, R. (2009). Efecto de la concentración de nitrógeno sobre atributos morfológicos, potencial de crecimiento radical y estatus nutricional en plantas de *Eucalyptus globulus* producidas a raíz cubierta. *Bosque (Valdivia), 30*(2), 88–94. https://doi.org/10.4067/S0717-92002009000200004

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Cierre de la producción agrícola*. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Panorama Agrícola por Estado "Pimienta"*. https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/tableros/SIAS/EstadisticaTransversal/PA/index.html

Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (2014). *Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en Contenedor* (Vol. 1). USDA Forest Service.

Evaluación del lixiviado obtenido de lombricomposta de sustrato agotado de hongo en chile y jitomate

Ana Bell Sánchez-Aguilar[58], Manuel Sandoval-Villa, Javier Suárez-Espinosa

Resumen

La producción de hongos seta (*Pleurotus* spp.) genera grandes volúmenes de sustrato agotado de hongo (SAH) estimados hasta en 5 kg de residuo por cada kg de hongo producido, cuya disposición descontrolada contamina suelos y cuerpos de agua. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue compostar el SAH y evaluar la eficiencia del lixiviado obtenido en el cultivo de chile y jitomate. Se compostó el SAH con lombrices de tierra roja californiana (*Eisenia foetida*) durante seis meses. Se estableció un experimento factorial 2 X 4 completamente al azar. Factor A: tezontle y suelo. Factor B: lixiviado al 50 % (T1); lixiviado al 25 % + 25 % del fertilizante requerido para una solución nutritiva Steiner (SNS) (T2); lixiviado al 50 % con ajuste de pH (T3) y SNS (testigo) al 50 % (T4). Las variables evaluadas durante un mes fueron: altura, diámetro del tallo y número de hojas. En chile no se encontraron diferencias significativas de los efectos de los factores y sus combinaciones en las variables respuesta. Por su parte, en jitomate se encontró que existe interacción entre los factores A y B, es decir, el efecto en altura y diámetro depende del sustrato que se use. El T1 tiene un mejor efecto en altura y diámetro, cuando se usa suelo; mientras que el T3 tiene un mejor efecto si se usa tezontle.

Palabras clave: sustrato agotado de hongo, compostaje, biofertilizante.

Abstract

Oyster mushroom (Pleurotus spp.) production generates large volumes of spent mushroom substrate (SMS) estimated at up to 5 kg of waste per kilogram of mushrooms produced the uncontrolled disposal of which contaminates soils and water bodies. Therefore, the objective of this study was to compost the SMS and evaluate the efficiency of the resulting leachate in the cultivation of chili peppers and tomatoes. The SAH was composted using californiana red earthworms (Eisenia fetida) for six months. A completely randomized 2 × 4 factorial experiment was established. Factor A: tezontle and soil. Factor B: 50 % leachate (T1); 25 % leachate + 25 % of the fertilizer required for a Steiner nutrient solution (SNS) (T2); 50 %

[58] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56264. Correo electrónico: ana.sanchez@colpos.mx; msandoval@colpos.mx; sjavier@colpos.mx

leachate with pH adjustment (T3); and 50 % SNS (control) (T4). The variables evaluated over a one-month period were height, stem diameter, and number of leaves. In chili pepper plants, no significant differences were found regarding the effects of the factors and their combinations on the response variables. Regarding tomatoes, an interaction was found between factors A and B; that is, the effect on height and diameter depends on the substrate used. Treatment T1 yields better results for height and diameter when soil is used, whereas T3 performs better when tezontle is used.

Keywords: spent mushroom substrate, composting, biofertilizer.

Introducción

Pleurotus comúnmente llamado "hongo ostra" consta de alrededor de 40 especies distribuidas en una amplia gama de regiones tropicales y templadas (Van Fan et al., 2018), cerca de 26 especies de *Pleurotus* se cultivan para consumo humano (Sadler, 2003; Tajbakhsh et al., 2008). Son hongos comestibles con importancia comercial, se cultivan a nivel mundial, presentan un atractivo sabor y aroma, además de su valor nutricional y medicinal (Sadler, 2003). La mayoría de las especies de *Pleurotus* son saprófitas (Coury y Dillner, 2008). El cultivo de hongos ostra es un mercado creciente. Se estima que la demanda mundial de hongos crece un 15 % anual debido al incremento de la población y el consumo (Grujić et al., 2015). La producción de 1 kg de hongos genera unos 5 kg de sustrato agotado (Ravlikovsky et al., 2025).

El sustrato agotado de hongo (SAH) que se genera al producir *Pleurotus*, en su gran mayoría no se aprovecha, se desecha, lo que ocasiona problemas al medio, en algunos casos el SAH es quemado, otros más, es desechado y expuesto al ambiente lo que puede ocasionar eutrofización de agua (Sangwan et al., 2002; Cortina-Escribano et al., 2020), salinidad del suelo (Bajal et al., 2019) y propagación de enfermedades en el cultivo de hongos (Mahari et al., 2020).

El SAH no puede ser usado como enmienda al suelo inmediatamente. El vermicompostaje puede ser una tecnología adecuada, es una opción rentable y respetuosa con el ambiente para la eliminación de desechos de hongos (Jusoh et al., 2013). Es una alternativa viable para el tratamiento y la gestión de diferentes residuos orgánicos provenientes de actividades agrícolas y agroindustriales (Velasco-Velasco et al., 2016). El proceso de vermicompostaje aprovecha las capacidades detritívoras de las lombrices de tierra, así como la acción de sus enzimas digestivas y la microflora aeróbica y anaeróbica presente en su intestino para la biodegradación de los residuos orgánicos (Yuvaraj et al., 2021).

La acción combinada entre lombrices de tierra, microorganismos y actividad enzimática resultante aceleran el proceso de descomposición del SAH. Este proceso no solo disminuye la salinidad del material, sino que también lo convierte en un fertilizante rico en nutrientes con muchos beneficios, incluso, más rico que el compost tradicional (Bajal et al., 2019). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue compostar el sustrato agotado de hongo y evaluar la eficiencia del lixiviado obtenido en el cultivo de chile y jitomate.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, ubicado a 19° 27′ 51″ LN y 98° 54′ 15″ LO, a una altitud de 2,250 m. El SAH se compostó durante seis meses. El lixiviado que se obtuvo de los tres a seis meses de compostaje fue el que se utilizó como fertilizante en el cultivo de chile y jitomate.

El estudio se realizó en condiciones de invernadero. Se sembraron semillas del híbrido de jitomate “El Cid” y de chile variedad “Jalapeño “en una bandeja de poliestireno expandido de 200 pocillos llenos con turba como sustrato. Las semillas de chile se sembraron primero, debido a que tardan más en germinar. Tras la germinación, las plántulas de chile y jitomate se regaron con una SNS al 25 %. El trasplante se realizó 40 y 55 días después de la germinación (ddg) del jitomate y del chile, respectivamente. El experimento duró un mes, los riegos se realizaron por la mañana.

Se estableció un experimento factorial 2 X 4 completamente al azar. Factor A: tezontle y suelo. Factor B: lixiviado al 50 % (T1); lixiviado al 25 % + 25 % del fertilizante requerido para una solución nutritiva Steiner (SNS) (T2); lixiviado al 50 % con ajuste de pH (T3) y SNS (testigo) al 50 % con ajuste de pH (T4). Durante un mes se aplicaron los tratamientos, a los 15 y 30 días después del trasplante se evaluó altura y diámetro del tallo, a los 30 días también se contó el número de hojas por planta. El análisis de los datos se realizó mediante un análisis de varianza. Se hicieron pruebas de homogeneidad de varianzas y normalidad.

Resultados y discusión

En chile no hubo diferencias significativas del efecto de los factores en las variables evaluadas. Sin embargo, en el cultivo de jitomate, se presentaron diferencias en altura de la planta en el factor B (tipo de fertilización) (Figura 1).

En la variable altura en chile no se observaron diferencias significativas (p-value=0.608) entre el efecto de sustrato (tezontle y suelo) y entre el efecto de los tratamientos (tipo de

fertilización) (p-value=0.366). Por lo que no se pueden hacer recomendaciones respecto al tipo de sustrato y tipo de fertilización. Tampoco hubo interacción entre los factores (p-value=0.974). Los resultados coinciden con lo reportado por Molina et al. (2025) quienes no encontraron diferencias significativas en las variables altura, número de hojas y diámetro del tallo en chile variedad Chirel al aplicar lixiviado de vermicompost en una dilución del 25, 50 y 75 % respecto al testigo. Al igual, Camacho-Rodríguez et al. (2022) no encontraron diferencias significativas en altura y número de hojas en plántulas de chile jalapeño inoculadas con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal con la cepa Serratia plymuthica y S. marcescens en la variable altura y cepa S. liquefaciens y Arthrobacter sp. para número de hojas respecto al testigo. Lo anterior indica que las variables evaluadas en el cultivo de chile son difíciles de cambiar a través de biofertilizantes.

Mientras que, en el cultivo de jitomate, se presentaron diferencias significativas (p-value =1.64 e-06) del efecto del factor B (tipo de fertilización) en altura de la planta. Los resultados muestran que existe interacción entre los factores estudiados (p-value =0.00146), lo cual indica que el efecto obtenido en la altura de la planta cuando se usa tezontle como sustrato difiere del obtenido con suelo. Los resultados (Figura 1) indican que en tezontle el tratamiento B4 presenta diferencias significativas respecto al tratamiento B2 y B1. Mientras que el tratamiento B3 y B2 solo presentan diferencias significativas respecto al B1. Por lo tanto, si se usa tezontle como sustrato en el cultivo de jitomate se recomienda el tratamiento B4 para obtener una mayor altura. Sin embargo, si se usa suelo como sustrato no es posible hacer recomendaciones ya que no se encontraron diferencias significativas entre los efectos del tipo de fertilización.

Mupambwa et al. (2024) indicaron que no encontraron diferencias significativas en la altura de plantas de jitomate regadas con lixiviado al 10 y 20 % obtenido del vermicompost de una mezcla de estiércol de cabra y oveja. De igual manera, Oliva-Llaven et al. (2010) no encontraron diferencias significativas en la altura de plantas de jitomate regadas con lixiviado del vermicompost de estiércol de vaca respecto al testigo. En este estudio, se observa que las diferencias encontradas son únicamente cuando se maneja tezontle como sustrato, lo que resalta la importancia de la elección del sustrato en el cultivo de jitomate.

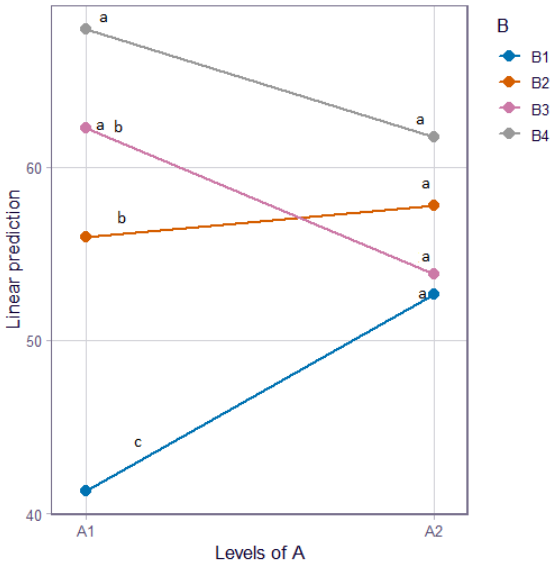


Figura 1. Interacción entre los niveles del factor A (sustrato) y factor B (tipo de fertilización). A1: tezontle; A2: suelo; B1: lixiviado al 50 %; B2: lixiviado al 25 % + 25 % del fertilizante requerido para una solución nutritiva Steiner (SNS); B3: lixiviado al 50 % con ajuste de pH y B4 (testigo): SNS al 50 % con ajuste de pH.

Con base a los resultados obtenidos en el análisis estadístico en relación al tipo de sustrato y concentración del lixiviado, podemos inferir que si los productores de hongos seta compostaran el SAH y usarán únicamente el lixiviado al 50 % (tratamiento B1) entonces la recomendación seria usar suelo como sustrato. Mientras que si usarán el lixiviado al 50 % con ajuste de pH (tratamiento B3) la recomendación seria usar tezontle como sustrato (Figura 2).

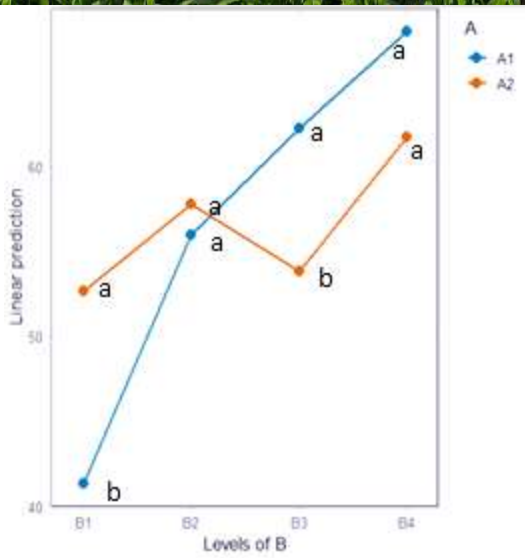


Figura 2. Interacción entre el tipo de sustrato (tezontle y suelo) con el tipo de fertilización (tratamiento B1 y tratamiento B3). A1: tezontle; A2: suelo; B1: lixiviado al 50 %; B2: lixiviado al 25 % + 25 % del fertilizante requerido para una solución nutritiva Steiner (SNS); B3: lixiviado al 50 % con ajuste de pH y B4 (testigo): SNS al 50 % con ajuste de pH.

Respecto al número de hojas, en chile y jitomate no existieron diferencias significativas del efecto de sustratos. Por lo anterior, en jitomate no se pueden hacer recomendaciones respecto al tipo de sustrato para esta variable (p-value=0.235). Mientras que, el efecto de los tratamientos (tipo de fertilización) presenta diferencias significativas (p-value=1.93e-06). Los resultados muestran que no existe interacción entre sustratos y tipos de fertilización (p-value=0.529). Por otra parte, en chile no presentaron diferencias significativas (p-value=0.351) entre los efectos de sustratos. No hay diferencias significativas (p-value=0.705) entre los efectos de tratamientos (tipo de fertilización) y no se presentó interacción entre sustratos y tipo de fertilización (p-value=0.742). Resultados similares reportaron Oliva-Llaven et al. (2010) quienes no encontraron diferencias significativas en el número de hojas en plantas de jitomate regadas con lixiviado obtenido de vermicompost de estiércol de vaca al 10 y 20 % de concentración respecto al testigo y a plantas inoculadas con Pseudomonas fluorescens y Glomus fasciculatum. Notamos que al igual que la altura en chile, la variable de número de hojas en chile y jitomate es difícil de modificar con biofertilizantes.

Por último, en jitomate el efecto de los sustratos no presentó diferencias significativas (p-value=0.746) en el diámetro de tallo, pero si se encontraron diferencias significativas (p-value=5.57e-06) en el efecto de tratamientos (tipo de fertilización). Además, los resultados muestran la existencia de interacción entre sustrato y tipo de fertilización (p-value=0.0194). Debido a que existe interacción entre sustrato y tipo de fertilización se investiga dicha interacción en lugar de solo probar diferencias entre el factor principal (tipo de fertilización). Por lo que se realizaron las pruebas correspondientes (llamadas pruebas de rebanadas) (Figura 3).

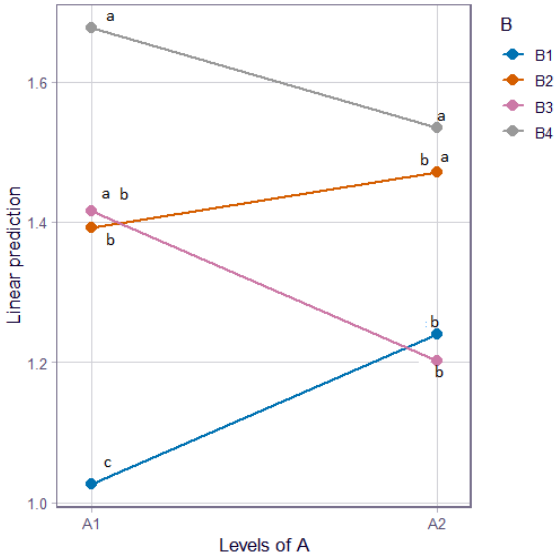


Figura 3. Interacción entre los niveles del factor A (sustrato) y factor B (tipo de fertilización).

A1: tezontle; A2: suelo; B1: lixiviado al 50 %; B2: lixiviado al 25 % + 25 % del fertilizante requerido para una solución nutritiva Steiner (SNS); B3: lixiviado al 50 % con ajuste de pH y B4 (testigo): SNS al 50 % con ajuste de pH.

Los resultados (Figura 3) indican que en tezontle el tratamiento B4 presenta diferencias significativas respecto al tratamiento B2 y B1. Mientras que el B3 y B2 solo presentan diferencias significativas respecto a B1. Por lo tanto, si se usa tezontle como sustrato en el cultivo de jitomate se recomienda el tratamiento B4 para obtener un mayor diámetro. En este caso específico, aunque hay interacción entre el sustrato y el tipo de fertilización, dicha interacción se presenta entre los niveles B1 y B3, con los cuales se obtuvieron las menores expresiones en diámetro; por lo que, para el caso del sustrato A2 (suelo) el tipo de

fertilización que tiene un mejor resultado también es con el tratamiento B4. Ávila-Juárez et al. (2014) no encontraron diferencias significativas en el diámetro del tallo en plantas de jitomate regadas con una solución nutritiva Steiner (1984) y complementada con lixiviados obtenidos del vermicompost de sustrato agotado de hongo, estiércol de vaca y residuos de nidos de hormigas cortadoras de hojas. A su vez, Oliva-Llaven et al. (2010) indicaron que la combinación de la aplicación foliar de lixiviado obtenido del vermicompost de estiércol de vaca con la inoculación de G. fasciculatum y P. fluorescens presentó los tallos más anchos. Lo anterior muestra que las diferencias obtenidas en el diámetro del tallo se pueden atribuir al tipo de sustrato y tipo de inoculante no específicamente a la concentración del lixiviado aplicado.

Si solo se tuviera disponible el tratamiento B1 (lixiviado al 50 %), entonces la recomendación seria usar al suelo como sustrato (Figura 4). De forma similar, si solo se tuviera disponible el tratamiento B3 (lixiviado al 50 % con ajuste de pH) la recomendación seria usar como sustrato el tezontle.

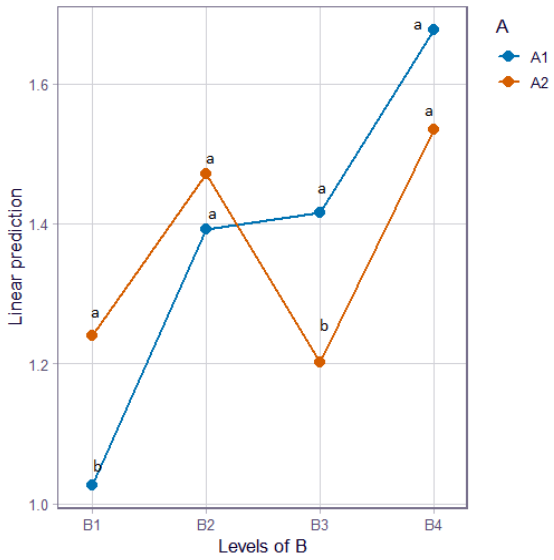


Figura 4. Interacción entre el tipo de sustrato (tezontle y suelo) con el tipo de fertilización (tratamiento B1 y tratamiento B3).

A1: tezontle; A2: suelo; B1: lixiviado al 50 %; B2: lixiviado al 25 % + 25 % del fertilizante requerido para una solución nutritiva Steiner (SNS); B3: lixiviado al 50 % con ajuste de pH y B4 (testigo): SNS al 50 % con ajuste de pH.

Conclusiones

En el cultivo de jitomate con base en el análisis de las tres variables respuesta (altura, numero de hojas y diámetro de tallo en la planta) se concluye que existe interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de fertilización. La evidencia muestra que la respuesta en tezontle y suelo no es la misma. Cuando se usa tezontle, el tipo de fertilización B3 y B2 solo superan significativamente a B1, pero son superados por el tratamiento B4. Mientras que, si se usa suelo como sustrato los tratamientos B3, B2 y B1 no presentan diferencias significativas. Por su parte, en chile se concluye que no se encontraron diferencias significativas del efecto del sustrato y tipo de fertilización, por lo que se recomienda aumentar las concentraciones que se estudiaron con el objeto de identificar si algún factor puede superar significativamente a otro.

Literatura citada

Ávila-Juárez, L., Rodríguez González, A., Rodríguez Piña, N., Guevara González, R. G., Torres Pacheco, I., Ocampo Velázquez, R. V., & Moustapha, B. 2015. Vermicompost leachate as a supplement to increase tomato fruit quality. Journal of soil science and plant nutrition 15: 46-59. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000005

Bajal, S., Subedi, S. & Baral, S. 2019. Utilization of agricultural wastes as substrates for vermicomposting. IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science 12: 79-84. https://doi.org/10.9790/2380-1208017984

Camacho-Rodríguez, M., Almaraz-Suárez, J. J., Vázquez-Vázquez, C., Angulo-Castro, A., Ríos-Vega, M. E., & González-Mancilla, A. 2022. Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el desarrollo y rendimiento del chile jalapeño. Revista mexicana de ciencias agrícolas 13: 185-196. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3273

Cortina-Escribano, M., Pihlava, J. M., Miina, J., Veteli, P., Linnakoski, R. and Vanhanen, H. 2020. Effect of Strain, Wood Substrate and Cold Treatment on the Yield and β-Glucan Content of Ganoderma lucidum Fruiting Bodies. Molecules 25: 4732. https://doi.org/10.3390/molecules25204732

Coury, C. and Dillner, A. M. 2008. A method to quantify organic functional groups and inorganic compounds in ambient aerosols using attenuated total reflectance FTIR spectroscopy and multivariate chemometric techniques. Atmospheric Environment 42: 5923-5932. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.026

Grujić, M., Dojnov, B., Potočnik, I., Duduk, B. & Vujčić, Z. 2015. Spent mushroom compost as substrate for the production of industrially important hydrolytic enzymes by fungi Trichoderma spp. and Aspergillus niger in solid state fermentation. International Biodeterioration & Biodegradation 104: 290-298. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.029

Jusoh, M. L. C., Manaf, L. A. and Latiff, P. A. 2013. Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality. Iranian Journal Of Environmental Health Science & Engineering 10: 17. https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-17

Mahari, W. A. W., Peng, W., Nam, W. L., Yang, H., Lee, X. Y., Lee, Y. K., Liew, R. K., Ma, N. L., Mohammad, A. and Sonne, C. 2020. A review on valorization of oyster mushroom and waste generated in the mushroom cultivation industry. Journal of Hazardous Materials 400: 123156. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123156

Molina, M. A., Durán, A. G., García, H. G., & Ochoa, C. L. P. 2025. Evaluation of vermicompost leachate in the organic fertilization of the chili pepper crop. SAP Environmental Research and Ecotoxicity 4: 154-154. https://doi.org/10.56294/ere2025154

Mupambwa, H. A., Nyambe, G. I., Matomola, B., Handura, B., Howoses, V. A., Hausiku-Ikechukwu, M. K., & Gawanab, W. 2024. Goat and sheep manure based vermicompost and vermi-leachate as a nutrient source in drip hydroponic tomatoes (Solanum lycopersicum) and Swiss chard (Beta vulgaris). Journal of Sustainable Agriculture and Environment 3: e70011. https://doi.org/10.1002/sae2.70011

Oliva-Llaven, M. Á., Rodríguez-Hernández, L., Mendoza-Nazar, P., Ruiz-Sesma, B., Álvarez-Solís, J. D., Dendooven, L., & Gutiérrez-Miceli, F. A. 2010. Optimization of worm-bed leachate for culturing of tomato (Lycopersicon esculentum Mill) inoculated with Glomus fasciculatum and Pseudomonas fluorescens. Electronic Journal of

Biotechnology 13: 4-5. http://dx.doi.org/10.4067/S0717-34582010000200004

Ravlikovsky, A., Pinheiro, M. N. C., Kucheruk, P. & Symochko, L. 2025. Spent mushroom substrate as a renewable energy resource: evaluating its biogas production potential. Sustainability 17: 1800. https://doi.org/10.3390/su17051800

Sadler, M. 2003. Nutritional properties of edible fungi. Nutrition Bulletin 28: 305-308.

Sangwan, P. S., Swami, S., Singh, J. P., Kuhad, M. S. and Dhaiya, S. S. 2002. The effect of spent mushroom compost and inorganic fertilizer on yield and nutrient uptake by wheat. Journal of the Indian Society of Soil Science 50: 186-189.

Tajbakhsh, J., Abdoli, M.A., Mohammadi Goltapeh, E., Alahdadi, I. and Malakouti, M. J. 2008. Trend of physico-chemical properties change in recycling spent mushroom compost through vermicomposting by epigeic earthworms Eisenia foetida and E. andrei. International Journal of Agricultural Technology 4: 185-198.

Van Fan, Y., Lee, C. T., Klemeš, J. J., Chua, L. S., Sarmidi, M. R. and Leow, C. W. 2018. Evaluation of effective microorganisms on home scale organic waste composting. Journal of Environmental Management 216: 41-48. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.019

Velasco-Velasco, J., Ferrera-Cerrato, R., Almaraz-Suárez, J. J. & Parkinson, R. 2016. "Emisión de amoniaco durante los procesos de compostaje y vermicompostaje: Aspectos prácticos y aplicados". Agro Productividad 9: 45-51.

Yuvaraj, A., Thangaraj, R., Karmegam, N., Ravindran, B., Chang, S. W., Awasthi, M. K. & Kannan, S. 2021. "Activation of biochar through exoenzymes prompted by earthworms for vermibiochar production: a viable resource recovery option for heavy metal contaminated soils and water". Chemosphere 278: 130458. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130458

Evolución del rendimiento y de nutrimentos en limón mexicano con distintos manejos de fertilización

José C. García-Preciado[59], Jesús Andrés García Guerrero[60], Juan Carlos Álvarez Hernández[61]

Resumen

El cultivo de limón mexicano genera gran cantidad empleos todo el año en el estado de Colima. Debido a la disminución de rentabilidad y productividad se han propuesto herramientas y métodos de manejo para el uso eficiente de insumos. Ejemplo, fertilizantes, los cuales se puede otorgar mediante la medición de nutrimentos en parte aérea de la planta. Por ello, se evaluó la evolución del rendimiento y nutrimentos foliares con distintos manejos de fertilización.

La evaluación se estableció en el INIFAP, clima cálido semiseco y suelo franco arcilloso. Se evaluó rendimiento y nutrimentos en hojas, en cuatro tratamientos de fertilización. La unidad experimental fueron árboles de limón de cinco años, un diseño experimental de bloques al azar. Se realizó análisis de comparación de medias. Y se generó propuesta de intervalos de concentración foliar de nutrimentos.

Todos los tratamientos de fertilización fueron de menos a más en productividad a través del tiempo. Fertirriego por restitución fue más productiva y la menor fue tratamiento que se le ofreció solo riego. Nutrimentos contenidos en hojas fueron distintos en los tratamientos, pero no diferentes estadísticamente tras seis meses de evaluación. El nitrato obtuvo comportamiento proporcional al rendimiento de frutos. El potasio logró mayor concentración en hojas, siguiendo nitrato, calcio y sodio. Un uso eficiente de fertilizantes generó mayor rendimiento, además, se redujo la cantidad de fertilizantes en kilogramos.
Tratamiento de fertirriego por restitución fue el más productivo, el menos fue solo riego. Mayor concentración de iones NO_3^- se obtuvo con fertirriego, y la más baja en tratamiento

[59] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Tecomán. Autopista Colima-Manzanillo Km. 35, Tecomán, Colima, México. 28930. garcia.concepcion@inifap.gob.mx
[60] Universidad de Colima, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (FCBA). Autopista Colima-Manzanillo Km. 40, La Estación, 28930, Tecomán, Colima. coia.tecoman@gmail.com
[61] INIFAP, Campo Experimental Valle de Apatzingán. Km. 17.5, Carretera Apatzingán Cuatro Caminos, Antúnez, Parácuaro, Michoacán, México. C.P. 60781. alvarez.juan@inifap.gob.mx

que recibió más fertilizantes nitrogenados. La mayor concentración foliar fue de K^+, el menor fue Na^+.

Palabras clave: Ionómetros, extracto celular de hojas, intervalos de concentración.

Abstract

Mexican lime cultivation generates a large number of jobs year-round in the state of Colima. Due to declining profitability and productivity, management tools and methods have been proposed to ensure the efficient use of inputs—such as fertilizers, which can be applied based on nutrient measurements in the plant's aerial parts. Consequently, the evolution of yield and foliar nutrient levels was evaluated under different fertilization management regimes.

The evaluation was conducted at INIFAP, in a warm, semi-dry climate with clay-loam soil. Yield and leaf nutrient content were assessed across four fertilization treatments. The experimental units consisted of five-year-old lime trees arranged in a randomized complete block design. A mean comparison analysis was performed, and a proposal for foliar nutrient concentration ranges was developed.
Productivity increased over time across all fertilization treatments. The "replacement fertigation" treatment was the most productive, while the treatment receiving only irrigation was the least productive. Leaf nutrient content varied among treatments but showed no statistically significant differences after six months of evaluation. Nitrate levels showed a pattern proportional to fruit yield. Potassium achieved the highest leaf concentration, followed by nitrate, calcium, and sodium. Efficient fertilizer use resulted in higher yields while simultaneously reducing the total quantity of fertilizer applied (in kilograms).

The replacement fertigation treatment was the most productive, whereas the irrigation-only treatment was the least productive. The highest NO3- ion concentration was observed with fertigation, while the lowest occurred in the treatment receiving the highest amount of nitrogenous fertilizers. K+ showed the highest foliar concentration, while Na+ showed the lowest.

Keywords: Ion meters, leaf cell sap, concentration ranges.

Introducción

El limón mexicano [*Citrus aurantifolia* (Cristm.) Swingle], a través de su cadena productiva genera gran cantidad empleos todo el año, tanto para el manejo del cultivo, la cosecha y

procesamiento de la fruta (Robles *et al*., 2017). Las entidades federativas de mayor relevancia son Michoacán, Colima, Oaxaca y Guerrero con 60,491, 21,086, 11,731 y 7,274 hectáreas cultivadas respectivamente (DGSIAP, 2024). Debido a la disminución de la rentabilidad y productividad ocasionadas por el aumento de precios en insumos, problemas fitosanitarios como el HLB y otros, se buscan estrategias para mejorar la sanidad del cultivo, así como optimizar el uso de agroquímicos y fertilizantes. En el estado de Colima, ha cobrado relevancia producir limón mexicano utilizando lo menos posible pesticidas, sustituyéndolos por productos de origen orgánico y otras labores culturales (COEPLIM, 2026). Respecto a la nutrición de limón, aún prevalece la utilización de fertilizantes de origen mineral o síntesis química, debido a su impacto en rendimiento, además, no existen sustitutos orgánicos que los suplan al 100%. Insumos orgánicos utilizados para fertilizar cultivos presentan variedad y menor concentración de elementos minerales, respecto a un fertilizante mineral o de síntesis química (IFA, 1992); estos últimos también brindan mayor practicidad en trasporte y aplicación en campo. Sin embargo, el uso indiscriminado de cualquier tipo de fertilizante (orgánico e inorgánico), puede poner en peligro el ecosistema (Choudhary *et al*., 2026). Para lograr mayor eficiencia en la utilización de fertilizantes de síntesis química, es necesario llevar a cabo estrategias para la medición de nutrimentos, ejemplos: diagnósticos de suelo, agua y foliar. Respecto al diagnóstico foliar, se ha propuesto el monitoreo constante de savia del peciolo, ya que dicha evaluación informa sobre el estado del nitrógeno en el cultivo (Padilla *et al*., 2020). Con dicho diagnóstico se ajustan rápidamente niveles de nutrimentos, se optimiza el uso de fertilizantes, se evitan pérdidas y contaminación de nutrimentos como el nitrógeno (Peña-Fleitas *et al*., 2021). Para aumentar la eficiencia en el uso de fertilizantes en limón mexicano, una estrategia es la medición de nutrimentos en parte aérea de la planta. Es por ello que, se planteó como objetivo: evaluar la evolución del rendimiento y de nutrimentos foliares en limón mexicano con distintos manejos de fertilización.

Materiales y métodos

La evaluación se realizó en el Campo Experimental Tecomán del INIFAP, en una huerta de la variedad comercial 'Colimex', de cinco años de establecida. Se realizaron mediciones mensuales del extracto celular foliar utilizando ionómetros portátiles HORIBA®; las determinaciones fueron de nitratos (NO_3^-), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y sodio (Na^+). También se evaluó el rendimiento en kilogramos por árbol durante seis cosechas, en cuatro tratamientos de nutrición. Para las mediciones foliares se colectaron mensualmente hojas del cítrico durante un horario de 7:30 a 8:30 de la mañana, en brotes vegetativos ubicados en los cuatro puntos cardinales de la planta correspondiente.

La cantidad de muestra por árbol fue 12 hojas, agrupadas por cada tratamiento con su respectiva repetición fueron un total de 108. En laboratorio las hojas se lavaron con agua destilada, se escurrieron y secaron con papel absorbente para retirar restos de agua, posteriormente se tomó una muestra aleatoria de hojas, las cuales se trozaron con tijeras para facilitar la extracción del fluido celular y se procedió a la medición (Figura 1 A).

La decisión de analizar hoja completa fue debido a que el peciolo en limón mexicano es muy pequeño, requiriendo por lo menos 250 hojas para obtener dos gotas de extracto celular del peciolo; lo cual resulta tardado e impráctico para una determinación rápida de nutrimentos en campo. También se evaluó rendimiento o producción por árbol colectando y pesando los frutos por cada tratamiento de nutrición (Figura 1 B).

Esto fue durante seis ocasiones en los meses donde fueron monitoreados los nutrimentos de hojas, a excepción de la última cosecha que fue 42 días después, debido a que no hubo frutos durante el último muestreo foliar. Los tratamientos de fertilización fueron los siguientes: T1= recomendación local y regional (Medina-Urrutia *et al*., 2001); la cual consiste en la proporción en unidades: 0.60-0.28-0.28 (kg/planta/año). T1 fue equivalente a 50, 23 y 23 g/planta/mes de N-P-K respectivamente, donde los fertilizantes sólidos granulados fueron: urea, superfosfato triple, sulfato de potasio, y su aplicación fue mensual. T2= utilizando la herramienta de restitución, el requerimiento en unidades fue: 20, 4.0, 23, 7.0, 1.0 y 0.7 de N, P, K, Ca, Mg y S respectivamente, más 0.07 de microelementos (g/planta/mes). Los productos fueron sólidos granulados: urea, superfosfato triple, sulfato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de magnesio, azufre elemental y un mix de microelementos. T3= mediante la herramienta de restitución, pero vía fertirriego: 19.6, 4.1, 22.9, 7.2, 1.0 y 0.7 de N, P, K, Ca, Mg y S respectivamente; más 0.07 de microelementos (g/planta/mes). Los fertilizantes utilizados fueron: fosfonitrato y urea (alternados), fosfato monopotásico, sulfato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de magnesio, azufre elemental y un mix de microelementos. T4= sin aplicación de fertilizantes (solo el riego). Esto fue en un suelo franco arcilloso, con pH de 7.7, materia orgánica de 2.3%, conductividad eléctrica de 1.2 dS/m; y condición climática cálida semiseca.

El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorios con nueve réplicas por tratamiento, donde la unidad experimental fue cada árbol. Se realizó análisis de comparación de medias Tukey α=0.05, empleando el programa estadístico InfoStat 2018. También se determinó coeficiente de determinación (R^2) mediante ecuación lineal y desviación estándar, utilizando el programa Excel de Microsoft, esto, para una propuesta de intervalos de concentración de nutrimentos en hojas.



Figura 1. Proceso de extracción del fluido celular de hojas completas y su posterior medición con ionómetros portátiles (A). Cosecha del tratamiento de fertilización por restitución (T2), para su posterior registro de peso de frutos (B).

Resultados y discusión

Rendimiento en kilogramos por árbol. El tratamiento tres (T3) fue el que presentó la producción por árbol más alta, siguiendo el T2 (Cuadro 1), ambos tratamientos utilizaron la fertilización por restitución. El T1 de fertilización granular tradicional fue el tercero en promedio general de rendimiento, el T4 con la aplicación solo de agua, fue el más bajo en obtención de frutos cosechados y diferente estadísticamente a los tratamientos de fertilización por restitución (Cuadro 1). Exceptuando la primera fecha del registro de rendimientos, todos los tratamientos de fertilización fueron de menos a más en productividad, siendo la última fecha (abril) la de mayor rendimiento. Dada la condición agroecológica, en el estado de Colima la producción de frutos se tiene durante todo el año, sin embargo, alcanza su máximo nivel de abril a septiembre (Robles *et al*., 2014).
Análisis de nutrimentos con ionómetros portátiles.

En el caso del NO_3^- se obtuvo el resultado promedio mayor en el tratamiento de fertirriego (T3), el cual fue el más productivo (Cuadro 1). Por tanto, el nitrógeno contenido en hojas tiene relevancia en la productividad del árbol de limón. Ya que la concentración de dicho

nutrimento obtuvo un comportamiento proporcional al incremento en rendimiento de los tratamientos. Respecto al T1, que recibió mayor cantidad de fertilizantes nitrogenados, el promedio de NO_3^- fue el menor, e incluso superado en concentración por el T4 que no recibió ningún fertilizante. Por tanto, no siempre es necesario aplicar cantidades excesivas de un fertilizante nitrogenado para ser aprovechado o traslocado al sistema planta, en este caso a las hojas. Es probable que la alternancia en fuentes o especies de nitrógeno que se otorgaron al T3, generaron mayor concentración de nitratos al igual que más rendimiento. Respecto al K^+ fue el nutrimento con mayor concentración foliar, con más de 3,600 ppm promedio (Cuadro 1).

El T4 presentó mayor concentración de K^+, lo cual puede deberse a que el estudio se estableció en un suelo franco arcilloso con alto contenido de dicho nutrimento. El T4 fue el tratamiento menos productivo, con ello cobra relevancia la extracción del K^+ por los frutos. Mediante la interpretación del análisis de suelo, son incorporados algunos fertilizantes necesarios por el cultivo, al no aplicar dichos nutrimentos ciertas concentraciones y sus relaciones pueden verse alteradas al interior del cítrico.

Lo anterior pudo verse expresado en los tratamientos T1 y T4, ya que no consideraron la herramienta del análisis de suelo y su posterior interpretación por el método de restitución. Respecto a los iones de Ca^{2+} fueron mayores en el T1, durante los meses de noviembre a febrero su concentración fue menor en todos los tratamientos, en marzo y abril sucedió lo contrario (Cuadro 1). El sodio (Na^+) fue el nutrimento de menor concentración, y a través del tiempo no obtuvo tanta variabilidad en sus resultados, esto fue en todos los tratamientos.

Y fue mayor en los meses de febrero y marzo, siendo los tratamientos T3 y T4 los que menor Na^+ presentaron. Generalmente Na^+ es un ion indeseable, sin embargo, es necesario para la osmorregulación y producción de biomasa, además, puede sustituir al potasio en algunas funciones como el equilibrio hídrico (Wakeel, *et al*., 2011). El Na^+ se concentró mayor en las hojas del T1, lo cual puede tener relación con la sobre fertilización en dicho tratamiento.

Cuadro 1. Concentración de nutrimentos foliares a través del tiempo utilizando ionómetros portátiles.

Tratamientos	Fechas	Rendimiento (kg/árbol)	Monitoreo de nutrimentos			
			NO_3 (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Na (ppm)
T1	nov-22	4.7	500	4700	290	72
	dic-22	0.8	980	1100	190	70
	ene-23	1.4	1154	2474	179	72
	feb-23	3.6	1400	4000	180	79

	mar-23	2.9	1800	3900	570	89
	abr-23	7.5	2600	4000	470	66
Promedios		3.48 ab	1405.7 a	3362.3 a	313.2 a	74.7 a
T2	nov-22	3.6	630	6100	260	46
	dic-22	1.0	790	1000	190	60
	ene-23	1.2	1353	2522	165	62
	feb-23	7.0	2000	4200	150	67
	mar-23	3.2	2800	4000	430	80
	abr-23	11.0	2400	3900.0	400	66
Promedios		4.50 a	1662.2 a	3620.3 a	265.8 a	63.4 a
T3	nov-22	4.0	730	6300	240	44
	dic-22	1.0	1000	1000	190	61
	ene-23	1.2	1358	2425	165	66
	feb-23	6.1	1800	4000	150	76
	mar-23	4.6	2700	3800	350	53
	abr-23	12.5	3100	4100	400	60
Promedios		4.90 a	1781.3 a	3604.2 a	249.2 a	60.1 a
T4	nov-22	1.3	920	5300	190	42
	dic-22	0.6	900	1200	180	63
	ene-23	0.4	1455	3250	165	63
	feb-23	5.5	2100	5500	160	66
	mar-23	2.0	2500	3800	360	71
	abr-23	9.8	2300	3900	400	53
Promedios		3.27 b	1695.8 a	3824.9 a	242.5 a	59.6 a

Con base a los resultados anteriores, se propusieron intervalos de concentración de iones en fluido celular de hojas de limón mexicano, mediante equipos portátiles durante los meses de estudio (Cuadro 2). Los cuales se obtuvieron de tratamientos con el coeficiente de determinación (R^2) mayor. Para NO_3^- la R^2 mayor fue para los tratamientos T3 y T4 con 0.587 y 0.398 respectivamente. Respecto al K^+ el T1 obtuvo mayor R^2 siguiendo el T3 con 0.542 y 0.184 respectivamente. Para el Ca^{2+} fueron los tratamientos T3 y T4 con 0.502 y 0.353.

El caso del Na^+ el R^2 fue mayor en T1 y T4 con 0.552 y 0.152 respectivamente. Los intervalos se establecieron con la desviación estándar (DE) de la información de nutrimentos en tratamientos seleccionados. En algunos meses se generaron mayores DE, por ello en dicha situación el intervalo se amplió más (Cuadro 2).

De acuerdo con la información obtenida la fertiirrigación permite ofrecer un mejor rendimiento en cítricos; además, el fertirriego puede reducir la utilización de fertilizantes comparándolo con un sistema tradicional (Alva *et al*., 2008; Mattos *et al*., 2010). Respecto a los 96 g/planta/mes de fertilizantes utilizados en el T1, no fueron significativos para una concentración foliar mayor de nutrimentos en hojas, al igual que una mayor producción. Ya que los tratamientos T2 y T3 emplearon 55.77 y 55.57 g/planta/mes de fertilizantes respectivamente. Por tanto, no importa la cantidad de fertilizantes a emplear, si no el balance y fraccionamiento de todos los nutrimentos demandantes por el cultivo, desde luego utilizando la herramienta del análisis de suelo. Respecto a los iones monitoreados, se obtuvieron diferencias en concentración de acuerdo al manejo nutricional otorgado, en este sentido, es importante seguir con evaluaciones durante todo el año, igualmente para confirmar lo encontrado, o si es el caso contrastar los resultados. Para evaluaciones posteriores es importante incorporar variables derivadas de la fotosíntesis como es el caso de los almidones y azúcares, para este último pudiesen ser los °Brix. Ya que la concentración de azúcares en las hojas se afecta en plantas enfermas con HLB, esto durante el verano e invierno, siendo mayor en este último periodo (Manzanilla *et al*., 2022).

Cuadro 2. Propuesta de intervalos de nutrimentos en hoja completa de limón mexicano utilizando ionómetros portátiles durante seis meses de muestreo.

Meses	Intervalos de concentración							
	NO_3^- (ppm)		K^+ (ppm)		Ca^{2+} (ppm)		Na^+ (ppm)	
Noviembre	730	860	6,300	7,000	240	280	44	64
Diciembre	1,000	1,100	1,000	1,100	190	200	60	70
Enero	1,360	1,400	2,400	2,500	165	175	66	76
Febrero	1,800	2,000	4,000	4,100	150	160	70	80
Marzo	2,700	2,800	3,800	3,900	350	360	50	70
Abril	3,100	3,500	4,100	4,200	400	410	60	65
Promedios	1781.7	1943.3	3600.0	3800.0	249.2	264.2	58.4	70.8

Conclusiones

Tratamiento de fertirriego que incluye el método por restitución (T3) fue el más productivo, lo contrario fue el tratamiento que solo recibió riego (T4), ambos diferentes estadísticamente. La mayor concentración de iones NO_3^- se obtuvo en T3, en contraste, tratamiento que recibió mayor cantidad en kilogramos de fertilizante nitrogenado (T1) fue menor. Concentración de NO_3^- en los tratamientos obtuvo comportamiento proporcional al aumento de rendimientos. El K^+ fue el nutrimento con mayor concentración foliar, con más de 3,600 ppm. El Ca^{2+} fue

mayor en el T1, durante noviembre a febrero su concentración fue menor en todos los tratamientos, en marzo y abril fue lo contrario. El Na^+ obtuvo menor concentración foliar en los tratamientos, a través del tiempo no obtuvo gran variabilidad en su concentración. El manejo de fertilización o nutrición otorgada, tiene efectos en la concentración de iones en hojas de limón mexicano, aunque sin diferencias significativas. La propuesta de intervalos de concentración de iones en fluido de hojas, permite lograr mayor eficiencia en la utilización de fertilizantes de síntesis química.

Agradecimientos y fuente financiadora

Recursos propios y del proyecto: Diagnóstico de la fertilidad y del carbono orgánico en diferentes usos de suelo con limón mexicano.

Literatura citada

Alva, A. K., Mattos, D., & Quaggio, J. A. (2008). Advances in Nitrogen Fertigation of Citrus. Journal of Crop Improvement, 22(1), 121–146. https://doi.org/10.1080/15427520802072967

Choudhary, R. C., Singh, P. K., Parmar, Y. C. J., & Lakshmanan, A. (2026). Novel Developments in Nano Fertilizer for Sustainable Crop Production to Promote Global Food Security. Sustainability, 18(7), 3198. https://doi.org/10.3390/su18073198

COEPLIM (Consejo Estatal de Productores de Limón Mexicano). 2026. Paquete tecnológico y mantenimiento de cultivo de limón mexicano. COEPLIM. Disponible solicitando o vía telefónica. Dirección: Benito Juárez #52, Centro, 28100 Tecomán, Col. Teléfono: 313 325 4812

DGSIAP (Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2024. https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap

DGSIAP (Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2024. https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap

IFA (International Fertilizer Industry Association). 1992. World Fertilizer use Manual París, 5p. Página Web http://www.fertilizer.org

Manzanilla-Ramírez M. A., Velázquez-Monreal J. J., Robles-González M. M., Murillo-Hernández J. E., Villegas-Montier A. 2022. Efectos fisiológicos de Huanglongbing en limón

Mexicano (Citrus aurantifolia) injertado en C. macrophylla. Revista Mexicana de Fitopatología, 40(4): 1-13. DOI: https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2022-11

Mattos, J. D., Quaggio, J.A., Cantarella, H. y Boaretto, R.M. 2010. Manejo de la Fertilidad del suelo para Cítricos de alto Rendimiento. Informaciones agronómicas No. 77. p. 1-11. International Plant Nutrition Institute.

Medina, U.V.M., Robles, G.M.M., Becerra, R.S., Orozco, R.J., Orozco, S.M., Garza, L.J.G., Ovando, C.M.E., Chávez, C.X. y Félix, C.F.A. 2001. El cultivo del limón mexicano. Libro Técnico Núm. 1. 71-79 pp. INIFAP. Tecomán, Colima, México.

Padilla, F. M., Farneselli, M., Gianquinto, G., Tei, F., & Thompson, R. B. (2020). Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. Agricultural Water Management, 241, 106356.

Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., Padilla, F. M., Rodríguez, A., & Thompson, R. B. (2021). Use of a Portable Rapid Analysis System to Measure Nitrate Concentration of Nutrient and Soil Solution, and Plant Sap in Greenhouse Vegetable Production. Agronomy, 11(5), 819. https://doi.org/10.3390/agronomy11050819

Robles-González M. M., Manzanilla-Ramírez M. A. y Carillo-Medrano S.H. 2014. Cap. 7. Fenología y poda. p. 28, 136 y 137. En, Orozco-Santos M., Robles-González M.M., Velázquez-Monreal J.J., Manzanilla-Ramírez M.M. (Eds.). El Limón Mexicano (Citrus Aurantifolia). Libro Técnico Núm 1. Ciudad de México. México: Editorial Prometeo Editores. 475 pp.

Robles-González, Marciano Manuel, Orozco-Santos, Mario, Manzanilla-Ramírez, Miguel Ángel, Velázquez-Monreal, José Joaquín, & Carrillo-Medrano, Silvia Heréndira. (2017). Efecto del HLB sobre el rendimiento de limón mexicano en Colima, México. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 8(5), 1101-1111. https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.111

Wakeel, A., Farooq, M., Qadir, M., & Schubert, S. (2011). Potassium Substitution by Sodium in Plants. Critical Reviews in Plant Sciences, 30(4), 401–413. https://doi.org/10.1080/07352689.2011.587728

Fertilidad química de suelos maiceros de Quintana Roo

César Antonio Casasola-Elizondo[62], Erick Cortez-Torres, Francisco Rodriguez-Neave[63], Efren Andrés-Saucedo

Resumen

La fertilidad química del suelo se evalúa mediante el análisis establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000, que permite diagnosticar la disponibilidad de nutrimentos y detectar posibles problemas nutricionales, cuya variabilidad está asociada con las características edáficas y el manejo agrícola. El objetivo del presente estudio fue evaluar la variabilidad regional de la materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) de cuatro municipios productores de maíz en el estado de Quintana Roo. Se colectaron y analizaron 40 muestras compuestas de suelo. Los datos se sometieron a análisis de varianza, comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), análisis de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (ACP). La materia orgánica (p=0.1199) y el magnesio (p=0.1303) no presentaron diferencias estadísticas entre municipios, mientras que el nitrógeno (p=0.0066), fósforo (p=0.0385), potasio (p=0.0001) y calcio (p=0.0001) mostraron diferencias significativas. El nitrógeno y magnesio presentaron la mayor correlación positiva entre variables, seguida de fósforo y calcio, mientras que la materia orgánica y magnesio mostraron mayor correlación negativa, seguida de calcio y magnesio. El ACP explicó el 56 % de la variabilidad total mediante dos componentes al evidenciar una diferencia regional determinada por la distribución de N, P, K y Ca. Los resultados evidencian una variación espacial de la fertilidad química del suelo, lo que puede contribuir a establecer un manejo nutrimental específico para cada región y municipio.

Palabras clave: Materia orgánica, macronutrientes, componentes principales

Abstract

Soil chemical fertility is evaluated through the analysis established in NOM-021-RECNAT-2000, which allows diagnosing nutrient availability and detecting potential nutritional problems, whose variability is associated with edaphic characteristics and agricultural

[62] Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria – Campo Experimental Chetumal. Carretera Chetumal-Bacalar km 25, Xul-Ha, Quintana Roo, México. CP 77963. Correo: casasola.cesar@inifap.gob.mx
[63] Universidad Autónoma Chapingo – Departamento de enseñanza investigación y servicio en Suelos. Carretera México – Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. México. CP 56230. Correo: al22115165@chapingo.mx , frodriguezn@chapingo.mx , al21112725@chapingo.mx

management. The objective of this study was to evaluate the regional variability of organic matter (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg) in four maize producing municipalities in the state of Quintana Roo. Forty composite soil samples were collected and analyzed. Data were subjected to analysis of variance, mean comparison using Tukey's test ($p \leq 0.05$), Pearson correlation analysis, and principal component analysis (PCA). Organic matter (p=0.1199) and magnesium (p=0.1303) showed no statistical differences among municipalities, whereas nitrogen (p=0.0066), phosphorus (p = 0.0385), potassium (p = 0.0001), and calcium (p = 0.0001) showed significant differences. Nitrogen and magnesium presented the highest positive
correlation between variables, followed by phosphorus and calcium, while organic matter and magnesium showed the highest negative correlation, followed by calcium and magnesium. PCA explained 56 % of the total variability through two components, revealing a regional difference determined by the distribution of N, P, K, and Ca. The results demonstrate a spatial variation in soil chemical fertility, which can contribute to establishing specific nutrient management for each region and municipality.

Keywords: Organic matter, macronutrients, principal components

Introducción

El maíz es uno de los cereales de mayor importancia mundial y constituye una fuente de nutrientes para los seres humanos y los animales, además de ser utilizado como materia prima para diversos procesos industriales (FAO, 1993). El maíz (*Zea mays* L.) es de los cultivos de mayor importancia en México por su contribución a la seguridad alimentaria y relevancia económica y social para miles de productores. En Quintana Roo, este cultivo se desarrolla bajo condiciones de temporal y se destina, en gran medida, al autoconsumo. Sin embargo, de acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2026), el estado a nivel nacional tuvo un rendimiento promedio en producción de maíz de 1.25 t ha^{-1}, el cual fue inferior al promedio nacional de 3.66 t ha^{-1}. Esta diferencia evidenció la necesidad de identificar factores que limitan la productividad del cultivo en la región.

El crecimiento y rendimiento de los cultivos son el resultado de la interacción entre diversos factores ambientales, genéticos y de manejo. Entre ellos, el suelo desempeña un papel fundamental al constituir el medio donde se desarrolla el sistema radical y del cual las plantas obtienen el agua y los nutrimentos necesarios para su crecimiento (Ticona Quispe, 2018). El nitrógeno (N) es un macronutriente esencial para el desarrollo vegetal. Está involucrado en funciones como la síntesis de proteínas, la producción de clorofila y el crecimiento de los tejidos. El nitrógeno es el nutrimento mineral requerido en mayor proporción por las plantas

y es absorbido a través del sistema radical en forma de nitrato, amonio y aminoácidos. La disponibilidad de estas formas en el suelo depende de diversos factores ambientales, lo que influye en su aprovechamiento por los cultivos (Miller & Cramer, 2005).

El potasio (K) es un macronutriente esencial involucrado en procesos fisiológicos como la regulación osmótica, apertura y cierre estomático, la activación enzimática y el transporte de fotoasimilados, contribuyendo al mantenimiento de la fotosíntesis y al crecimiento de las plantas (Tränkner et al., 2018). El potasio es absorbido por la raíz de la planta en su forma iónica K^+.

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en la captación, almacenamiento y transferencia de energía, además de formar parte de compuestos fundamentales como los ácidos nucleicos, los fosfolípidos y el ATP, por lo que interviene en numerosos procesos fisiológicos, es absorbido por las raíces en forma de ortofosfato diácido ($H_2PO_4^-$) y, en menor proporción, como ortofosfato dibásico (HPO_4^{2-}) (Fernández, 2007). Sin embargo, su disponibilidad en el suelo es influenciada por el pH y por las reacciones que establece con los minerales presentes. En suelos calcáreos, la elevada concentración de calcio en formas de calcita y dolomita favorece la precipitación del fósforo en formas poco solubles, reduciendo su disponibilidad para las plantas y limitando el aprovechamiento de los fertilizantes fosfatados. A su vez, el calcio (Ca) es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas tanto en condiciones de no estrés como en condiciones de estrés el cual cumple una doble función, siendo no solo un factor importante para la estabilidad de la pared celular y la membrana, el cual es absorbido cuando está presente en la solución del suelo en su forma iónica de Ca^{2+}. Sirve como un segundo mensajero en muchos procesos de desarrollo y fisiología, incluida la respuesta de las plantas al estrés biótico (Thor, 2019).

El magnesio (Mg) es un nutrimento esencial para las plantas que se encuentra en el suelo formando parte de minerales primarios y secundarios, los cuales, mediante procesos de intemperismo, liberan Mg^{2+} a la solución del suelo. Una vez disponible, este elemento puede ser absorbido por las plantas o microorganismos, adsorbido en el complejo de intercambio o permanecer sujeto a procesos de precipitación. La disponibilidad del Mg puede verse afectada por las características del suelo y por la presencia de otros cationes, debido a que una elevada relación Ca/Mg puede favorecer condiciones de deficiencia de Mg. Asimismo, la absorción de este elemento por las plantas puede verse influenciada por la presencia de otros nutrimentos, como potasio y amonio, los cuales pueden antagonizar su absorción (Alcántar-González et al., 2016).

La productividad agrícola depende, en gran medida, de la calidad y fertilidad del suelo la cual está influenciada por procesos de degradación física, química y biológica, junto con prácticas de manejo, las cuales pueden afectarla y limitar la disponibilidad de nutrimentos esenciales, afectando el crecimiento y rendimiento de los cultivos. La materia orgánica constituye uno de los principales componentes de la fertilidad del suelo al actuar como reservorio de nutrimentos y regular su disponibilidad mediante procesos de mineralización. Su descomposición favorece el suministro de N, P y otros nutrimentos esenciales para las plantas, mientras que su contenido se relaciona con la disponibilidad de diversos elementos minerales y, en consecuencia, con la nutrición y crecimiento de los cultivos (Alcántar-González et al., 2016). Motivo por el cual el objetivo del presente estudio fue evaluar la variabilidad regional de la materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) de cuatro municipios productores de maíz en el estado de Quintana Roo.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en suelos agrícolas ubicados en los municipios de Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos y Othón P. Blanco, en el estado de Quintana Roo, México. El estado se localiza en la porción oriental de la Península de Yucatán, entre los $17°53'38''$ *y* $21°36'20''$ de latitud norte y los $86°42'37''$ *y* $89°17'48''$ de longitud oeste (Figura 1). Pertenece a la provincia Península de Yucatán y comprende las subprovincias Carso Yucateco, Carso y Lomeríos de Campeche y Costa Baja de Quintana Roo. Predomina un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano [A(w)], con temperatura media anual de $24.9\ a\ 27.7\ °C$ y precipitación media anual de $1118\ a\ 1550\ mm$. La geología está constituida en su mayoría por materiales del Cenozoico, entre los que predominan las rocas sedimentarias, sobre los cuales se desarrollan grupos de suelo como Leptosoles, Vertisoles y Phaeozems. Los principales usos del suelo y tipos de vegetación corresponden a selva, vegetación hidrófila y agricultura, destacando cultivos como maíz, frijol, calabaza y caña de azúcar (INEGI, 2021).



Figura 1. Ubicación de Quintana Roo en la península de Yucatán, México.
Fuente: Elaboración propia.

Muestreo de suelos

La colecta de las muestras se utilizó una pala recta, bolsas de plástico transparente con capacidad de 2 kg, marcadores de tinta indeleble, etiquetas de identificación y bolígrafo. Se empleó un muestreo en zigzag en parcelas agrícolas de los municipios descritos. En cada municipio se seleccionaron de manera aleatoria diez parcelas agrícolas las cuales pertenecen a diferentes productores. En cada parcela se recolectaron 15 submuestras a una profundidad de 0–0.30 m, las cuales se homogenizaron para obtener una muestra compuesta representativa. Las muestras se secaron a temperatura ambiente, se disgregaron con un mazo de madera y se tamizaron mediante una malla No. 10 (2 mm), de acuerdo con el método AS-01 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).

Análisis de suelos

El contenido de materia orgánica (MO) se determinó con el método AS-07; el nitrógeno inorgánico (N) con el método AS-08; el fósforo extraíble (P) en suelos de reacción neutra a alcalina con el método AS-10; el potasio (K), calcio (Ca) y Magnesio (Mg) intercambiable con el método AS-13, conforme a los procedimientos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002). Los resultados de los parámetros químicos se observan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de los parámetros químicos de los suelos de Quintana Roo.

Municipio	Muestra	MO	N	P	K	Ca	Mg
		%	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
Othón P. Blanco	1	3.77	61.25	8.3	364.68	10897.9	593.24
	2	3.57	3.5	14.3	210.24	16747	554.08
	3	7.2	56	18.9	606.96	15560.06	1003.26
	4	4.37	29.75	50.1	556.92	11988.7	342.62
	5	4.76	8.75	4.5	653.1	16008.84	361.02
	6	4.47	66.5	22.9	624.96	16959.92	410.38
	7	6.65	5.25	16.6	343.68	14699.54	639.72
	8	9.63	8.75	19	186.72	13106.46	343.75
	9	4.67	3.5	8.3	496.7	12818.54	401.38
	10	6.05	68.25	2.5	327	6345.16	4223.48
Felipe Carrillo Puerto	11	8.24	13	3.24	484	11548.12	423.28
	12	5.31	8.38	1.97	619	6880.44	309.1
	13	5.8	9.2	1.09	493	4143.04	410.74
	14	5.72	8.93	2.9	500	2917.42	299.56
	15	7.53	5.77	4.6	474	3733.4	419.58
	16	5.91	6.5	13	512	3730.32	346.4
	17	5.06	4.6	9.4	608	3126.86	288.56
	18	4.34	6.75	5	544	4327.62	546.7
	19	4.86	8.1	5.6	778	2909.28	281.98
	20	3.88	8.65	11.1	814	1945.46	480.26
Jose María Morelos	21	7.54	19.25	22.8	832.44	5872.84	328.72
	22	6.55	26.25	4	600.6	9419.62	348.12
	23	7.35	8.75	7.3	969.36	5856.44	354.26
	24	5.46	10.5	20.8	533.28	6732.2	236.06
	25	5.56	14	21.7	1265.88	8473.06	326.22
	26	5.56	12.25	3.3	359.76	5005.28	404.78
	27	6.15	12.25	13	415.08	3488.28	356.64
	28	4.07	14	8.4	587.04	4095.9	204.72
	29	6.15	10.5	24.1	1112.58	4377.98	317.58
	30	5.66	8.75	7.1	1078.98	6086.86	294.48
Bacalar	31	7.74	5.25	17.6	1040.34	14974.26	559.8
	32	8.04	17.5	15.7	1252.02	13646.88	283.12

	33	7.44	14	33.4	544.32	11954.78	379.2
	34	6.45	7	20.7	1176	12605.04	314.52
	35	6.8	17.5	16.3	1043.7	16250.22	498.92
	36	10.03	19.25	35.9	1012.2	12874.66	294.84
	37	8.93	5.25	10.1	1026.9	6793.7	361.62
	38	5.06	17.5	9	1218.84	14183.1	293.42
	39	6.15	8.75	8.7	879.06	11935.26	285.66
	40	4.07	3.5	8.9	1215.48	12611.14	345.36

Diseño experimental y análisis estadístico

Se realizó un estudio observacional comparativo mediante un muestreo de suelos en cuatro municipios productores de maíz. Las variables seleccionadas se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) bajo un modelo lineal generalizado univariado, seguido de una prueba de comparación de medias de Tukey donde los resultados con ($Pr \leq 0.05$) se consideran significativos El procesamiento estadístico se realizó con ayuda del Software SAS OnDemand for Academics (SAS Institute Inc., 2024). Asimismo, el análisis de componentes principales (PCA) se realizó a partir de la matriz de correlación de Pearson de las variables estandarizadas con la librería FactoMineR del software Rstudio v.1.2.1335 donde los eigenvalores muestran la contribución de cada variable. (RStudio Team, 2020).

Resultados y discusión

La materia orgánica de los cuatro municipios no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$). Asimismo, la prueba de Tukey agrupó a Othón P. Blanco, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos y Bacalar en un mismo grupo estadístico. De acuerdo con la clasificación del método AS-07 (*Cuadro 2)* de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002), Othón P. Blanco y Felipe Carrillo Puerto presentaron un contenido alto de materia orgánica, mientras que José María Morelos y Bacalar se clasificaron con un contenido muy alto.

Cuadro 2. Clasificación de Materia Orgánica de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000

Clase	Materia Orgánica (%)
Muy bajo	< 0.5
Bajo	0.6 - 1.5
Medio	1.6 - 3.5

Alto	3.6 6.0
Muy alto	> 6

El municipio de Othón P. Blanco presentó el mayor contenido de nitrógeno, con una media de 31.15 mg kg^{-1}, clasificándose como un nivel medio, mientras que Felipe Carrillo Puerto presentó la menor concentración con 7.99 mg kg^{-1} clasificado como muy bajo de acuerdo con el método AS-08 (Cuadro 3) de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).

Cuadro 3. Clasificación de N inorgánico de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000

Clase	mg kg^{-1} de N inorgánico
Muy bajo	0 - 10
Bajo	10 - 20
Medio	20 - 40
Alto	40 - 60
Muy alto	> 60

El municipio de Bacalar presentó el mayor contenido de fósforo, con una media de 17.63 mg kg^{-1} clasificándose como un nivel alto de acuerdo con el método AS-10 (Cuadro 4) de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002), mientras que Felipe Carrillo Puerto presentó el menor contenido de fósforo, con una media de 5.79 mg kg^{-1}, clasificándose como un nivel medio siendo el más bajo de los cuatro.

Cuadro 4. Clasificación de P-Olsen de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000

Clase	mg kg^{-1} de P
Bajo	< 5.5
Medio	5.5 - 11
Alto	> 11

En el Cuadro 5 se observa que los niveles de potasio intercambiable presentaron diferencias significativas entre los municipios, con la mayor concentración de este elemento en Bacalar con una media de 1040.89 mg kg^{-1} y la menor en Othón P. Blanco 437.10 mg kg^{-1}. Othón P. Blanco y Bacalar presentaron los contenidos más altos de Calcio intercambiable, agrupados ambos en el mismo grupo estadístico a diferencia de José María Morelos y Felipe Carrillo Puerto siendo este último el de más bajo nivel. En contraste, aunque Othón P. Blanco

presentó la mayor media de magnesio 887.29 mg kg^{-1}, las diferencias entre municipios no fueron de forma estadística significativas ($p > 0.05$).

Cuadro 5. Comparación de los indicadores químicos de fertilidad de suelos agrícolas cultivados con maíz en cuatro municipios de Quintana Roo.

Municipio	MO	N	P	K	Ca	Mg
	%	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}
Othón P. Blanco	5.51 ± 1.88^{a}	31.15 ± 28.59^{a}	16.54 ± 13.59^{ab}	437.10 ± 172.87^{c}	13513.21 ± 3255.0^{a}	887.29 ± 1189.54^{a}
Felipe Carrillo Puerto	5.67 ± 1.34^{a}	7.99 ± 2.31^{b}	5.79 ± 4.04^{b}	582.60 ± 123.17^{bc}	4526.20 ± 2791.24^{b}	380.62 ± 89.95^{a}
Jose Maria Morelos	6.01 ± 1.00^{a}	13.65 ± 5.40^{ab}	13.25 ± 8.29^{ab}	775.50 ± 318.77^{b}	5940.85 ± 1882.97^{b}	317.16 ± 59.18^{a}
Bacalar	7.07 ± 1.77^{a}	11.55 ± 6.18^{a}	17.63 ± 9.91^{a}	1040.89 ± 210.50^{a}	12782.90 ± 2513.87^{a}	361.65 ± 95.43^{a}
Pr > F modelo	0.1199	0.0066	0.0385	0.0001	0.0001	0.1303
DMS	1.85	17.97	11.55	263.18	3200.9	721.59

MO = Materia orgánica, N = Nitrógeno, P = Fósforo, K = Potasio, Ca = Calcio, Mg = Magnesio, Media ± desviación estándar. DMS = diferencia mínima significativa. Medias con letras distintas en columnas presentan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$).

El análisis de correlación de Pearson (Cuadro 6) detectó asociaciones débiles a moderadas entre las variables. La mayor correlación positiva ocurrió entre nitrógeno y magnesio, seguida por la de fósforo y calcio. Esta relación positiva entre Ca y P contrasta con García y Matos (1953), quienes señalaron que el carbonato cálcico favorece la adsorción de fosfatos y propicia su precipitación insoluble, disminuyendo el fósforo en solución. En este estudio, la asociación positiva indica que los mayores contenidos de Ca coincidieron con mayores niveles de P. Esta diferencia puede atribuirse al método de extracción, ya que aquí se utilizó el método Olsen ($NaHCO_3$, pH 8.5), mientras que los autores citados emplearon soluciones con diferentes pH. También se registraron correlaciones positivas débiles entre nitrógeno-calcio, materia orgánica-fósforo, potasio-fósforo y materia orgánica-potasio.

En contraste, el potasio y el magnesio mostraron una correlación negativa. Esto se asocia al antagonismo entre bases intercambiables (Ca, Mg y K), donde la concentración elevada de

un catión inhibe la absorción de los demás. En fertilidad de suelos, estas relaciones identifican desequilibrios nutricionales, siendo habitual el antagonismo de Ca y Mg hacia el K (Molina, 2007). Sin embargo, la correlación aquí obtenida solo describe la asociación estadística entre Mg y K, sin demostrar por sí sola un efecto antagónico en la planta.

El fósforo y el magnesio también se correlacionaron de manera negativa, lo que podría deberse a niveles óptimos de Mg en la región y a la tendencia del fosfato a formar precipitados insolubles. El nitrógeno y el potasio mostraron igual tendencia negativa; no obstante, interactúan en la absorción y transporte celular como nitrato (NO_3^-) y potasio (K^+). Un manejo equilibrado de ambos optimiza la eficiencia nutricional y reduce antagonismos (Coskun et al., 2017). Por último, la materia orgánica exhibió una correlación negativa muy débil con el nitrógeno y nula con el magnesio.

Cuadro 6.- Coeficiente de correlación de Pearson de los parámetros químicos del suelo.

	MO	N	P	K	Ca	Mg
MO	1	-0.09	0.22	0.16	0.14	-0.001
N	-0.09	1	0.15	-0.2	0.25	0.56
P	0.22	0.15	1	0.17	0.36	-0.16
K	0.16	-0.2	0.17	1	0.12	-0.25
Ca	0.14	0.25	0.36	0.12	1	-0.01
Mg	-0.001	0.56	-0.16	-0.25	-0.01	1

MO = Materia orgánica, N = Nitrógeno, P = Fósforo, K = Potasio, Ca = Calcio, Mg = Magnesio

La Figura 2 muestra diferenciación parcial entre los municipios evaluados en función de los indicadores químicos. Bacalar se ubica hacia el lado positivo del primer componente y presenta una estrecha asociación con los vectores de potasio, materia orgánica y fósforo, resultado consistente con los mayores contenidos registrados en los análisis de varianza. Othón P. Blanco se distribuye hacia el cuadrante donde predomina la influencia del nitrógeno y magnesio, mientras que José María Morelos y Felipe Carrillo Puerto no presentan una mayor influencia hacia algunos de los parámetros químicos, indicando características químicas más semejantes. El calcio se queda en medio de los municipios de Bacalar y O Othón P. Blanco por su mayor contenido de calcio intercambiables sin diferencias mínimas significativas.

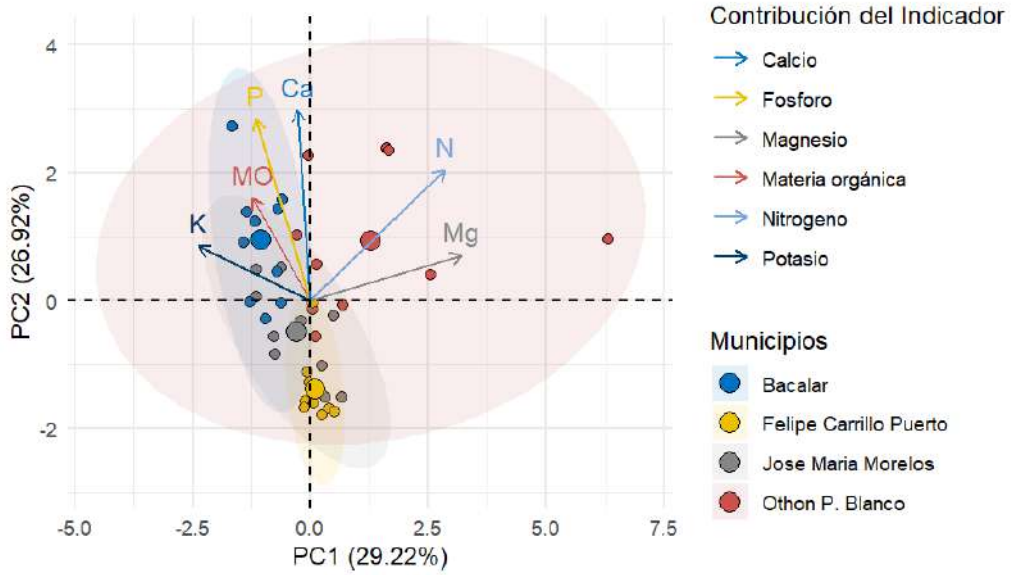


Figura 2. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Conclusiones

Se demostró una significativa variación en la fertilidad química de los suelos maiceros de Quintana Roo, impulsada por las diferencias regionales en los contenidos de N, P, K y Ca. Debido a que variables críticas como la materia orgánica no muestran diferencias entre municipios, los resultados descartan la viabilidad de un manejo homogéneo de la fertilización. Se concluye que es necesario implementar programas de manejo nutrimental específicos por región y municipio para maximizar el aprovechamiento de los nutrientes según el potencial de cada suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación. "*Proyecto apoyado por la "**Secihti**" en el año 2026*".

Literatura citada

Coskun, D., Britto, D. T., y Kronzucker, H. J. 2017. *The nitrogen–potassium intersection: Membranes, metabolism, and mechanism*. *Plant, Cell & Environment*. 40(10): 2029-2041. https://doi.org/10.1111/pce.12671

Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, *41*(2), 51–57. Fernández, M. T. (2007). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223114970009

García, F. G., & Matos, F. T. (1953). Sobre la fijación del fósforo en suelos calizos. *Rapports XXVIII Cong. Int. Quifm. Ind. Madrid*.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Aspectos geográficos. Quintana Roo*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_23.pdf

Miller, A. J., & Cramer, M. D. (2005). Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant and Soil*, *274*(1), 1–36. https://doi.org/10.1007/s11104-004-0965-1

Molina, E. (2007). Análisis de suelos y su interpretación. San José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (1993). *El maíz en la nutrición humana*. Roma, Italia: FAO. Disponible en: https://www.fao.org/4/t0395s/T0395S02.htm

Semarnat. (2002). *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. http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2026). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Thor, K. (2019). Calcium—Nutrient and messenger. Frontiers in Plant Science, 10, 440. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440

Ticona Quispe, C. (2018). Análisis comparativo de macronutrientes NPK y materia orgánica en suelos de la Estación Experimental de Sapecho-Alto Beni. *Apthapi*, *4*(2), 1089–1096. http://revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-93822018000200005&lng=es&nrm=iso

Tränkner, M., Tavakol, E., & Jákli, B. (2018). *Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection*. Physiologia Plantarum, 163(3), 414–431. https://doi.org/10.1111/ppl.12747

Propiedades físicas de sustratos formulados con fibra de coco y tezontle para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Brenda González-Mendéz[64], Sara Monzerrat Ramírez-Olvera[65*] Ana Carolina Uitz-Chin, Víctor Manuel Ordaz-Chaparro

Resumen

Los sustratos constituyen un componente fundamental en la producción hortícola, debido a que sus propiedades físicas determinan la disponibilidad de agua y aire para las raíces. La fibra de coco y el tezontle presentan características contrastantes, por lo que su combinación puede modificar las propiedades físicas del sustrato y favorecer el crecimiento vegetal. El objetivo fue evaluar el efecto de dos proporciones de fibra de coco y tezontle sobre las propiedades físicas del sustrato y el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Parris. Se utilizaron fibra de coco y tezontle rojo con tamaño de partícula >5 mm, mezclados en proporciones 50:50 y 75:25 (v/v). Las plantas se establecieron en bolsas de polietileno de 8 L bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Las plántulas se trasplantaron al presentar cinco hojas verdaderas y se irrigaron manualmente con solución nutritiva universal de Steiner. Se determinaron propiedades físicas de los sustratos y el ancho y longitud de las hojas entre los 8 y 30 días después del trasplante. La mezcla 75:25 presentó mayor porosidad total y porosidad de retención de agua respecto a la proporción 50:50, mientras que esta última presentó mayor densidad aparente. Asimismo, las plantas cultivadas en la proporción 75:25 mostraron mayor ancho y longitud de hoja durante el periodo de evaluación. Los resultados indican que la proporción de fibra de coco y tezontle modifica las propiedades físicas del sustrato y el crecimiento de la lechuga. La mezcla 75:25 presentó las condiciones físicas más favorables y promovió un mayor crecimiento foliar.

Palabras clave: cultivo sin suelo, propiedades físicas, porosidad, retención de agua, sustratos hortícolas.

[62]Universidad Tecnológica de Tecamachalco. Av. Universidad Tecnológica No.1, Col. Barrio "La Villita" Tecamachalco, Puebla. C.P. 75483. brendamendezg1234@gmail.com.mx

[63]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Edafología. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México. ramirez.sara@colpos.mx; uitz.ana@colpos.mx; ordaz@colpos.mx

Abstract

Substrates are a fundamental component of horticultural production because their physical properties determine water and air availability to plant roots. Coconut coir and tezontle have contrasting characteristics; therefore, their combination may modify substrate physical properties and promote plant growth. The objective of this study was to evaluate the effects of two coconut coir–tezontle ratios on substrate physical properties and the growth of 'Parris' lettuce (*Lactuca sativa* L.). Coconut coir and red tezontle with a particle size >5 mm were mixed at ratios of 50:50 and 75:25 (v/v). Plants were grown in 8-L polyethylene bags under a completely randomized design with 12 replicates per treatment. Seedlings were transplanted when they had developed five true leaves and were manually irrigated with Steiner's universal nutrient solution. Substrate physical properties, leaf width, and leaf length were evaluated from 8 to 30 days after transplanting. The 75:25 mixture exhibited significantly higher total porosity and water-holding porosity than the 50:50 mixture, whereas the latter showed a significantly higher bulk density. Likewise, plants grown in the 75:25 mixture exhibited greater leaf width and length throughout the evaluation period. These results indicate that the coconut coir-to-tezontle ratio modifies substrate physical properties and lettuce growth. Overall, the 75:25 mixture provided more favorable physical conditions and promoted greater leaf growth.

Keywords: soilless cultivation, physical properties, porosity, water retention, horticultural substrates.

Introducción

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza de hoja de amplia producción y consumo, apreciada por sus características nutricionales y su importancia en los sistemas de producción hortícola. Su ciclo relativamente corto facilita su establecimiento en sistemas intensivos y de cultivo sin suelo. Asimismo, su composición nutricional y respuesta a diferentes medios de crecimiento han favorecido el desarrollo de investigaciones orientadas a mejorar su productividad y calidad (Sarkar et al., 2021).

En los sistemas de cultivo en contenedor, los sustratos desempeñan un papel fundamental al proporcionar soporte al sistema radical y regular la disponibilidad de agua y aire. Un sustrato puede estar constituido por materiales minerales u orgánicos, utilizados individualmente o en mezclas, cuyas características determinan el ambiente físico en el que se desarrollan las raíces (Pire y Pereira, 2003; Quesada y Méndez, 2005). Por esta razón, sus propiedades físicas influyen directamente en el establecimiento y crecimiento de los cultivos.

Entre las principales propiedades físicas que determinan la calidad de un sustrato se encuentran la porosidad total, capacidad de aireación, retención y disponibilidad de agua, distribución del tamaño de partículas y densidad aparente. Asimismo, se requieren una elevada porosidad total, baja densidad aparente y estabilidad estructural que permitan

mantener un equilibrio adecuado entre agua y aire en la zona radical (Abad et al., 2005; López-Cuadrado y Masaguer, 2006).
Entre los materiales orgánicos empleados como sustratos destaca la fibra de coco, debido a su elevada porosidad y capacidad de retención de agua, características que favorecen el desarrollo del sistema radical. Además, su utilización permite aprovechar un subproducto de la industria del coco y constituye una alternativa para la formulación de sustratos hortícolas (Evans et al., 1996; Noguera et al., 2000).

Por otra parte, el tezontle es un material mineral de origen volcánico ampliamente utilizado en México como sustrato debido a su estabilidad física, porosidad y capacidad de favorecer la aireación y el drenaje. No obstante, sus propiedades físicas están relacionadas con factores como el tamaño de partícula y su proporción dentro de la mezcla (Burés, 1997; Raviv y Lieth, 2008). En este sentido, la combinación de fibra de coco y tezontle puede resultar complementaria: mientras la fibra de coco contribuye principalmente a incrementar la retención de agua, el tezontle puede favorecer la aireación, el drenaje y la estabilidad física del sustrato.

Por lo anterior, la proporción de ambos materiales constituye un factor relevante para establecer un equilibrio adecuado entre retención de agua y aireación que favorezca el crecimiento de las plantas. El objetivo del presente estudio fue evaluar las propiedades físicas de dos mezclas de fibra de coco y tezontle, en proporciones 50:50 y 75:25 (v/v), y determinar su efecto sobre el crecimiento de lechuga romana (*Lactuca sativa* L.).

Materiales y métodos

Sitio experimental

El experimento se realizó de mayo a julio de 2026 en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México (19°27′51.4″ N, 98°54′21.2″ O; 2240 m de altitud). El estudio se estableció bajo condiciones de invernadero tipo cenital, con cubierta de plástico y malla.

Material vegetal y establecimiento del cultivo

Se utilizaron semillas de lechuga romana (*Lactuca sativa* L.). La siembra se realizó colocando una semilla por cavidad en charolas de polietileno negro de 200 cavidades, con un volumen individual de 15 cm^3, que contenían una mezcla de turba y perlita (Multi Perl®) como sustrato para germinación.

Durante esta etapa, el riego se realizó manualmente con solución nutritiva universal de Steiner (Steiner, 1984). Cuando las plántulas presentaron cinco hojas verdaderas, se realizó el trasplante a las unidades experimentales que contenían las diferentes mezclas de fibra de coco y tezontle.

Para la preparación de las mezclas se utilizó tezontle rojo con tamaño de partícula <5 mm y fibra de coco de la empresa Organia de México®. Previo a su utilización, la fibra de coco se lavó con agua potable hasta obtener una conductividad eléctrica (CE) de 0.08 mS cm^{-1}.

Diseño experimental y tratamientos

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar. Se evaluaron dos tratamientos correspondientes a las proporciones volumétricas de fibra de coco:tezontle (FC:T): 50:50 y 75:25 (v/v). Cada tratamiento estuvo constituido por cuatro repeticiones.

La unidad experimental consistió en una bolsa de polietileno negro de 8 L que contenía la mezcla de sustrato correspondiente y una planta de lechuga.

Variables de crecimiento

Para evaluar el crecimiento de las plantas se determinaron el ancho de hoja, longitud de hoja, diámetro de tallo y número de hojas. Las evaluaciones iniciaron a los 7 días después del trasplante (ddt) y posteriormente se realizaron a intervalos de siete días hasta la cosecha.

El ancho y la longitud de las hojas se determinaron con una regla graduada; el diámetro del tallo se midió con un vernier y el número de hojas se determinó mediante conteo directo.

Propiedades físicas de los sustratos

Las propiedades físicas de las mezclas de sustrato se determinaron en el Laboratorio de Física de Suelos del Posgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

Las muestras de sustrato se colocaron en recipientes de volumen conocido y se saturaron con agua durante 24 h, manteniendo una lámina de agua de aproximadamente 1 a 2 cm sobre la superficie.

Posteriormente, los recipientes se retiraron de la saturación y se dejaron drenar libremente durante 5 h. Al finalizar este periodo se determinó la masa del sustrato drenado.

Posteriormente, las muestras se colocaron en una estufa de secado a 60 °C durante 24 h y se registró la masa seca. A partir de los volúmenes y masas obtenidos se calcularon la porosidad total, porosidad de aireación, porosidad de retención de humedad y densidad aparente.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) y se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Los análisis se realizaron con el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 2021).

Resultados y discusión

Propiedades físicas de las mezclas de sustrato

La proporción de fibra de coco y tezontle modificó significativamente las propiedades físicas de los sustratos. La mezcla fibra de coco:tezontle 75:25 (v/v) presentó mayor porosidad total y porosidad de retención de agua en comparación con la proporción 50:50 (v/v). En contraste, la porosidad de aireación no presentó diferencias significativas entre ambas mezclas. La densidad aparente mostró un comportamiento inverso, con valores significativamente mayores en la proporción 50:50.

La mayor porosidad total y retención de agua observadas en la mezcla 75:25 pueden atribuirse a la mayor proporción de fibra de coco, material que se caracteriza por presentar una elevada capacidad de retención hídrica y baja densidad aparente. Estas propiedades contribuyen a incrementar el espacio poroso destinado al almacenamiento de agua dentro del sustrato. En este sentido, se han reportado valores de retención de agua de 58.7 % y una densidad aparente de 0.06 Mg m^{-3} para la fibra de coco, mientras que el tezontle presenta una menor capacidad de retención hídrica. Por lo tanto, las propiedades físicas e hídricas de los sustratos están determinadas tanto por la naturaleza de sus componentes como por la proporción en que estos se incorporan en las mezclas (Sosa-Sánchez et al., 2026).

La mayor densidad aparente registrada en la mezcla 50:50 (v/v) puede asociarse con su mayor proporción de tezontle, debido a que este material mineral presenta una densidad aparente superior a la fibra de coco. Asimismo, las propiedades físicas del tezontle están estrechamente relacionadas con su granulometría. La disminución del tamaño de partícula incrementa la densidad aparente y modifica la distribución del espacio poroso; particularmente, las fracciones más finas tienden a presentar menor capacidad de aireación y mayor retención de humedad. Por lo tanto, tanto la proporción de tezontle incorporada en la mezcla como su distribución granulométrica pueden determinar el equilibrio entre aireación y retención de agua del sustrato (Vargas-Tapia et al., 2008; Rodríguez-Díaz et al., 2013).
La ausencia de diferencias significativas en la porosidad de aireación entre las mezclas indica que el incremento en la proporción de fibra de coco hasta 75 % aumentó la retención de agua sin reducir significativamente el espacio poroso ocupado por aire. Este comportamiento es relevante para el crecimiento vegetal, ya que las propiedades físicas del sustrato determinan la disponibilidad de agua y oxígeno en la zona radical. En mezclas formuladas con materiales orgánicos, fibra de coco y tezontle se han registrado valores de porosidad efectiva superiores a 50 %, e incluso cercanos a 80 %, considerados adecuados para favorecer el desarrollo de

las plantas. Asimismo, se ha señalado que la formulación de sustratos debe considerar las características físicas de sus componentes para proporcionar condiciones apropiadas de retención de agua y aireación en el medio de crecimiento (Pacheco et al., 2016).

Tabla 4. Propiedades físicas de las mezclas de sustrato de fibra de coco con tezontle de cultivo del cultivo de (*Lactuca sativa* L.) en dos proporciones de sustrato 50:50 y 75:25 (v:v).

FC:T (v:v)	Porosidad total (%)	Porosidad de aireación (%)	Porosidad de retención de agua (%)	Densidad aparente (g cm^{-3})
50:50	70.87 ± 2.71 b	53.72 ± 3.93 a	22.72 ± 1.03 b	0.55 ± 0.03 a
75:25	83.26 ± 1.18 a	58.49 ± 1.10 a	31.06 ± 0.89 a	0.23 ± 0.02 b

FC: Fibra de coco; T: tezontle. Medias ± DE con letras diferentes en cada una indican diferencias estadísticas entre periodo (Tukey, $p \leq 0.05$).

Crecimiento de las plantas de lechuga

Las propiedades físicas de las mezclas estuvieron asociadas con diferencias en el crecimiento de las plantas. El ancho y la longitud de las hojas fueron significativamente mayores en las plantas cultivadas en la proporción 75:25 de fibra de coco:tezontle respecto a la mezcla 50:50 durante el periodo de evaluación. En contraste, el diámetro del tallo y el número de hojas no presentaron diferencias significativas entre ambas proporciones durante los días posteriores al trasplante.

El mayor crecimiento foliar registrado en la proporción 75:25 coincidió con una mayor porosidad total y retención de agua del sustrato. Esta relación puede favorecer el mantenimiento de condiciones hídricas adecuadas en la zona radical y, consecuentemente, la expansión foliar. En lechuga, Islam et al. (2021) encontraron que los sustratos con fibra de coco presentaron mayor capacidad de retención de agua y condiciones físicas favorables para el crecimiento; las plantas desarrolladas en este material mostraron mayor crecimiento, número de hojas y producción de biomasa. Estos autores relacionaron la respuesta favorable de la lechuga con las condiciones generadas por la fibra de coco en el ambiente radical.
El mayor ancho y longitud de hoja observados en la mezcla 75:25 pueden estar asociados con las condiciones físicas generadas por la mayor proporción de fibra de coco, particularmente con su capacidad para mantener una mayor disponibilidad de agua en el medio radical. En lechuga se ha demostrado que las mezclas con mayor proporción de fibra de coco presentan mayor capacidad de retención de agua y menor densidad aparente, características asociadas con incrementos en la altura de planta, número de hojas y acumulación de biomasa fresca y seca. Estos resultados respaldan que las propiedades físicas de los sustratos con fibra de coco pueden generar condiciones favorables en la zona radical y favorecer el crecimiento de *Lactuca sativa* L. (Islam et al., 2021).

En conjunto, los resultados muestran que aumentar la proporción de fibra de coco de 50 a 75 % modificó favorablemente las propiedades físicas de la mezcla, principalmente la porosidad total y la retención de agua, sin reducir significativamente la porosidad de aireación. Estas condiciones estuvieron asociadas

con un mayor ancho y longitud de hoja. Sin embargo, la ausencia de diferencias en el diámetro del tallo y número de hojas indica que la respuesta de la lechuga a las propiedades físicas del sustrato dependió de la variable de crecimiento evaluada. Por lo tanto, bajo las condiciones del presente estudio, la proporción 75:25 de fibra de coco:tezontle presentó mejores características físicas y favoreció principalmente la expansión foliar de las plantas de lechuga.

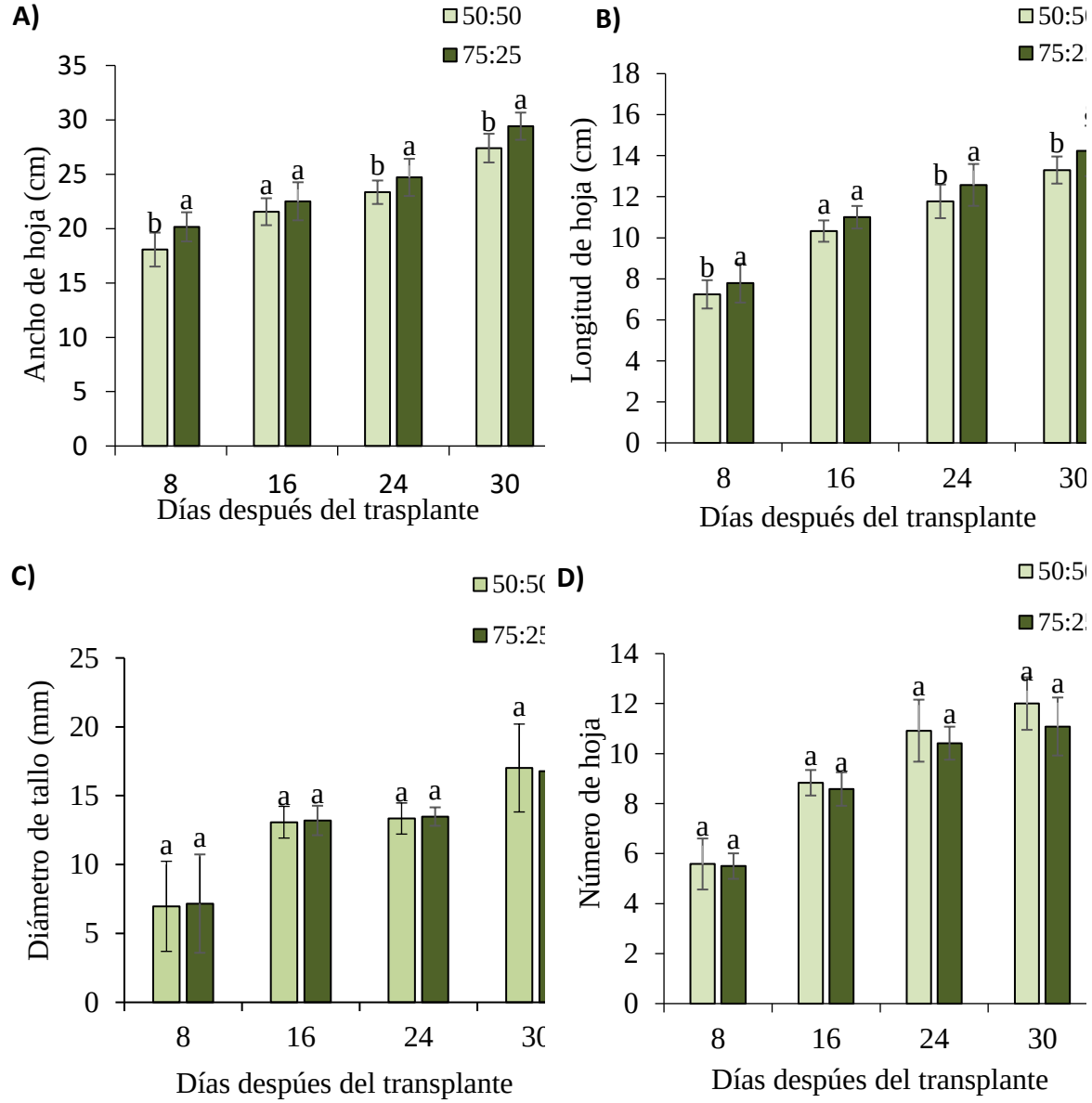


Figura 1. Crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en diferentes proporciones de fibra de coco y tezontle: ancho de hoja (A), longitud de hoja (B), diámetro de tallo (C) y número de hojas (D). Los tratamientos correspondieron a mezclas de fibra de coco:tezontle de 50:50 y 75:25 (v/v). Los valores representan la media ± DE. Letras diferentes dentro de cada periodo de evaluación indican diferencias significativas entre las proporciones de sustrato (Tukey, $p \leq 0.05$).

Conclusiones

La proporción de fibra de coco y tezontle influyó en las propiedades físicas del sustrato y en el crecimiento de las plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). La mezcla 75:25 (v/v) de fibra de coco:tezontle presentó mayor porosidad total y porosidad de retención de agua respecto a la proporción 50:50, sin afectar significativamente la porosidad de aireación. En contraste, la mezcla 50:50 presentó mayor densidad aparente.

La proporción 75:25 favoreció el crecimiento foliar de la lechuga, al presentar mayor ancho y longitud de hoja; sin embargo, el diámetro del tallo y el número de hojas no fueron modificados significativamente por las proporciones evaluadas. En conjunto, los resultados indican que el incremento de la proporción de fibra de coco mejoró las características físicas relacionadas con la retención de agua y favoreció la expansión foliar. Bajo las condiciones del estudio, la mezcla 75:25 de fibra de coco:tezontle presentó las características físicas más favorables para el cultivo de lechuga.

Literatura citada

Abad, M., Fornes, F., Carrión, C., Noguera, V., Noguera, P., & Maquieira, Á. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience*, 40(7), 2138–2144. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.7.2138

Burés, S. (1997). Sustratos. Madrid, España: Ediciones Agrotécnicas.

Evans, M. R., Konduru, S., & Stamps, R. H. (1996). Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortScience*, 31(6), 965–967. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.31.6.965

López-Cuadrado, M., & Masaguer, A. (2006). Sustratos para viveros: conocer sus propiedades ayuda a su correcta utilización. *Horticultura*, 44–50.

Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R., & Maquieira, Á. (2000). Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Horticulturae*, 517, 279–286. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.517.34

Pacheco L., N. A., Cano-Sosa, J., Poblano C., F., Rodríguez-Buenfil, I. M., & Ramos-Díaz,

A. (2016). Different responses of the quality parameters of *Coriandrum sativum* to organic substrate mixtures and fertilization. *Agronomy*, 6(2), 21. https://doi.org/10.3390/agronomy6020021

Pire, R., & Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1), 55–63.

Quesada, G., & Méndez, C. (2005). Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía Mesoamericana*, 16(2), 171–183. https://doi.org/10.15517/am.v16i2.11870

Raviv, M., & Lieth, J. H. (Eds.). (2008). Soilless culture: Theory and practice. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Rodríguez-Díaz, E., Salcedo-Pérez, E., Rodríguez-Macías, R., González-Eguiarte, D. R., & Mena-Munguía, S. (2013). Reúso del tezontle: efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Terra Latinoamericana*, 31(4), 275–284.

Sarkar, M. D., Rahman, M. J., Uddain, J., Quamruzzaman, M., Azad, M. O. K., Rahman, M. H., Islam, M. J., Rahman, M. S., Choi, K.-Y., & Naznin, M. T. (2021). Estimation of yield, photosynthetic rate, biochemical, and nutritional content of red leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in organic substrates. *Plants*, 10(6), 1220. https://doi.org/10.3390/plants10061220

Sosa-Sánchez, Y., Rubiños-Panta, J. E., Mendoza-Pérez, C., Ascencio-Hernández, R., Delgadillo-Martínez, J., & Khalil-Gardezi, A. (2026). Caracterización física y desempeño hídrico de sustratos orgánicos, inorgánicos y sus combinaciones. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17(4), e4117. https://doi.org/10.29312/remexca.v17i4.4117

Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. En Proceedings of the Sixth International Congress on Soilless Culture (pp. 633–650). Wageningen, The Netherlands: International Society for Soilless Culture.

Vargas-Tapia, P., Castellanos-Ramos, J. Z., Muñoz-Ramos, J. J., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., López-Romero, R. M., Martínez-Sánchez, C., & Ojodeagua-Arredondo, J. L. (2008). Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 323–331.

Propiedades físicas de sustratos hortícolas. Relación con su eficiencia hídrica en agricultura protegida

Yunier Sosa Sánchez[66], Juan Enrique Rubiños Panta, Cándido Mendoza Pérez, Roberto Ascencio Hernández

Resumen

En condiciones de agricultura protegida, la elección de un sustrato apropiado representa un aspecto fundamental que favorece el desarrollo y la productividad de los cultivos. En esta investigación se evaluaron las propiedades físicas de diferentes sustratos hortícolas y se determinó su relación con la eficiencia hídrica en sistemas de cultivo sin suelo. El estudio se realizó en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Se evaluaron siete sustratos: tezontle, fibra de coco, compost bovino y sus combinaciones. Se determinó la porosidad total (PT), porosidad de aireación (PA), porosidad de retención de agua (PRA), densidad aparente (Da), granulometría y capacidad de retención hídrica; además, se cuantificó el agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua total disponible (ATD). Los resultados mostraron que la fibra de coco y sus combinaciones presentaron las mejores características físicas, con mayores valores de PRA y ATD. El tezontle presentó la menor retención de agua (17.5%), mientras que la fibra de coco alcanzó 58.7% y una baja densidad aparente (0.06 Mg m^{-3}). Las mezclas mostraron una distribución granulométrica más equilibrada. El ATD presentó correlaciones positivas con la PRA (r^2 = 0.91) y la fracción fina (r^2 = 0.75), y negativas con las partículas gruesas (r^2 = −0.76) y la PA (r^2 = −0.60). En general, las propiedades físicas de los sustratos determinaron su comportamiento hídrico, destacando las mezclas con fibra de coco como alternativas con mayor potencial para un manejo eficiente del agua en agricultura protegida.

Palabras clave: agua total disponible, granulometría, invernadero, medios de cultivo, porosidad total.

Abstract

In protected agriculture, the selection of an appropriate substrate is a fundamental aspect that promotes crop development and productivity. This research evaluated the physical properties of different horticultural substrates and determined their relationship with water efficiency in

[66] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56264. sosa.yunier@colpos.mx; jerpkike@colpos.mx; mendoza.candido@colpos.mx; ascenciohr@colpos.mx

soilless cultivation systems. The study was conducted in the Soil Physics Laboratory of the Postgraduate College, Montecillo Campus. Seven substrates were evaluated: tezontle (volcanic rock), coconut fiber, bovine compost, and mixtures thereof. Total porosity (TP), aeration porosity (AP), water retention porosity (WRP), bulk density (BD), particle size distribution, and water retention capacity were determined; in addition, readily available water (LFW), reserve water (RW), and total available water (TWA) were quantified. The results showed that coconut fiber and its mixtures presented the best physical characteristics, with the highest WRP and TWA values. Tezontle exhibited the lowest water retention (17.5%), while coconut fiber reached 58.7% and a low bulk density (0.06 Mg m^{-3}). The mixtures showed a more balanced particle size distribution. Total available water (TAW) showed positive correlations with the total porosity (RPA) ($r^2 = 0.91$) and the fine fraction ($r^2 = 0.75$), and negative correlations with the coarse particles ($r^2 = -0.76$) and the bulk density ($r^2 = -0.60$). In general, the physical properties of the substrates determined their water behavior, with mixtures containing coconut fiber standing out as alternatives with greater potential for efficient water management in protected agriculture.

Keywords: coconut fiber, compost, particle size distribution, tezontle, total available water, total porosity

Introducción

Las características de los sustratos empleados en sistemas agrícolas como la hidroponía representan un factor determinante para el crecimiento de las plantas y la obtención de altos rendimientos (Velázquez-González *et al.*, 2022; Flores-Sánchez *et al*., 2025). Estos materiales proporcionan un medio de crecimiento controlado que favorece el desarrollo del sistema radical, al brindar soporte físico, condiciones adecuadas de aireación y una distribución equilibrada del agua y los nutrientes disponibles (Lazcano-Bello *et al*., 2021).

Debido a la importancia que tienen los sustratos en la producción agrícola protegida, diferentes investigaciones se han enfocado en la evaluación de materiales orgánicos e inorgánicos utilizados como medios de crecimiento vegetal (Gayosso-Rodríguez *et al*., 2021; Shafer *et al.*, 2022). La elección de un sustrato adecuado requiere una caracterización detallada de sus propiedades físicas, debido a que estas determinan la interacción entre la disponibilidad de agua, oxígeno y nutrientes, factores esenciales para favorecer el desarrollo del cultivo y mejorar el aprovechamiento de los recursos dentro del sistema productivo (Montoya-Jasso *et al*., 2021; Mixquititla *et al*., 2022).

Entre las características físicas más importantes se encuentra la distribución del tamaño de partícula, ya que la granulometría, la forma y la composición del material influyen directamente en la relación agua-aire del sustrato. Al respecto, Mixquititla *et al*. (2022) señalaron que el incremento en el tamaño de partícula favorece una mayor capacidad de aireación, aunque puede reducir la retención de agua, modificando así las condiciones disponibles para el crecimiento radicular.

Por otra parte, Gayosso-Rodríguez *et al*. (2021), al evaluar materiales como aserrín de pino, bagazo de henequén, fibra de coco, viruta y sargazo, encontraron que las partículas con tamaño ≤ 5 mm presentaron una porosidad de aireación cercana al 30 % y una retención de agua superior al 50 %, valores asociados con características deseables en un sustrato agrícola. De manera similar, en sistemas de producción forestal, Boudreault *et al*. (2023) reportaron que valores de porosidad de aireación alrededor del 10 % y de retención de agua entre 30 y 45 % fueron adecuados para el cultivo del abeto blanco (*Abies alba).*

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar las propiedades físicas de sustratos orgánicos e inorgánicos y sus combinaciones, con la finalidad de identificar aquellos con mejores características de retención de agua para su empleo eficiente en sistemas de agricultura protegida.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en el laboratorio de Física de Suelos, del Posgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Los sustratos utilizados fueron: fibra de coco, tezontle rojo, compost ovino y sus mezclas (Cuadro 1). Las propiedades físicas que se determinaron fueron: porosidad total (PT), densidad aparente (Da), porosidad de aireación (PA), porosidad de retención de agua (PRA), granulometría, agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua total disponible (ATD).

Cuadro 1. Sustratos utilizados en la determinación de propiedades físicas

Sustratos	Composición con base en volumen
S1	Fibra de coco (1)
S2	Compost (1)
S3	Tezontle (1)
S4	Fibra de coco-compost (1:1)
S5	Fibra de coco-compost-tezontle (1:1:1)

S6	Fibra de coco-tezontle (1:1)
S7	Compost-Tezontle (1:1)

Porosidad

La porosidad de los sustratos se determinó según el método descrito por Landis *et al.* (1990). Se saturaron los sustratos y posteriormente se dejaron reposar durante 24 horas. Se emplearon permeámetros de plástico, a los cuales se les determinó el volumen, se tararon y se etiquetaron. Una vez transcurrido el periodo de reposo, los permeámetros se llenaron con los sustratos previamente saturados y se pesaron utilizando una báscula de precisión (Mettler 2000).
Posteriormente, se permitió el drenaje del agua de las muestras contenidas en los envases y se registró el peso del sustrato drenado. Luego se secaron las muestras en la estufa a 105 °C hasta obtener el peso constante. Para cada sustrato se realizaron tres repeticiones. Con los datos obtenidos se calcularon la porosidad total (PT), la porosidad de aireación (PA) y la porosidad de retención de agua (PRA).

Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$PT\ (\%) = \frac{Vtp}{Vp} * 100 \quad (1)$$

$$PA\ (\%) = \frac{Vpa}{Vp} * 100 \quad (2)$$

$$PRA\ (\%) = (PT - PA) \quad (3)$$

Donde:
Vtp = volumen total de poros = peso del sustrato saturado – peso del sustrato seco
Vp = volumen del permeámetro
Vpa = volumen poros aireación = peso del sustrato saturado – peso del sustrato drenado
Previo al análisis estadístico, se verificaron los supuestos de normalidad (Shapiro–Wilk), y homogeneidad de varianzas (Levene) ($\alpha = 0.05$). Posteriormente, se realizó un ANOVA y se compararon las medias con la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$). Los análisis se efectuaron en R versión 4.3.2 (R Core Team, 2025).

Granulometría
Para determinar el diámetro de partículas de los sustratos se utilizó la metodología descrita por Bunt (1988). Se emplearon siete tamices, cuyos diámetros de las mallas (mm) fueron los

siguientes: 6.36, 4.76, 3.36, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 y la base. Se ubicaron de manera descendente, luego de pesar cada tamiz. Se colocaron muestras de 500 g en la columna de tamices y se sometieron a oscilación por tres minutos en el agitador. A continuación, se pesaron los tamices con las muestras de sustratos contenidas en cada uno de ellos. Se determinaron los porcentajes correspondiente a partículas finas (< 0.5 mm), partículas gruesas (> 1 mm) y el rango óptimo (0.5–4 mm) recomendado por Bunt (1988) y Cabrera (1995)

Retención de agua y densidad aparente

Para esta prueba se utilizó el método propuesto por De Boodt et al. (1974), con tres repeticiones por cada sustrato. Se dispuso de un equipo de embudos de succión que poseen una placa de vidrio porosa conectada a una manguera que llega a un filtro poroso. Se llevó a cabo la succión a 10, 50 y 100 cm de columna de agua. Se llenaron los embudos con las muestras saturadas para evitar evaporación. Se tomaron muestras a 0 cm de tensión de columna de agua y se pusieron en cilindros metálicos. Se determinó el peso húmedo de las muestras y se secaron en la estufa a 105 °C, hasta obtener peso constante. El proceso se repitió para 10, 50 y 100 cm de tensión de columna de agua.
Los datos obtenidos permitieron calcular el contenido de humedad, por el método gravimétrico, y la densidad aparente.

Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Hg = (\frac{Psh-Pss}{Pss}) * 100 \quad (4)$$

$$Da = \frac{Pss}{Vp} \quad (5)$$

Donde:
Hg = contenido de humedad (%)
Da = Densidad aparente (Mg m^3)
Psh = peso del sustrato húmedo (g)
Pss = peso del sustrato seco (g)
Vp = volumen del permeámetro

Se obtuvieron las curvas correspondientes y se identificaron los siguientes rangos de humedad: agua no disponible (AND), de 0 a 10 cm de columna de agua; agua fácilmente disponible (AFD), de 10 a 50 cm de columna de agua; agua de reserva (AR), de 50 a 100 cm

de columna de agua y agua difícilmente disponible (ADD), más de 100 cm de columna de agua.
Después de verificar normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) ($\alpha = 0.05$), se realizó un ANOVA y se compararon las medias con prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$), utilizando R, versión 4.3.2 (R Core Team, 2025).

Relación entre el tamaño de partículas, la porosidad y la retención de agua

Con el propósito de analizar la relación entre la granulometría, la porosidad y la capacidad de retención hídrica, se evaluaron las siguientes propiedades físicas en los siete sustratos analizados: proporción de partículas finas (< 0.5 mm) y gruesas (> 1.0 mm), porosidad de aireación (PA), porosidad de retención de agua (PRA) y porcentaje de agua aprovechable o agua total disponible (ATD). Se aplicó la prueba de correlación de Pearson para determinar la fuerza y dirección de las relaciones entre las propiedades físicas de los sustratos. El análisis se llevó a cabo mediante el software R, versión 4.3.2 (R Core Team, 2025).

Resultados y discusión

Porosidad

La porosidad de un sustrato incluye la porosidad de aireación y la porosidad de retención de agua (Wright *et al.*, 2025). Esta propiedad física determina la circulación del aire y el movimiento del agua en el medio de cultivo. Los sustratos evaluados presentaron porosidad total (PT) entre 61 y 86% (Figura 1). El valor más bajo correspondió a S3 (tezontle) y el más alto a S1 (fibra de coco), con diferencias significativas respecto a los demás, excepto S4 (76%). Según Abad *et al*. (1993), y Caron y Michel (2021), la PT adecuada oscila entre 70 y 85%, por lo que S3 (compost), con un valor de 61% y S7 (tezontle-compost, 1:1), con 61%, no cumplen con este criterio. La fibra de coco y sus mezclas mostraron los valores más altos de PT, en concordancia con lo reportado por Soto-Bravo y Betancourt-Flores (2022), quienes registraron valores superiores al 90% en este sustrato, en cultivo de jitomate en invernadero. Thiessen *et al.* (2024) también encontraron valores entre 83 y 92% de PT en cultivo de petunias en invernadero.

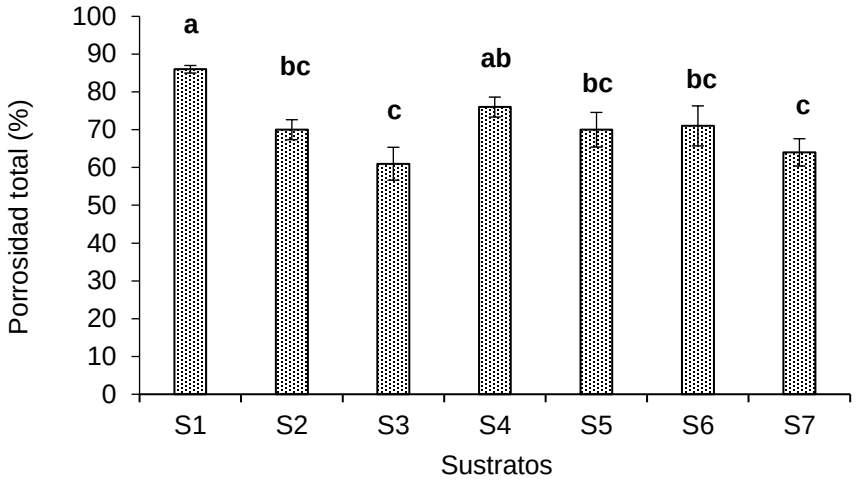


Figura 1. Porosidad total de los sustratos evaluados.

Los valores que no comparten una letra presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). Las barras representan ± error estándar de la media (n = 3).
S1= fibra de coco; S2 = compost; S3 = tezontle; S4 = fibra de coco-compost (1:1); S5 = fibra de coco-compost-tezontle (1:1:1); S6 = fibra de coco-tezontle (1:1); S7 = compost-tezontle (1:1).

La porosidad de aireación (PA) varió entre los sustratos (Figura 2), con el valor más alto en S3 (tezontle, 43%), que presentó diferencias estadísticas significativas respecto a los demás tratamientos, y el más bajo en S2 (compost, 17%). El sustrato S6 también presentó un valor elevado (32%), superando junto con S3 el rango óptimo de 10 a 30%, reportado por Cabrera (1995) y Caron y Michel (2021). En contraste, S1, S4, S5 y S7 mostraron valores dentro del intervalo recomendado y sin diferencias estadísticas entre ellos. En general, la fibra de coco, el compost y sus mezclas presentaron los niveles más adecuados de PA.

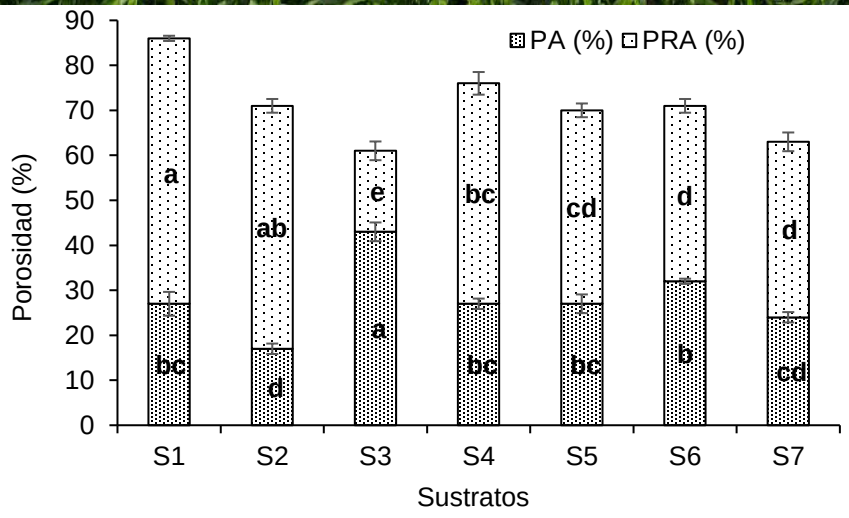


Figura 2. Porosidad de aireación y de retención de agua de los sustratos evaluados.

Los valores que no comparten una letra presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). Las barras representan ± error estándar de la media (n = 3).
S1= fibra de coco; S2 = compost; S3 = tezontle; S4 = fibra de coco-compost (1:1); S5 = fibra de coco-compost-tezontle (1:1:1); S6 = fibra de coco-tezontle (1:1); S7 = compost-tezontle (1:1).

Como se aprecia en la Figura 2, la porosidad de retención de agua (PRA) fue más alta en S1 (fibra de coco, 59%), superando el valor mínimo (55%), según los criterios propuestos por Caron y Michel (2021) y mostró diferencias significativas con los demás sustratos, excepto S2 (compost). El valor más bajo (18%) correspondió a S3 (tezontle). Los valores del compost (S2, 54%) y de la mezcla compost–fibra de coco (S4, 49%) se aproximaron al umbral mínimo sugerido por los autores antes mencionados. Estos resultados coinciden con Gomes *et al*. 2023 y Fen *et al.* 2026, quienes señalan que una mayor proporción de fibra de coco incrementa la retención de agua por su textura fibrosa, lo que reduce la porosidad de aireación y mejora la capacidad de retención hídrica.

Retención de agua y densidad aparente

El agua aprovechable o agua total disponible está compuesta por dos fracciones: el agua fácilmente disponible (AFD) y el agua de reserva (AR). Esta fracción representa el volumen de agua que una planta puede absorber y utilizar para sus funciones fisiológicas (De Jong *et*

al., 2024). Los valores de agua fácilmente disponible (AFD) variaron entre 7% y 37%, siendo S1 (fibra de coco) el de mejor registro, con diferencias significativas frente al resto de los tratamientos (Cuadro 2).

Las mezclas con fibra de coco (S4, S5 y S6) no difirieron entre sí, aunque solo S4 (fibra de coco-compost 1:1) se ubicó dentro del rango óptimo (20-30%), recomendado por Abad *et al.* (1993). En cuanto al agua de reserva (AR), los sustratos S1, S2 y S6 estuvieron dentro del intervalo ideal (4-10%), mientras que S4 (11%) se aproximó al límite superior. Los sustratos S4 y S5 mostraron los valores de agua total disponible (ATD) más adecuados (31 y 25%, respectivamente), ajustándose al rango ideal (24-40%) propuesto por Abad *et al.* (1993). La fibra de coco (44%) y su mezcla con tezontle, 1:1 (21%), también presentaron valores cercanos al límite superior e inferior sugerido por estos autores.

Cuadro 2. Comparación de medias de propiedades hidrofísicas de los sustratos evaluados.

Sustratos	AFD (%)	AR (%)	ATD (%)	Da (Mg m^{-3})
S1	37 a	7 bc	44 a	0.06 d
S2	10 cd	6 bcd	16 cd	0.59 b
S3	7 d	2 cd	9 d	0.90 a
S4	20 b	11 ab	31 b	0.32 c
S5	12 bcd	13 a	25 bc	0.59 b
S6	17 bc	4 cd	21 bc	0.58 b
S7	8 d	1 d	9 d	0.89 a
Rango óptimo[1]	20 - 30	4 - 10	24 - 40	< 0.4

[1]Abad et al., 1993.
Los valores que no comparten una letra presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).
AFD = Agua fácilmente disponible; AR = Agua de reserva; ATD = Agua total disponible; Da = Densidad aparente; S1= fibra de coco; S2 = compost; S3 = tezontle; S4 = fibra de coco-compost (1:1); S5 = fibra de coco-compost-tezontle (1:1:1); S6 = fibra de coco-tezontle (1:1); S7 = compost-tezontle (1:1).
Los valores de densidad aparente (Da) se ubicaron en un intervalo de 0.06 a 0.90 Mg m^{-3} (Cuadro 2). El valor más bajo correspondió al sustrato S1 (fibra de coco), mientras que el más alto fue registrado por S3 (tezontle), sin diferencias significativas con S7 (tezontle-compost 1:1), pero sí con el resto de los sustratos. El sustrato S4 (fibra de coco-compost 1:1)

con 0.32 Mg m^{-3} se ubicó en el rango óptimo (0.2–0.4 Mg m^{-3}) (Abad *et al.*, 2005). Flores-Sánchez *et al*. (2025) considera adecuados valores menores de 0.8 Mg m^{-3}, criterio que cumplen S2, S5 y S6. En cambio, S1 (fibra de coco) con 0.06 Mg m^{-3} quedó fuera del rango recomendado, lo que indica una porosidad excesiva y baja estabilidad que favorece la descomposición física gradual del sustrato (Zhao *et al*., 2024). Las mezclas con fibra de coco y compost mostraron los valores más equilibrados de densidad aparente.

Granulometría

El tamaño de las partículas de un sustrato determina su porosidad y, por tanto, su capacidad de retener agua y de favorecer la aireación (Durand *et al.*, 2025). Para evaluar la granulometría de los sustratos, Bunt (1988) y Cabrera (1995) recomiendan que al menos 60% de las partículas estén entre 0.5 y 4.0 mm, y que las finas (<0.5 mm) no superen el 20%. Los resultados mostraron que todos los sustratos, excepto S4, superan el porcentaje recomendado de partículas entre 0.5 y 4.0 mm (Cuadro 3). Sin embargo, solo S5, S6 y S7 cumplen con el límite de partículas finas (< 0.5 mm), por lo que presentan la mejor composición. En cambio, los sustratos puros de tezontle, fibra de coco y compost no garantizan una adecuada composición de partículas, debido a que presentan un elevado porcentaje de partículas menores de 0.5 mm.

Cuadro 3. Granulometría de los sustratos evaluados.

Clasificación de partículas	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Finas < 0.5 mm (%)	39.3	25.6	28.9	40.1	18.6	11.9	17.9
Gruesas > 1.0 mm (%)	17.7	42.6	53.5	25.4	61.7	68.5	57.3
Rango óptimo[1] 0.5-4 mm (%)	61.4	69.9	64.5	56.0	70.5	70.5	74.5

[1]Bunt, 1988; Cabrera, 1995.
S1= fibra de coco; S2 = compost; S3 = tezontle; S4 = fibra de coco-compost (1:1); S5 = fibra de coco-compost-tezontle (1:1:1); S6 = fibra de coco-tezontle (1:1); S7 = compost-tezontle (1:1).

Relación entre tamaño de partículas, porosidad y retención de agua

El (Cuadro 4) presenta los resultados de la matriz de correlación de Pearson entre las variables analizadas. Se observó una correlación positiva alta entre la porosidad de retención de agua (PRA) y el agua total disponible (ATD) ($r^2 = 0.91$).

Cuadro 4. Matriz de correlación de Pearson entre variables físicas de los sustratos evaluados.

Variables	P F	P G	PA	PRA	ATD
P F	1.00	-0.94	-0.10	0.65	0.75
P G	-0.94	1.00	0.15	-0.71	-0.76
PA	-0.10	0.15	1.00	-0.35	-0.60
PRA	0.65	-0.71	-0.35	1.00	0.91
ATD	0.75	-0.76	-0.60	0.91	1.00

PF = partículas finas; PG = partículas gruesas; PA = porosidad de aireación; PRA = porosidad de retención de agua; ATD = agua total disponible.

Según lo reportado por Fields *et al*. (2020) y Durand *et al*. (2023), una mayor proporción de poros funcionales favorece significativamente la capacidad del sustrato para retener agua útil, y así mejorar su eficiencia hídrica. Esta relación se confirma en el (Cuadro 5), donde el sustrato S1 (fibra de coco), que registró el valor más alto de PRA (58.7%), también presentó el mayor contenido de ATD (44%).

De manera similar, el menor valor de PRA (17.5%) coincidió con el menor registro de ATD (9%) y correspondió al tezontle. Así mismo, en el (Cuadro 4) se observa una correlación positiva entre el contenido de partículas finas y el ATD ($r^2 = 0.75$), en concordancia con lo reportado por Abad *et al*. (2005), quienes demostraron que la fibra de coco mejora significativamente la capacidad de retención hídrica de los sustratos. Esta relación también se expresa en el (Cuadro 5), donde los mayores registros de PF (S1 y S4) coinciden con los valores superiores de ATD.

Cuadro 5. Propiedades físicas utilizadas para analizar la relación entre tamaño de partículas, porosidad y retención de agua.

Sustratos	PF (%)	PG (%)	PA (%)	PRA (%)	ATD (%)
S1	39.3	17.7	27.47	58.71	44
S2	25.6	42.6	16.62	53.58	16
S3	28.9	53.5	43.16	17.51	9
S4	40.1	25.4	27.48	48.75	31

S5	18.6	61.8	27.17	42.95	25
S6	11.9	68.5	32.44	38.99	21
S7	17.9	57.3	24.31	39.45	9

PF = partículas finas; PG = partículas gruesas; PA = porosidad de aireación; PRA = porosidad de retención de agua; ATD = agua total disponible. S1= fibra de coco; S2 = compost; S3 = tezontle; S4 = fibra de coco-compost (1:1); S5 = fibra de coco-compost-tezontle (1:1:1); S6 = fibra de coco-tezontle (1:1); S7 = compost-tezontle (1:1).

En cuanto a las correlaciones PG-ATD y PA-ATD, se apreció que ambas fueron negativas (Cuadro 4). La primera presentó un coeficiente de correlación de -0.76 y la segunda de -0.60, lo cual sugiere que el incremento de partículas gruesas y de poros de aireación reduce la fracción de agua disponible en los sustratos estudiados.

Estos resultados confirman la importancia de la porosidad de retención de agua (PRA) y del contenido de partículas finas en la capacidad de retención hídrica de los sustratos hortícolas. Por tanto, es importante tener en cuenta estas características físicas a la hora de realizar combinaciones de sustratos, con el fin de optimizar el uso del agua y favorecer un adecuado rendimiento productivo (Abad *et al.*, 2005; Fields *et al.*, 2020; Durand *et al.*, 2023).

Conclusiones

El sustrato fibra de coco, así como las mezclas en las que se incorporó este material, mostraron los valores más elevados de porosidad total. Asimismo, la mayor porosidad de aireación y capacidad de retención de agua se observó en los sustratos conformados por fibra de coco, compost y sus respectivas combinaciones. En cuanto a la distribución del tamaño de partículas, las mezclas tezontle-fibra de coco (1:1), tezontle-compost (1:1) y tezontle-fibra de coco-compost (1:1:1) presentaron una granulometría acorde con los intervalos considerados óptimos en la literatura, mientras que los sustratos constituidos únicamente por fibra de coco, tezontle o compost presentaron una proporción de partículas finas por encima de los valores recomendados.

Se determinó una relación positiva entre la porosidad de retención de agua y la proporción de partículas finas, lo que favoreció un mayor contenido de agua total disponible en los sustratos evaluados. En cambio, el incremento en la porosidad de aireación y en la fracción de partículas gruesas estuvo asociado con una reducción del agua aprovechable. Las mezclas integradas por fibra de coco, tezontle y compost en diferentes proporciones (S4, S5 y S6) presentaron los mayores contenidos de agua total disponible, lo que evidencia su potencial

para favorecer un manejo más eficiente del recurso hídrico en sistemas de producción agrícola bajo condiciones protegidas.

Literatura citada

Abad, M., Fornes, F., Carrión, C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, Á., & Puchades, R. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. HortScience, 40(7), 2138–2144. https://doi.org/10.21273/hortsci.40.7.2138

Abad, M.; Martínez-Herrero, M. D.; Martínez-García, P. F. & Martínez-Corts, J. (1993). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. Acta *Horticulturae* 11. 141-154. https://redivia.gva.es/handle/20.500.11939/8211.

Boudreault, S.; Caron, J.; Lamhamedi, M. S. an & Pepin, S. (2023). Comparison of hydraulic and aeration properties of peat substrates used to produce containerized white spruce seedlings (1+0) in forest nurseries. *Forests*. 14(4):858. https://doi.org/10.3390/f14040858.

Bunt, A. C. (1988). Media and mixes for container-grown plants: a manual on the preparation and use of growing media for pot plants (2nd ed.). Unwin Hyman. https://doi.org/10.1007/978-94-011-7904-3.

Cabrera, R. I. (1995). Fundamentals of container media management: Part I. Physical properties. Rutgers cooperative extension. Fact sheet No. FS812. New Brunswick, USA. https://njaes.rutgers.edu/pubs/publication.php?pid=FS812.

Caron, J. & Michel, J. (2021). Understanding and optimizing the physical properties of growing media for soilless cultivation. In: Gruda, N. S. (Ed.), Advances in horticultural soilless culture. 107-137. Burleigh Dodds Science Publishing. https://doi.org/10.1201/9781003048206-6.

De Boodt, M.; Verdonck, O. & Cappaert, I. (1974). Método para la medición de la curva de liberación de agua de sustratos orgánicos. *Acta Horticulturae* 37, 2054-2063. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1974.37.20

De Jong van Lier, Q.; Abreu de Melo, M. L. & Alves, R. P. E. (2024). Stochastic analysis of plant available water estimates and soil hydraulic characteristics. *Vadose Zone Journal*. 23(3):e20306. https://doi.org/10.1002/vzj2.20306.

Durand, S.; Boivin, P. & Michel, J. (2025). Organización en fase sólida y propiedades de contracción de algunos componentes de medios de cultivo según el tamaño de partícula. *Soil Science Society of America Journal*. 89(6):e70159. https://doi.org/10.1002/saj2.70159.

Durand, S.; Jackson, B. E.; Fonteno, W. C. & Michel, J. C. (2023). Advances in substrate particle characterization using dynamic image analysis compared to sieving procedure for predicting water retention properties. *Acta Horticulturae*. 1377, 537-544. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1377.66.

Feng, X.; Zou, P.; Wang, Q.; Wang, H.; Li, X. & Wang, J. (2026). Modeling moisture content and analyzing water infiltration in coconut coir substrate using RGB image recognition and machine learning. *Agriculture*. 16(2), 219. https://doi.org/10.3390/agriculture16020219. de artículo (219).

Fields, J. S.; Owen, J. S. & Altland, J. E. (2020). Optimizing substrate available water and coir amendment rate in pine bark substrates. *Water*. 12(2), 362. https://doi.org/10.3390/w12020362.

Flores-Sánchez, I. D.; Sandoval-Villa, M. & Trejo-Téllez, L. I. (2025). Basic proposal for evaluation of plant genetic resources to generate new crops. *Frontiers in Plant Science*. 16(1507521). https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1507521.

Gayosso Rodríguez, S.; Gutiérrez-Castorena, M. C.; Estrada-Botello, M. A. & Sánchez-Hernández, R. (2021). Características micromorfológicas de sustratos orgánicos y su relación con retención de agua y crecimiento radical. *Agrociencia*. 55(3), 195-208. https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2413

Gomes, F. S.; Motta, M. F. B.; Bernardes, G. de P. & Soares, P. V. (2023). Influence of coconut fiber on the microstructural, mechanical and hydraulic behavior of unsaturated compacted soil. *Soils and Rocks*. 46(2), e2023013322. https://doi.org/10.28927/SR.2023.013322.

Landis, T. D. (1990). Growing media. En T. D. Landis, R. W. Tinus, S. E. McDonald, & J. P. Barnett (Eds.), The container tree nursery manual (Vol. 2, pp. 41–85). U.S. Department of Agriculture, Forest Service. https://es.scribd.com/document/594534513/container-tree-nursery-manual-chap-2?utm.

Lazcano-Bello, M. I.; Sandoval-Castro, E.; Tornero-Campante, M. A.; Hernández Hernández, B. N.; Ocampo-Fletes, I. & Díaz-Ruíz, R. (2021). Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(1), 101-113. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2450.

Mixquititla-Casbis, G.; Villegas-Torres, O. G.; Andrade-Rodríguez, M. & Sotelo-Nava, H. (2022). Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico-mineral. *Acta Agrícola y Pecuaria*. 8:e0081007. https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081007.

Montoya-Jasso, V. M.; Ordaz-Chaparro, V. M.; Benedicto-Valdés, G. S.; Ruiz-Bello, A. & Arreola-Tostado, J. M. (2021). Caracterización química y física de sustratos enriquecidos con minerales y composta. *Terra Latinoamericana*. 39(1), 15-27. https://doi.org/10.28940/terra.v39i1.1109.

Schäfer, G., & Lerner, B. L. (2022). Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. *Ornamental Horticulture*, 28(2), 1–15. https://doi.org/10.1590/2447-536X.v28i2.2496

Soto-Bravo, F. & Betancourt-Flores, A. (2022). Evaluación de metodologías para determinar las características físicas de un sustrato de fibra de coco. *Agronomía Costarricense*. 46(2):29-45. https://doi.org/10.15517/rac.v46i2.52044.

Thiessen, M. E.; Fields, J. S. & Abdi, D. E. (2024). Physical properties and crop performance of four substrate fibers in greenhouse Petunia production. *Horticulturae*, 10(3), 279. https://doi.org/10.3390/horticulturae10030279.

Velázquez-González, R. S.; García-García, A. L.; Ventura-Zapata, E.; Barceinas- Sánchez, J. D. O. & Sosa-Saavedra, J. C. (2022). Una revisión sobre la hidroponía y las tecnologías asociadas para operaciones de mediana y pequeña escala. *Agriculture.* 12(5), 646. https://doi.org/10.3390/agriculture12050646.

Wright, H. C.; Wilkinson, S. W.; Morgan, C. W.; Rolfe, S. A.; Cameron, D. D. & Ryan, A. J. (2025). Polyurethane foam as a soilless growing media: demonstrating the importance of physical property optimization. *Frontiers in Horticulture*. 4, 1646783. https://doi.org/10.3389/fhort.2025.1646783.

Zhao, R.; Sofkova- Bobcheva, S.; Cartmill, D. L.; Hardy, D. & Zernack, A. (2024). Evaluación comparativa de la piedra pómez como sustrato sin suelo para el cultivo en interiores de Rubus idaeus L. New Zealand *Journal of Crop and Horticultural Science*. 52(3), 280-297. https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2358885.

Respuesta del crecimiento y metabolismo antioxidante radicular de plántulas de *Brassica oleracea* germinadas en sustratos con frass de *Hermetia illucens*

Hugo González-Lara[67], Ana Angélica Feregrino-Pérez[68], Benito Parra-Pacheco[69], Juan Fernando García-Trejo[70]

Resumen

El frass de *Hermetia illucens* representa una alternativa sostenible para la reutilización de residuos orgánicos y su empleo como componente de sustratos agrícolas; sin embargo, existe información limitada sobre sus efectos en la respuesta fisiológica del sistema radical durante la germinación. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de frass termocomposteado sobre el crecimiento y el contenido de compuestos antioxidantes en raíces de plántulas de *Brassica oleracea*. Se establecieron seis tratamientos con mezclas de peatmoss y frass (0, 20, 40, 60, 80 y 100 %, v/v) bajo un diseño completamente al azar. Debido a la ausencia de germinación en los tratamientos con 80 y 100 % de frass, únicamente se evaluaron el control, S20, S40 y S60. A los 30 días después de la siembra se determinó la longitud radicular y, mediante extractos metanólicos de raíz, se cuantificaron fenoles totales, flavonoides y la capacidad antioxidante mediante los ensayos ABTS y DPPH. La incorporación de frass modificó significativamente la respuesta del sistema radical. El tratamiento control presentó el mayor contenido de fenoles totales, mientras que S40 y S60 incrementaron significativamente el contenido de flavonoides y la capacidad antioxidante. Asimismo, la longitud radicular disminuyó conforme aumentó la proporción de frass en el sustrato. Los resultados demuestran que el frass termocomposteado de *H. illucens* modifica el crecimiento y el metabolismo antioxidante de las raíces de *B. oleracea* durante las primeras etapas del desarrollo, evidenciando una respuesta dependiente de la proporción incorporada

[67] Centro de Investigaciones en Bioingeniería básica y aplicada, Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas km. 1 s/n, Amazcala, El Marqués, Querétaro, Mexico. CP 76265. Correo: hugo.gonzalez@uaq.mx
[68] Cuerpo Académico de Bioingeniería básica aplicada, Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas km. 1 s/n, Amazcala, El Marqués, Querétaro, Mexico. CP 76265. Correo: geli@uaq.mx
[69] Centro de Investigaciones en Bioingeniería básica y aplicada, Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas km. 1 s/n, Amazcala, El Marqués, Querétaro, Mexico. CP 76265. Correo: benito.parra@uaq.mx
[70] Cuerpo Académico de Bioingeniería básica aplicada, Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas km. 1 s/n, Amazcala, El Marqués, Querétaro, Mexico. CP 76265. Correo: fernando.garcia@uaq.mx

al sustrato y resaltando la importancia de definir dosis adecuadas para su utilización como componente de medios de germinación

Palabras clave: Bioestimulante, Biofertilizante, Kale, Mosca Soldado Negro.

Abstract

Black soldier fly (*Hermetia illucens*) frass has emerged as a sustainable alternative for organic waste recycling and as a potential component of horticultural growing media. However, limited information is available regarding its effects on root physiological responses during seed germination. The aim of this study was to evaluate the effect of different proportions of
thermocomposted black soldier fly frass on root growth and antioxidant compounds in kale (*Brassica oleracea*) seedlings. Six substrate mixtures containing peat moss and frass (0, 20, 40, 60, 80, and 100%, v/v) were established under a completely randomized design. Because no seed germination occurred in the 80 and 100% frass treatments, only the Control, S20, S40, and S60 treatments were evaluated. Thirty days after sowing, root length was measured, and methanolic root extracts were used to determine total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant capacity using the ABTS and DPPH assays. Frass incorporation significantly affected the physiological response of the root system. The control treatment exhibited the highest total phenolic content, whereas S40 and S60 showed significantly higher flavonoid concentrations and antioxidant capacity. In addition, root length decreased as the proportion of frass in the substrate increased. These results demonstrate that thermocomposted *H. illucens* frass modifies both root growth and antioxidant metabolism during the early developmental stages of *B. oleracea*, revealing a dose-dependent response and highlighting the importance of optimizing frass incorporation rates when used as a component of germination substrates.

Keywords: Biostimulant, Biofertilizer, Kale, Black Soldier Fly.

Introducción

La búsqueda de sistemas agrícolas más sostenibles y sustentables ha impulsado el aprovechamiento de residuos orgánicos como insumos para la producción vegetal, promoviendo estrategias dentro del marco de la economía circular que disminuyan la dependencia de fertilizantes químicos y sustratos convencionales. Entre estos residuos destaca el frass proveniente de la biotransformacion de desechos organicos mediante el uso de larvas de mosca soldado negro (*Hermetia illucens*), el cual consiste en una mezcla de

excretas, restos de exuvias y residuos parcialmente degradados (Choi & Hassanzadeh, 2019). Debido a su contenido de materia orgánica, nutrientes minerales, microorganismos benéficos y compuestos bioactivos, el frass ha despertado un gran interés como aditivo en los sustratos y biofertilizante en el sector de producción agrícola (Menino et al., 2021).

Diversos estudios han demostrado que el frass de *H. illucens* puede mejorar la germinación (Setti et al., 2019), favorecer el crecimiento vegetal y aumentar la disponibilidad de nutrientes cuando se incorpora al suelo o a sustratos agrícolas (Song et al., 2021). Sin embargo, su efecto depende de factores como el origen del residuo orgánico utilizado para alimentar las larvas, el proceso de estabilización del frass, la especie vegetal y, principalmente, la proporción incorporada al sustrato (Basri et al., 2022). Concentraciones elevadas pueden modificar las propiedades fisicoquímicas del medio de crecimiento, afectando procesos fisiológicos relacionados con la absorción de agua, el desarrollo radicular y el metabolismo secundario de las plantas (Chiam et al., 2021).

Las raíces constituyen el primer órgano que entra en contacto con el sustrato y, por tanto, representan el sitio inicial de percepción y respuesta frente a cambios en las condiciones físicas, químicas y biológicas del medio en el que se encuentra la planta (Maathuis, 2009). Además de su función en la absorción de agua y nutrientes, las raíces sintetizan y acumulan metabolitos secundarios con funciones antioxidantes que participan en la protección celular frente al estrés oxidativo inducido por factores ambientales (Lazar, 2003). Entre estos metabolitos destacan los compuestos fenólicos y los flavonoides, cuya acumulación puede modificarse en respuesta a cambios en la disponibilidad de nutrimentos, la salinidad, el pH o la presencia de compuestos bioactivos en el sustrato (Volder & Iersel, 2019). En consecuencia, la evaluación del metabolismo antioxidante radicular constituye una herramienta útil para comprender la respuesta fisiológica de las plantas frente a nuevos bioinsumos agrícolas.

En un estudio previo realizado con plántulas de kale (*Brassica oleracea*) cultivadas en mezclas de peatmoss y frass termocomposteado de *H. illucens*, se observó que la incorporación del 20 % de frass favoreció el crecimiento de las plántulas, mientras que proporciones superiores modificaron diversos parámetros morfológicos y bioquímicos de la parte aérea (González-Lara et al., 2024). No obstante, la respuesta del sistema radical no fue analizada, a pesar de que este órgano mantiene el contacto directo con el sustrato y puede presentar respuestas fisiológicas diferentes a las observadas en los tejidos foliares.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes proporciones de frass de *Hermetia illucens* incorporado al sustrato de germinación sobre el crecimiento radicular y el metabolismo antioxidante de raíces de plántulas de kale (*Brassica oleracea*), mediante la determinación de la longitud de la raíz, el contenido de fenoles totales y flavonoides, así como la capacidad antioxidante evaluada mediante los métodos ABTS y DPPH.

Materiales y métodos

Obtención del frass y preparación de los sustratos

El frass de larvas de mosca soldado negro (*Hermetia illucens*) se obtuvo de la unidad piloto de biotransformación de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala (Querétaro, México). El frass se produjo a partir de la biotransformación de residuos orgánicos de frutas y hortalizas provenientes de la central de abastos de la ciudad de Querétaro, utilizando larvas de cinco días de edad. Posteriormente, el frass fresco fue sometido a un proceso de termocompostaje mediante el método de pila estática durante 30 días, hasta alcanzar una temperatura máxima aproximada de 65 °C y posteriormente estabilizarse a temperatura ambiente. Finalmente, el material fue tamizado a 2 mm para su utilización como componente del sustrato, siguiendo la metodología descrita por González-Lara et al. (2024). La caracterización fisicoquímica del frass termocomposteado, incluyendo pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno total, relación C:N, capacidad de intercambio catiónico y concentración de macro y micronutrientes, fue realizada previamente siguiendo metodologías estandarizadas y se encuentra reportada en González-Lara et al. (2024).

Se prepararon seis mezclas de sustrato utilizando peatmoss comercial (PREMIER® Sphagnum Peat Moss, Premier Horticulture Inc., Quakertown, PA, EUA) y frass termocomposteado de *H. illucens* en diferentes proporciones volumétricas: 100 % peatmoss (Control), 20 % frass + 80 % peatmoss (S20), 40 % frass + 60 % peatmoss (S40), 60 % frass + 40 % peatmoss (S60), 80% frass + 20% peatmoss (S80) y 100% frass (S100).

Establecimiento del experimento

El experimento se realizó bajo condiciones de invernadero de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, con temperatura entre 8.1 y 38.2 °C, humedad relativa de 16.6 a 76.8 % y fotoperiodo natural. Se utilizaron semillas de kale (*Brassica oleracea* cv. Blue Ridge; SAKATA® Seed America Inc., Morgan Hill, CA, EUA), sembrando una semilla por maceta de poliestireno (8 cm de diámetro × 9 cm de altura; volumen de 0.236 L).

El diseño experimental fue completamente al azar con seis tratamientos (Control, S20, S40, S60, S80 y S100), tres repeticiones por tratamiento y once unidades experimentales por repetición, considerando una planta como unidad experimental. El riego se realizó manualmente de forma diaria durante todo el periodo experimental.

Las raíces obtenidas de las plántulas cosechadas a los 30 días fueron conservadas y procesadas para la determinación de metabolitos antioxidantes; los procedimientos analíticos corresponden a los descritos por González-Lara et al. (2024), analizándose en el presente trabajo únicamente las variables asociadas al sistema radical.

En los tratamientos S80 y S100 no se obtuvo germinación de las semillas, por lo que no fue posible disponer de material vegetal para las determinaciones morfológicas y bioquímicas. En consecuencia, las evaluaciones presentadas en este trabajo corresponden únicamente al control y a los tratamientos S20, S40 y S60.

Determinación de la longitud radicular

Treinta días después de la siembra, las plántulas fueron extraídas cuidadosamente del sustrato y las raíces se lavaron con agua destilada para eliminar los residuos adheridos. Posteriormente, se determinó la longitud de la raíz principal utilizando un vernier, expresando los resultados en milímetros (mm).

Obtención de extractos metanólicos de raíz

Las raíces fueron separadas de la parte aérea y utilizadas para la obtención de extractos metanólicos siguiendo la metodología descrita por Cardador et al. (2008). Se tomaron 25 mg de muestra seca y se adicionaron 2.5 mL de metanol grado analítico. Las muestras permanecieron en oscuridad durante 24 h con agitación constante y posteriormente fueron centrifugadas a 5000 rpm durante 10 min a 4 °C. El sobrenadante obtenido se empleó para la cuantificación de compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante.

Determinación de fenoles totales y flavonoides

El contenido de fenoles totales se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu descrito por Singleton et al. (1999), adaptado a microplacas de 96 pozos. La absorbancia se registró a 760 nm utilizando un espectrofotómetro MULTISKAN™ GO (Thermo Scientific™, Dubuque, IA, EUA). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (mg EAG g^{-1}).

Los flavonoides totales se cuantificaron mediante el método espectrofotométrico de Oomah et al. (2011). Las lecturas se realizaron a 404 nm en el mismo equipo, utilizando rutina como estándar de calibración y expresando los resultados como miligramos equivalentes de rutina por gramo de muestra (mg ER g^{-1}).

Determinación de la capacidad antioxidante

La actividad antioxidante se evaluó mediante los ensayos ABTS y DPPH. Para DPPH se siguió la metodología descrita por Zenil et al. (2018), mezclando 20 µL del extracto metanólico con 200 µL de solución de DPPH y registrando la absorbancia a 520 nm en un espectrofotómetro MULTISKAN™ GO (Thermo Scientific™, Dubuque, IA, EUA).

La capacidad antioxidante mediante ABTS se determinó de acuerdo con Pellegrini et al. (1999), empleando 230 µL del reactivo ABTS y 20 µL del extracto metanólico, registrando

la absorbancia a 734 nm en el mismo equipo. Para ambos ensayos, la actividad antioxidante se expresó como porcentaje de inhibición del radical libre.

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas para verificar el cumplimiento de los supuestos del análisis de varianza (ANOVA). Posteriormente, se realizó un análisis de varianza de una vía y, cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa STATGRAPHICS® Centurion XVI (Statgraphics Technologies Inc., Warrenton, VA, EUA).

Resultados y discusión

La incorporación de frass de mosca soldado negro al sustrato modificó significativamente el crecimiento radicular de las plántulas de kale. Las plántulas cultivadas en el sustrato con 20% de frass y 80% de peatmoss presentaron la mayor longitud de raíz, sin diferencias estadísticas respecto al tratamiento control. En contraste, el incremento de la proporción de frass redujo la longitud radicular, observándose valores de 15.47 ± 0.67 mm en el tratamiento S40 y de 14.70 ± 0.77 mm en el tratamiento S60, siendo este último el que presentó la menor longitud de raíz. Estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores, en el que el uso de frass genera un aumento en la biomasa radicular, sin embargo, la disminución observada en la longitud radicular conforme aumenta la proporción de frass podría estar relacionada con el incremento en la disponibilidad de nitrógeno amoniacal del sustrato (Zhang et al., 2026). Se ha reportado que el frass de *H. illucens* contiene entre 3.6 y 3.9 % de nitrógeno total, del cual aproximadamente el 98 % corresponde a amonio, y que aplicaciones elevadas ocasionan efectos fitotóxicos y limitan el desarrollo radical (Salomon et al., 2025). Esta evidencia coincide con la ausencia de germinación observada en los tratamientos con mayores proporciones de frass (80 y 100 %), lo que sugiere que la concentración del biofertilizante constituye un factor determinante para su utilización como componente de sustratos de germinación.

El contenido de fenoles totales fue significativamente mayor en las raíces de las plántulas del tratamiento control (449.29 ± 119.08 mg equivalentes de ácido gálico g^{-1}), mientras que la incorporación de frass redujo significativamente esta variable, independientemente de la proporción utilizada. Los tratamientos S20, S40 y S60 registraron contenidos de 120.31 ± 6.54, 167.06 ± 18.46 y 146.16 ± 19.12 mg equivalentes de ácido gálico g^{-1}, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos. En contraste con los fenoles totales, el contenido de

flavonoides se incrementó con las mayores proporciones de frass. Los tratamientos S40 y S60 presentaron los valores más altos y fueron estadísticamente similares entre sí, pero superiores al control y a S20, los cuales no mostraron diferencias significativas.

La capacidad antioxidante determinada mediante el ensayo ABTS también fue influenciada por la proporción de frass en el sustrato. El tratamiento S40 presentó el mayor porcentaje de inhibición, seguido de S60, ambos significativamente superiores al control y a S20, cuyos valores fueron estadísticamente similares.

De manera similar, la actividad antioxidante evaluada mediante el ensayo DPPH mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). Las raíces de las plántulas cultivadas en S40 alcanzaron el mayor porcentaje de inhibición, superando significativamente al resto de los tratamientos. El control y S60 presentaron valores intermedios y estadísticamente similares entre sí, mientras que S20 registró la menor actividad antioxidante. Los valores antes mencionados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Longitud y actividad antioxidante en raiz de plantulas de kale (*Brassica oleracea*)

Tratamiento	Longitud (mm)	Fenoles (mg EAG g^{-1})	Flavonoides (mg ER g^{-1})	ABTS (%)	DPPH (%)
Control	17.40 ± 0.71 ^{ab}	449.29 ± 119.08 ^{a}	0.73 ± 0.12 ^{b}	49.02 ± 1.07 ^{c}	28.48 ± 0.61 ^{b}
S20	17.93 ± 0.65 ^{a}	120.31 ± 6.54 ^{b}	0.56 ± 0.14 ^{b}	45.98 ± 1.19 ^{c}	18.79 ± 3.74 ^{c}
S40	15.47 ± 067 ^{bc}	167.06 ± 18.46 ^{b}	1.46 ± 0.06 ^{a}	80.87 ± 1.12 ^{a}	41.42 ± 0.61 ^{a}
S60	14.70 ± 0.77 ^{c}	146.16 ± 19.12 ^{b}	1.50 ± 0.09 ^{a}	76.97 ± 0.61 ^{b}	27.77 ± 1.64 ^{b}

Valores promedio ± error estándar; las letras en superíndice indican diferencias significativas con un nivel de $p < 0.05$ según la prueba LSD de Fisher.

El mayor contenido de fenoles observado en el tratamiento control podría indicar que las plántulas establecidas únicamente en peatmoss estuvieron expuestas a un mayor grado de estrés asociado con la limitada disponibilidad de nutrimentos de este sustrato. Aunque el peatmoss proporciona condiciones físicas favorables para la germinación, su reducido aporte nutrimental obliga a las plántulas a depender inicialmente de las reservas de la semilla y, posteriormente, del suministro externo de nutrientes. Se ha demostrado que diferentes estímulos de estrés pueden inducir la acumulación de compuestos fenólicos en los tejidos radicales, donde participan en mecanismos de defensa y protección celular (Zhu & Yao, 2004). En contraste, el frass termocomposteado aportó materia orgánica y nutrimentos, previamente caracterizados por González-Lara et al. (2024), lo que probablemente atenuó el estrés por deficiencia nutrimental y redujo la acumulación de fenoles totales. No obstante, en los tratamientos S40 y S60 se observó un incremento significativo en el contenido de flavonoides y en la capacidad antioxidante, lo que sugiere que, a medida que aumentó la proporción de frass, el metabolismo fenólico experimentó una reorganización. En este escenario, la disminución de los fenoles totales podría reflejar una redistribución de la vía

fenilpropanoide hacia la síntesis de metabolitos con mayor capacidad antioxidante, como los flavonoides (Amalesh et al., 2011), en respuesta a las nuevas condiciones fisicoquímicas del sustrato. Estos resultados indican que la respuesta del metabolismo fenólico estuvo determinada tanto por la disponibilidad de nutrimentos como por los cambios fisiológicos inducidos por la incorporación de frass.

La comparación entre los resultados obtenidos en hojas (González-Lara et al., 2024) y raíces en el presente estudio evidencia una respuesta antioxidante órgano-específica. Mientras que la parte aérea presentó modificaciones moderadas en la capacidad antioxidante, las raíces mostraron incrementos más pronunciados en los ensayos ABTS y DPPH, particularmente en el tratamiento con 40 % de frass. Este comportamiento es consistente con el hecho de que el sistema radical constituye el primer sitio de interacción con el sustrato y, por tanto, el primer órgano en percibir los cambios fisicoquímicos inducidos por la incorporación de frass (Volder & Iersel, 2019).

Conclusiones

La incorporación de frass termocomposteado de *Hermetia illucens* como componente del sustrato de germinación modificó el crecimiento y el metabolismo antioxidante de las raíces de plántulas de *Brassica oleracea*. Las mezclas con 40 y 60 % de frass redujeron la longitud radicular respecto al control, mientras que las proporciones de 80 y 100 % no permitieron la obtención de plántulas para su evaluación.

El frass disminuyó el contenido de fenoles totales en las raíces, mientras que las mezclas con 40 y 60 % incrementaron el contenido de flavonoides y la capacidad antioxidante determinada mediante los ensayos ABTS y DPPH, evidenciando una respuesta diferencial del metabolismo antioxidante radicular en función de la proporción de frass incorporada al sustrato.

Los resultados obtenidos indican que el uso de frass termocomposteado de *H. illucens* modifica la respuesta fisiológica del sistema radical durante las primeras etapas del desarrollo de *B. oleracea*, por lo que la proporción de incorporación al sustrato constituye un factor determinante para su utilización como componente de medios de germinación.

Futuras investigaciones deberán determinar si el estrés metabólico inducido por diferentes proporciones de frass durante la germinación y el establecimiento de las plántulas tiene efectos persistentes sobre el desarrollo fisiológico, la productividad y la calidad de *Brassica oleracea* en etapas posteriores del cultivo.

Literatura citada

Amalesh, S., Gouranga, D., & Sanjoy Kumar, D. (2011). Roles of flavonoids in Plants. *Int J Pharm Sci Tech*, *6*(1). https://www.researchgate.net/publication/279499208

Basri, N. E. A., Azman, N. A., Ahmad, I. K., Suja, F., Jalil, N. A. A., & Amrul, N. F. (2022). Potential Applications of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae Treatment of Food Waste: A Review. In *Foods* (Vol. 11, Number 17). MDPI. https://doi.org/10.3390/foods11172664

Chiam, Z., Lee, J. T. E., Tan, J. K. N., Song, S., Arora, S., Tong, Y. W., & Tan, H. T. W. (2021). Evaluating the potential of okara-derived black soldier fly larval frass as a soil amendment. *Journal of Environmental Management*, *286*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112163

Choi, S., & Hassanzadeh, N. (2019). BSFL Frass: A Novel Biofertilizer for Improving Plant Health While Minimizing Environmental Impact. *Candian Sci. Fair*, *2*(2), 41–46. https://doi.org/10.18192/csfj.v2i220194146

González-Lara, H., Parra-Pacheco, B., Aguirre-Becerra, H., Feregrino-Perez, A. A., & Garcia-Trejo, J. F. (2024). Effects of Using Thermocomposted Frass from Black Soldier Fly Larvae as a Germination Substrate on the Phytotoxicity, Germination Index, Growth and Antioxidant Contents in Kale (Brassica oleracea). *Agronomy*, *14*(7). https://doi.org/10.3390/agronomy14071392

Lazar, T. (2003). Taiz, L. and Zeiger, E. Plant physiology. 3rd edn. *Annals of Botany*, *91*(6), 750–751. https://doi.org/10.1093/aob/mcg079

Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. In *Current Opinion in Plant Biology* (Vol. 12, Number 3, pp. 250–258). https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003

Menino, R., Felizes, F., Castelo-Branco, M. A., Fareleira, P., Moreira, O., Nunes, R., & Murta, D. (2021). Agricultural value of Black Soldier Fly larvae frass as organic fertilizer on ryegrass. *Heliyon*, *7*(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05855

Salomon, M. J., Cavagnaro, T. R., & Burton, R. A. (2025). Potential of black soldier fly larvae frass (BSFL) as a novel fertilizer: impacts on tomato growth, nutrient uptake, and mycorrhizal formation. *Plant and Soil*. https://doi.org/10.1007/s11104-024-07187-4

Setti, L., Francia, E., Pulvirenti, A., Gigliano, S., Zaccardelli, M., Pane, C., Caradonia, F., Bortolini, S., Maistrello, L., & Ronga, D. (2019). Use of black soldier fly (Hermetia illucens (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae processing residue in peat-based growing media. *Waste Management*, *95*, 278–288. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.017

Song, S., Ee, A. W. L., Tan, J. K. N., Cheong, J. C., Chiam, Z., Arora, S., Lam, W. N., & Tan, H. T. W. (2021). Upcycling food waste using black soldier fly larvae: Effects of further composting on frass quality, fertilising effect and its global warming potential. *Journal of Cleaner Production*, *288*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125664

Volder, A., & Iersel, M. van. (2019). Root growth, physiology, and potential impact of soilless culture on their functioning. In *Soilless Culture: Theory and Practice Theory and Practice* (pp. 15–32). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00002-5

Zhang, B., Xue, Y., Pan, C., & Zeng, G. (2026). Effects of Black Soldier Fly Frass on Plant Growth by Meta-Analysis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *26*(2), 7006–7016. https://doi.org/10.1007/s42729-026-03317-2

Zhu, H. H., & Yao, Q. (2004). Localized and systemic increase of phenols in tomato roots induced by Glomus versiforme inhibits Ralstonia solanacearum. *Journal of Phytopathology*, *152*(10), 537–542. https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2004.00892.x

Revalorización de la borra de café mediante lombricompostaje con Eisenia fetida: una revisión documental

Graciela Hortensia Niño Mendoza[71]

Resumen

La producción de café genera grandes cantidades de residuos sólidos orgánicos, particularmente pulpa, cascarilla y borra de café, los cuales representan un problema ambiental debido a su alto contenido de materia orgánica, cafeína y compuestos fenólicos. En este contexto, el vermicompostaje mediante el uso de la lombriz roja californiana (Eisenia fetida) se considera una alternativa sustentable para el aprovechamiento de estos residuos agroindustriales. El presente trabajo realiza una revisión documental de literatura científica relacionada con el vermicompostaje de residuos derivados del café, con el objetivo de analizar la eficiencia del proceso, las principales variables fisicoquímicas involucradas y los beneficios agronómicos y ambientales reportados. La metodología se desarrolla bajo un enfoque documental cualitativo mediante el análisis comparativo de artículos científicos, tesis y documentos técnicos obtenidos de bases de datos académicas especializadas. Los resultados muestran que Eisenia fetida posee una elevada capacidad para degradar materia orgánica compleja, favoreciendo la estabilización biológica del material, la reducción de la relación carbono/nitrógeno y el incremento en la disponibilidad de nutrientes esenciales. Asimismo, se identifica que factores como humedad, aireación, temperatura y proporciones de mezcla influyen directamente en la eficiencia del vermicompostaje y en la calidad del humus obtenido. Diversos estudios también reportan mejoras en propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo tras la aplicación de vermicompostaje. Se concluye que el vermicompostaje de residuos derivados del café constituye una estrategia eficiente y sustentable para el manejo de residuos agroindustriales, contribuyendo a la reducción de contaminación ambiental y promoviendo prácticas de economía circular y agricultura sostenible.

Palabras clave: Borra de café, vermicompostaje, Eisenia fetida, lombricomposta, residuos agroindustriales, economía circular, sostenibilidad agrícola

Abstract

[71] Universidad Tecnológica de San Miguel de Allende, Camino a San Julián No. 8, Colonia Casco de Landeta, C.P. 37700, San Miguel de Allende, Guanajuato, México, ghnino@utsma.edu.mx

Coffee production generates large amounts of organic solid waste, particularly coffee pulp, husk, and spent coffee grounds, which represent an environmental problem due to their high content of organic matter, caffeine, and phenolic compounds. In this context, vermicomposting using the California red worm (Eisenia fetida) is considered a sustainable alternative for the utilization of these agro-industrial residues. The present study conducts a documentary review of scientific literature related to vermicomposting of coffee-derived residues, aiming to analyze process efficiency, main physicochemical variables involved, and agronomic and environmental benefits reported. The methodology was developed under a qualitative documentary approach through comparative analysis of scientific articles, theses, and technical documents obtained from specialized academic databases. Results show that Eisenia fetida has a high capacity to degrade complex organic matter, promoting biological stabilization of material, reduction of carbon-to-nitrogen ratio, and increased availability of essential nutrients. It is also identified that factors such as moisture, aeration, temperature, and mixing proportions directly influence vermicomposting efficiency and humus quality. Various studies also report improvements in physical, chemical, and microbiological soil properties after vermicompost application. It is concluded that vermicomposting of coffee-derived residues constitutes an efficient and sustainable strategy for agro-industrial waste management, contributing to reduction of environmental pollution and promoting circular economy practices and sustainable agriculture.

Keywords: Spent coffee grounds, vermicomposting, Eisenia fetida, vermicompost, agro-industrial waste, circular economy, agricultural sustainability

Introducción

El café constituye una de las materias primas agrícolas de mayor importancia en el comercio internacional y una de las bebidas más consumidas a nivel mundial (Rizzuto & Liliana, 2014; Urrego & Godoy, 2021; Ilangovan et al., 2019). Su producción global supera los 10 millones de toneladas anuales (Battista et al., 2020; Rodriguez & Palma, 2023), generando durante su procesamiento una gran cantidad de residuos sólidos orgánicos, entre los que destacan pulpa, cascarilla y borra de café. Se estima que la agroindustria cafetalera produce aproximadamente 7 millones de toneladas de residuos orgánicos cada año (Battista et al., 2020), lo que representa un problema ambiental significativo debido a la disposición inadecuada de estos subproductos (Bedaiwy et al., 2019).

Diversos estudios reportan que los residuos derivados del café presentan elevadas concentraciones de materia orgánica, humedad, cafeína y compuestos fenólicos, los cuales pueden provocar contaminación de cuerpos de agua, degradación del suelo y alteraciones en

los ecosistemas (Bedaiwy et al., 2019; Moussa et al., 2024; Hanc & Dreslova, 2021). Asimismo, durante su descomposición anaerobia se generan emisiones de metano, uno de los principales gases de efecto invernadero asociados con el cambio climático (Hanc & Dreslova, 2021). Desde el punto de vista químico, estos residuos contienen lignina, lípidos, celulosa, hemicelulosa y otros polisacáridos complejos (Moussa et al., 2024), además de compuestos bioactivos como aminoácidos, ácidos grasos, polifenoles y minerales con potencial de aprovechamiento industrial y agrícola (Vardon et al., 2013).

La problemática ambiental asociada con la acumulación de residuos cafetaleros ha impulsado el desarrollo de estrategias sostenibles orientadas a su valorización y aprovechamiento (Battista et al., 2020; Moussa et al., 2024; Ramos-Suárez et al., 2021). En este contexto, diversas investigaciones han propuesto alternativas relacionadas con la producción de biocombustibles, biochar, fertilizantes orgánicos, materiales compuestos, alimentación animal y sustratos para el crecimiento de hongos (Moussa et al., 2024; Vardon et al., 2013; Ramos-Suárez et al., 2021; Murthy & Madhava Naidu, 2012; Phrommarat & Paopuree, 2024). Estas estrategias buscan fortalecer modelos de economía circular mediante el reciclaje y reutilización de residuos agroindustriales, promoviendo prácticas de sostenibilidad ambiental y reducción de impactos contaminantes (Moussa et al., 2024; Ramos-Suárez et al., 2021; González-Moreno et al., 2020).

Entre las tecnologías biológicas empleadas para el aprovechamiento de residuos orgánicos, el vermicompostaje destaca como una alternativa sustentable y eficiente para transformar residuos sólidos en productos estabilizados y ricos en nutrientes (Sharma et al., 2021; Arancon et al., 2004). Este proceso utiliza lombrices epigeas, particularmente Eisenia fetida, conocida comúnmente como lombriz roja californiana, para acelerar la degradación biológica de la materia orgánica y producir humus de alta calidad (Sharma et al., 2021; Arancon et al., 2004). Diversos estudios señalan que el vermicompostaje mejora la estructura del suelo, incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales y favorece la actividad microbiológica, además de contribuir a la reducción de contaminación ambiental y fortalecimiento de modelos de economía circular en sistemas agrícolas sostenibles (Hanc et al., 2019; Mussatto et al., 2011; Ballesteros et al., 2014; Telila et al., 2025).

En la última década, la borra y otros residuos sólidos orgánicos derivados del café han adquirido relevancia como posibles enmiendas orgánicas debido a su composición química y contenido nutrimental (Bedaiwy et al., 2019; Hu, 2024; Sunset, 2009). Se han reportado aplicaciones en céspedes, jardines y cultivos agrícolas, observándose mejoras en retención de humedad, estructura del suelo y actividad microbiológica (Bedaiwy et al., 2019; Sunset, 2009). Asimismo, se ha señalado que los residuos de café constituyen una importante fuente

de nutrientes cuando se mezclan con otros materiales orgánicos, presentando una relación carbono-nitrógeno cercana a 20:1 (Pennsylvania State College of Agricultural Sciences, 2007).

El contenido químico y nutrimental de los residuos sólidos orgánicos derivados del café evidencia concentraciones importantes de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, además de micronutrientes esenciales como hierro, zinc, manganeso y cobre, como se muestra en la Tabla 1 (Bedaiwy et al., 2019; Rosas-Calleja et al., 2016; Hernández et al., 2011; Pandey et al., 2000; Molina & Zuluaga, 2017). Estas características demuestran el potencial de los residuos cafetaleros para su aprovechamiento en procesos de vermicompostaje y producción de fertilizantes orgánicos.

Tabla 1. Propiedades y elementos químicos pertinentes de los residuos sólidos orgánicos del café

Propiedades químicas	Rango contenido
Conductividad eléctrica	3.19 dS/m^{-1}
pH	5.91
Materia orgánica	78.4 %
Nitrógeno (N)	2.24 %
Fósforo (P)	0.15 %
Potasio (K)	0.47 %

Fuente: elaboración propia con datos de Bedaiwy et al. (2019); Rosas-Calleja et al. (2016); Hernández et al. (2011); Pandey et al. (2000); Molina y Zuluaga (2017).

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque documental cualitativo de tipo descriptivo-analítico, orientado al análisis de información científica relacionada con el uso de la lombriz roja californiana (Eisenia fetida) en procesos de vermicompostaje de residuos orgánicos derivados del café, particularmente pulpa, cascarilla y borra de café. Este enfoque permite recopilar, organizar, comparar y analizar críticamente la evidencia científica disponible respecto a los procesos de transformación biológica de residuos cafetaleros, así como los efectos agronómicos, ambientales y económicos asociados con el vermicompostaje.

La investigación se plantea desde una perspectiva de revisión crítica de literatura científica especializada, debido a que el vermicompostaje de residuos de café representa una alternativa relevante dentro de modelos de economía circular y manejo sustentable de residuos agroindustriales (Battista et al., 2020; Sharma et al., 2021; Pennsylvania State College of

Agricultural Sciences, 2007; Makris, 2025; Lazcano et al., 2008). Asimismo, el análisis se orienta a identificar tendencias de investigación, limitaciones metodológicas, condiciones operativas y principales aportaciones científicas relacionadas con el aprovechamiento de residuos cafetaleros mediante Eisenia fetida.

La recopilación de información se realiza mediante una búsqueda sistemática de literatura científica publicada entre 1995 y 2025. Para ello, se consultan bases de datos académicas y motores especializados ampliamente utilizados en investigación científica, entre ellos SciELO, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Redalyc y Google Scholar, además de repositorios universitarios digitales, tesis de posgrado y documentos técnicos relacionados con manejo de residuos orgánicos, producción cafetalera y agricultura sustentable.

La búsqueda bibliográfica se desarrolla utilizando palabras clave en español e inglés relacionadas directamente con el objeto de estudio. Entre los principales términos empleados se incluyen: "vermicompostaje", "lombricomposta", "Eisenia fetida", "lombriz roja californiana", "coffee waste", "spent coffee grounds", "coffee pulp", "coffee husk", "organic waste", "vermicomposting", "composting", "biofertilizers" y "circular economy".

Los documentos recuperados son sometidos a un proceso de selección considerando criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Se incluyen artículos científicos indexados, tesis de posgrado, libros especializados y documentos técnicos relacionados directamente con:
- Vermicompostaje de residuos orgánicos;
- Uso de Eisenia fetida;
- Aprovechamiento de residuos derivados del café;
- Producción de abonos orgánicos;
- Sostenibilidad agrícola y economía circular.

Se priorizan investigaciones que reportan información experimental relacionada con:
- Tiempos de degradación;
- Relación carbono/nitrógeno;
- Estabilidad biológica;
- Crecimiento y supervivencia de lombrices;
- Calidad fisicoquímica del vermicompostaje;
- Efectos agronómicos y ambientales.

Por otra parte, se excluyen documentos sin respaldo científico, publicaciones duplicadas, estudios con información metodológica insuficiente y referencias no relacionadas directamente con el objeto de estudio.

Posteriormente, los estudios seleccionados se organizan y clasifican de acuerdo con el tipo de residuo utilizado.

Resultados y Discusión

Los residuos derivados de la agroindustria cafetalera, particularmente la pulpa, cáscara y borra de café, han adquirido relevancia como sustratos potenciales para procesos de compostaje y vermicompostaje debido a su elevada disponibilidad y contenido de materia orgánica (Hu, 2024; Pennsylvania State College of Agricultural Sciences, 2007; Hernández et al., 2011; Pandey et al., 2000; Ilangovan et al., 2019; Campos-Vega et al., 2015; Mussatto et al., 2011; Janissen & Huynh, 2018; Ballesteros et al., 2014). Diversas investigaciones coinciden en que estos residuos contienen cantidades importantes de carbono orgánico, nitrógeno, potasio, compuestos fenólicos y materiales lignocelulósicos, lo que favorece su aprovechamiento en procesos de reciclaje de nutrientes y producción de biofertilizantes (Hernández et al., 2011; Pandey et al., 2000; Mussatto et al., 2011; Janissen & Huynh, 2018; Ballesteros et al., 2014; Cruz et al., 2012; Aranda, 1995). Sin embargo, varios estudios advierten que el uso directo de residuos de café puede generar efectos fitotóxicos y procesos de acidificación debido a la presencia de cafeína, taninos y compuestos fenólicos (Hu, 2024; Hernández et al., 2011; Liu et al., 2011; Campos-Vega et al., 2015). Estas observaciones son consistentes con investigaciones recientes que reportan disminución en germinación y crecimiento vegetal cuando la borra de café se aplica sin estabilización biológica previa (Hu, 2024; Liu et al., 2011; Campos-Vega et al., 2015).

Aunque la mayoría de los estudios destacan el potencial agronómico de los residuos cafetaleros, existen diferencias importantes respecto a la composición química reportada entre investigaciones (Pandey et al., 2000; Janissen & Huynh, 2018; Ballesteros et al., 2014; Cruz et al., 2012). Algunos autores atribuyen estas variaciones al tipo de café procesado, condiciones de tostado, método de extracción y almacenamiento del residuo (Domínguez et al., 2000; Edwards et al., 2011; Singh et al., 2020). Esta heterogeneidad dificulta establecer parámetros estandarizados para su utilización agrícola, lo que evidencia la necesidad de desarrollar protocolos específicos para su caracterización fisicoquímica antes de su aprovechamiento en procesos de vermicompostaje (Hu, 2024; Makris, 2025; Janissen & Huynh, 2018).

Además de su potencial agrícola, investigaciones recientes han destacado el valor de los residuos de café en estrategias de economía circular y valorización de subproductos agroindustriales (Battista et al., 2020; Rodriguez & Palma, 2023; González-Moreno et al.,

2020; Makris, 2025). Algunos estudios reportan aplicaciones en producción de biocombustibles, biochar, materiales compuestos y acondicionadores de suelo (Rizzuto & Liliana, 2014; Moussa et al., 2024; Vardon et al., 2013; Makris, 2025), lo que demuestra la versatilidad de estos residuos y su importancia dentro de modelos de producción sustentable. No obstante, la literatura señala que muchas de estas aplicaciones aún se encuentran en fases experimentales o de laboratorio, existiendo escasa información sobre su viabilidad económica y escalamiento industrial (González-Moreno et al., 2020; Makris, 2025; Janissen & Huynh, 2018).

Las investigaciones pioneras sobre vermicompostaje de pulpa de café demostraron que Eisenia fetida posee una elevada capacidad para transformar residuos orgánicos complejos en productos estables y ricos en nutrientes (Hernández-Rodríguez et al., 2017; Aranda, 1995; Siles Calvo, 1997). Estudios desarrollados en Costa Rica identificaron que variables como humedad, temperatura, aireación y densidad poblacional de lombrices influyen directamente en la velocidad de degradación y en la calidad del vermicompostaje obtenido (Flores Pincay, 2025; Lazcano et al., 2008). Estos resultados coinciden con investigaciones posteriores que señalan que el control de parámetros fisicoquímicos es fundamental para evitar condiciones anaerobias y minimizar pérdidas de nitrógeno durante el proceso (Hanc et al., 2019; Orozco et al., 1996; Domínguez et al., 2000; Suthar & Singh, 2008; Suthar, 2009; Nogales et al., 2005).

Se ha observado que el vermicompostaje de pulpa de café reduce significativamente la relación carbono/nitrógeno (C/N), incrementa la disponibilidad de fósforo y nitrógeno y mejora la estabilidad del material orgánico (Hernández-Rodríguez et al., 2017). Asimismo, diversos estudios reportan que el vermicompostaje presenta mayor eficiencia biológica que el compostaje convencional debido a la interacción entre microorganismos y lombrices (Hanc et al., 2019; Orozco et al., 1996; Suthar & Singh, 2008; Suthar, 2009). Sin embargo, algunos trabajos reportan tiempos de estabilización variables dependiendo de las características del residuo utilizado y de las condiciones experimentales (Hanc & Dreslova, 2021; Sharma et al., 2021; Hanc et al., 2019; Smolskii, 2025). Mientras ciertas investigaciones muestran procesos de degradación relativamente rápidos y elevada mineralización (Hanc et al., 2019; Hernández-Rodríguez et al., 2017), otros estudios señalan limitaciones relacionadas con altas concentraciones de compuestos fenólicos y cafeína (Smolskii, 2025; Liu et al., 2011; Campos-Vega et al., 2015).

El análisis comparativo de investigaciones recientes evidencia discrepancias importantes respecto a las proporciones óptimas de mezcla utilizadas en el vermicompostaje de residuos de café (Hanc & Dreslova, 2021; Sharma et al., 2021; Hanc et al., 2019; Smolskii, 2025).

Algunos autores recomiendan mezclar borra de café con residuos lignocelulósicos o estiércoles para mejorar aireación y equilibrio carbono/nitrógeno (Hanc & Dreslova, 2021; Hanc et al., 2019; Orozco et al., 1996), mientras que otros reportan que concentraciones elevadas de residuos cafetaleros pueden afectar la supervivencia y reproducción de las lombrices (Sharma et al., 2021; Smolskii, 2025; Liu et al., 2011). Estas diferencias metodológicas dificultan establecer condiciones universales de operación y ponen de manifiesto la necesidad de estandarizar parámetros experimentales para mejorar la reproducibilidad de resultados (Hanc et al., 2019; Suthar, 2009; Bernal et al., 2009).

Diversas investigaciones han demostrado que la actividad biológica de Eisenia fetida constituye uno de los factores clave en la eficiencia del vermicompostaje (Sunset, 2009; Domínguez et al., 2000; Suthar, 2009; Edwards et al., 2011; Singh et al., 2020; Awasthi et al., 2015; Bernal et al., 2009). Se ha identificado que las enzimas intestinales de esta especie participan activamente en la degradación de lignina, hemicelulosa y celulosa presentes en los residuos de café, favoreciendo la transformación de compuestos complejos y la mineralización de nutrientes (Awasthi et al., 2015). Asimismo, se ha reportado que la actividad microbiana y la producción de ácidos húmicos incrementan significativamente durante el vermicompostaje, favoreciendo la disponibilidad nutrimental y el crecimiento vegetal (Atiyeh et al., 2002; Singh et al., 2020; Telila et al., 2025).

Otros estudios indican que las lombrices actúan como modificadores biológicos del sustrato al estimular comunidades microbianas benéficas y acelerar procesos de humificación (Suthar, 2009; Singh et al., 2020; Awasthi et al., 2015). Sin embargo, algunos autores señalan que la eficiencia biológica de Eisenia fetida puede disminuir cuando predominan residuos con elevada acidez o alto contenido fenólico (Hanc & Dreslova, 2021; Smolskii, 2025; Liu et al., 2011). De igual manera, se ha observado que la supervivencia y reproducción de las lombrices depende significativamente de la humedad, temperatura y aireación del sistema (Domínguez et al., 2000; Edwards et al., 2011; Sinha et al., 2008).

Aunque la mayoría de las investigaciones reportan resultados positivos, existen diferencias importantes en la capacidad adaptativa de Eisenia fetida dependiendo del tipo de residuo utilizado (Hanc et al., 2019; Domínguez et al., 2000; Edwards et al., 2011; Singh et al., 2020). Algunos estudios muestran alta tolerancia a mezclas con borra de café (Hanc & Dreslova, 2021; Hanc et al., 2019), mientras otros reportan disminución en actividad biológica cuando las proporciones de residuos cafetaleros son excesivas (Sharma et al., 2021; Liu et al., 2011). Estas discrepancias reflejan la necesidad de realizar investigaciones más homogéneas que permitan definir límites adecuados de incorporación de residuos de café dentro de sistemas de vermicompostaje.

El análisis comparativo de investigaciones recientes evidencia resultados contrastantes respecto al uso de compostaje y vermicompostaje como estrategias de estabilización de residuos cafetaleros (Hanc et al., 2019; Orozco et al., 1996; Suthar, 2009; Nogales et al., 2005). Diversos estudios coinciden en que el vermicompostaje presenta ventajas relacionadas con mayor velocidad de degradación, reducción del volumen de residuos y obtención de biofertilizantes con mayor disponibilidad nutrimental (Hanc et al., 2019; Suthar, 2009; Smolskii, 2025; Makris, 2025; Janissen & Huynh, 2018; Lazcano et al., 2008). Asimismo, se reporta que la acción conjunta de microorganismos y lombrices favorece procesos de humificación más eficientes en comparación con el compostaje convencional (Atiyeh et al., 2002; Singh et al., 2020; Domínguez, 2004).
No obstante, algunos autores señalan que el compostaje convencional puede resultar más eficiente en sistemas con grandes volúmenes de residuos o condiciones ambientales limitantes para el desarrollo de lombrices (Suthar, 2009; Liu et al., 2011; Nogales et al., 2005). Además, ciertas investigaciones reportan que el vermicompostaje requiere mayor control de humedad, temperatura y aireación para evitar mortalidad de Eisenia fetida (Hanc et al., 2019; Domínguez et al., 2000; Molina & Zuluaga, 2017; Makris, 2025; Sinha et al., 2008). Estas observaciones indican que la elección entre compostaje y vermicompostaje depende no solamente de la calidad final del producto, sino también de factores operativos, económicos y ambientales.

En contraste, diversos estudios concluyen que la mezcla de borra de café con materiales ricos en fibra o residuos lignocelulósicos mejora significativamente la estabilidad biológica y acelera la transformación del material (Hanc & Dreslova, 2021; Sharma et al., 2021; Hanc et al., 2019; Orozco et al., 1996; Domínguez et al., 2000). Además, se ha reportado que el vermicompostaje favorece la formación de sustancias húmicas y mejora la actividad microbiológica del sustrato, incrementando la calidad agronómica del vermicompostaje obtenido (Atiyeh et al., 2002; Singh et al., 2020; Telila et al., 2025).

Diversos estudios destacan que la vermicomposta generada a partir de residuos de café mejora propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Bedaiwy et al., 2019; Lim et al., 2015; Atiyeh et al., 2002; Ordoñez-Arévalo et al., 2018; Aira et al., 2007; Gutiérrez-Miceli et al., 2007; Gajalakshmi & Abbasi, 2008). Se han reportado incrementos significativos en crecimiento vegetal, rendimiento agrícola, retención de humedad y actividad microbiana tras la aplicación de vermicompostaje (Lim et al., 2015; Atiyeh et al., 2002; Ordoñez-Arévalo et al., 2018; Hanc et al., 2019; Mussatto et al., 2011; Ballesteros et al., 2014; Gutiérrez-Miceli et al., 2007). Asimismo, algunos estudios señalan que la presencia de ácidos húmicos y compuestos bioactivos derivados del proceso de vermicompostaje favorece la disponibilidad

de nutrientes y mejora la fertilidad del suelo (Atiyeh et al., 2002; Ordoñez-Arévalo et al., 2018).

Desde el punto de vista ambiental, los estudios recientes muestran una tendencia creciente hacia la evaluación del vermicompostaje dentro de modelos de economía circular y manejo sustentable de residuos (Battista et al., 2020; Rodriguez & Palma, 2023; González-Moreno et al., 2020; Hanc et al., 2019; Makris, 2025; Lazcano et al., 2008; Raza et al., 2019; Hanc & Tonika, 2021). Se ha señalado que la valorización integral de residuos cafetaleros permite reducir impactos ambientales asociados con disposición inadecuada, emisiones contaminantes y acumulación de residuos orgánicos (Battista et al., 2020; González-Moreno et al., 2020; Makris, 2025). Sin embargo, algunos autores advierten que todavía existe información limitada relacionada con análisis económicos integrales, escalamiento industrial y evaluación de largo plazo del impacto agronómico del vermicompostaje derivado de residuos de café (González-Moreno et al., 2020; Makris, 2025; Janissen & Huynh, 2018). Investigaciones basadas en análisis de ciclo de vida reportan que el aprovechamiento de borra de café mediante vermicompostaje puede disminuir significativamente la carga ambiental en comparación con métodos convencionales de disposición final (González-Moreno et al., 2020; Raza et al., 2019; Sánchez, 2019). Asimismo, diversos estudios indican que el vermicompost derivado de residuos de café posee potencial como fertilizante orgánico y sustrato agrícola dentro de sistemas productivos sostenibles (Yadav & Garg, 2011; Domínguez & Edwards, 2011; Raza et al., 2019).

Aunque la mayoría de las investigaciones reportan beneficios agronómicos importantes, persiste una elevada variabilidad metodológica entre estudios, especialmente en dosis de aplicación, condiciones edáficas, proporciones de mezcla y tipo de cultivo evaluado (Sharma et al., 2021; Smolskii, 2025; Ordoñez-Arévalo et al., 2018; Yadav & Garg, 2011; Domínguez & Edwards, 2011). Esta situación limita la comparación directa de resultados y evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones multidisciplinarias que integren variables agronómicas, microbiológicas, económicas y ambientales bajo condiciones experimentales estandarizadas (González-Moreno et al., 2020; Hanc et al., 2019; Makris, 2025; Suthar, 2009; Yadav & Garg, 2011; Sánchez, 2019).

Conclusiones

En este trabajo se realizó un análisis crítico de la literatura científica relacionada con el vermicompostaje de residuos derivados del café mediante el uso de Eisenia fetida, orientado a evaluar su potencial como estrategia sustentable para el aprovechamiento de residuos agroindustriales dentro de modelos de economía circular. A partir de la revisión de

investigaciones nacionales e internacionales, fue posible identificar una amplia variedad de aplicaciones del vermicompostaje en residuos como pulpa, cascarilla y borra de café, así como las principales condiciones fisicoquímicas y biológicas que influyen en la eficiencia del proceso.

Los resultados obtenidos demuestran que el vermicompostaje constituye una alternativa eficiente para la estabilización biológica de residuos cafetaleros, permitiendo reducir la relación carbono/nitrógeno, incrementar la disponibilidad de nutrientes y mejorar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo (Lim et al., 2015; Hanc et al., 2019; Hernández-Rodríguez et al., 2017; Ordoñez-Arévalo et al., 2018; Gutiérrez-Miceli et al., 2007). Asimismo, diversos estudios reportan que la actividad biológica y enzimática de Eisenia fetida favorece la degradación de compuestos lignocelulósicos y acelera los procesos de humificación y mineralización de nutrientes (Hanc et al., 2019; Orozco et al., 1996; Suthar, 2009). En comparación con el compostaje convencional, el vermicompostaje presenta ventajas relacionadas con una mayor velocidad de degradación, mejor calidad agronómica del producto final y mayor disponibilidad nutrimental (Hanc et al., 2019; Orozco et al., 1996; Suthar, 2009).

El análisis comparativo de los estudios revisados permitió identificar discrepancias importantes respecto a las condiciones óptimas de operación. Mientras algunas investigaciones reportan elevada eficiencia biológica y rápida estabilización del material utilizando altas proporciones de residuos de café (Hanc & Dreslova, 2021; Hanc et al., 2019), otros estudios señalan limitaciones asociadas con la presencia de cafeína, taninos y compuestos fenólicos, los cuales pueden afectar la supervivencia y actividad biológica de Eisenia fetida (Hu, 2024; Smolskii, 2025; Liu et al., 2011). Estas diferencias evidencian que la eficiencia del vermicompostaje depende significativamente de variables como humedad, temperatura, aireación, proporción de mezcla y características químicas del residuo utilizado (Hanc et al., 2019; Flores Pincay, 2025; Domínguez et al., 2000; Suthar, 2009). Asimismo, la elevada heterogeneidad metodológica observada entre investigaciones limita la comparación directa de resultados y dificulta establecer protocolos universales para el aprovechamiento de residuos cafetaleros.

Desde el punto de vista ambiental, los estudios revisados muestran que el vermicompostaje contribuye a disminuir problemas asociados con la acumulación de residuos sólidos orgánicos, emisiones contaminantes y degradación ambiental (Battista et al., 2020; González-Moreno et al., 2020; Hanc et al., 2019; Makris, 2025). Además, la reutilización de residuos derivados del café para la producción de biofertilizantes representa una estrategia con potencial para fortalecer sistemas agrícolas sostenibles y reducir la dependencia de fertilizantes químicos convencionales (Lim et al., 2015; Ordoñez-Arévalo et al., 2018). No

obstante, gran parte de las investigaciones disponibles se desarrollan a escala laboratorio, existiendo todavía información limitada relacionada con viabilidad económica, escalamiento industrial y evaluación de largo plazo del impacto agronómico del vermicompostaje derivado de residuos cafetaleros (González-Moreno et al., 2020; Makris, 2025; Janissen & Huynh, 2018).

En conjunto, la evidencia científica disponible permite considerar al vermicompostaje con Eisenia fetida como una tecnología prometedora para el manejo sustentable de residuos agroindustriales derivados del café. Como perspectiva futura, resulta necesario desarrollar investigaciones multidisciplinarias bajo condiciones experimentales estandarizadas, incorporando análisis agronómicos, microbiológicos, ambientales y económicos que permitan fortalecer la viabilidad técnica y comercial de esta tecnología. Asimismo, será fundamental ampliar los estudios a escala piloto e industrial para evaluar el comportamiento del vermicompostaje en sistemas productivos reales y determinar su impacto sobre variables relacionadas con fertilidad del suelo, productividad agrícola, sostenibilidad ambiental y economía circular.

Literatura citada

Libros

Aranda, E. (1995). Coffee pulp vermicomposting treatment. En Coffee Biotechnology and Quality (pp. 393-398). Springer.

Domínguez, J. (2004). State-of-the-art and new perspectives on vermicomposting research. En C. A. Edwards (Ed.), Earthworm Ecology (pp. 401-424). CRC Press.

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. En C. A. Edwards, N. Q. Arancon, & R. Sherman (Eds.), Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management (pp. 27-40). CRC Press.

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (2011). Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management. CRC Press.

Rodriguez, J. M. L., & Palma, A. (2023). Valorización de posos de café: un enfoque de economía circular. En Actas de las V Jornadas Scien City 2022: Fomento de la Cultura

Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes (pp. 55-57). Universidad de Huelva.

Revistas

Adi, A. J., & Noor, Z. M. (2009). Waste recycling: Utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. Bioresource Technology, 100(2), 1027-1030. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.024

Aira, M., Monroy, F., & Domínguez, J. (2007). Eisenia fetida activates fungal and bacterial growth in pig manure. Process Biochemistry, 42(5), 763-770. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.11.013

Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Atiyeh, R., & Metzger, J. D. (2004). Effects of vermicomposts produced from food waste on the growth and yields of greenhouse peppers. Bioresource Technology, 93(2), 139-144. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.015

Atiyeh, R. M., Lee, S., Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Metzger, J. D. (2002). The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. Bioresource Technology, 84(1), 7-14. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00017

Awasthi, M. K., Pandey, A. K., Bundela, P. S., & Khan, J. (2015). Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. Bioresource Technology, 182, 200-207. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.104

Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2014). Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. Food and Bioprocess Technology, 7(12), 3493-3503. https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z

Battista, F., Zanzoni, S., Strazzera, G., Andreolli, M., & Bolzonella, D. (2020). The cascade biorefinery approach for the valorization of spent coffee grounds. Renewable Energy, 157, 1203-1211. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.113

Bedaiwy, M. N. A., Maksoud, Y. S. A., & Saad, A. F. (2019). Coffee grounds as a soil conditioner: Effects on physical and mechanical properties-II. Effects on mechanical properties. Polish Journal of Soil Science, 52(2), 277.

Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. Bioresource Technology, 100(22), 5444-5453.

Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. Trends in Food Science & Technology, 45(1), 24-36. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012

Cruz, R., Cardoso, M. M., Fernandes, L., Oliveira, M., Mendes, E., Baptista, P., Morais, S., & Casal, S. (2012). Espresso coffee residues: A valuable source of unextracted compounds. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 60(32), 7777-7784. https://doi.org/10.1021/jf3018854

Domínguez, J., Edwards, C. A., & Webster, M. (2000). Vermicomposting of sewage sludge: Effect of bulking materials on the growth and reproduction of the earthworm Eisenia fetida. Pedobiologia, 44(1), 24-32.

Gajalakshmi, S., & Abbasi, S. A. (2008). Solid waste management by composting: State of the art. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 38(5), 311-400.

González-Moreno, M. A., García Gracianteparaluceta, B., Marcelino Sádaba, S., Zaratiegui Urdin, J., Robles Domínguez, E., Pérez Ezcurdia, M. A., & Seco Meneses, A. (2020). Feasibility of vermicomposting of spent coffee grounds and silverskin from coffee industries: A laboratory study. Agronomy, 10(8), 1125. https://doi.org/10.3390/agronomy10081125

Gutiérrez-Miceli, F. A., Santiago-Borraz, J., Molina, J. A. E., Nafate, C. C., Abud-Archila, M., Llaven, M. A. O., Rincón-Rosales, R., & Dendooven, L. (2007). Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato. Bioresource Technology, 98(15), 2781-2786. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.032

Hanc, A., Chadimova, Z., & Vasak, F. (2019). Processing of spent coffee grounds by vermicomposting and composting techniques. Waste Management, 87, 626-631. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.031

Hanc, A., & Dreslova, M. (2021). Conversion of spent coffee grounds into vermicompost. Bioresource Technology, 341, 125827. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125827

Hanc, A., Tonika, J., & Tlustoš, P. (2021). Conversion of spent coffee grounds into vermicompost. Bioresource Technology, 341, 125877. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125877

Hernández, J., Suárez, J., & Pérez, A. (2011). Caracterización de pulpa de café y evaluación de su aptitud para compostaje. Agrociencia, 45(3), 345-357.

Hernández-Rodríguez, O. A., Morales-Corts, M. R., Gómez-Sánchez, M. Á., & Pérez-Sánchez, R. (2017). Use of coffee wastes as an organic amendment in agriculture. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 6(4), 281-292. https://doi.org/10.1007/s40093-017-0178-9

Hu, Y., et al. (2024). Spent coffee ground and its derivatives as soil amendments: A review. Agronomy, 15(1), 26. https://doi.org/10.3390/agronomy15010026

Ilangovan, M., Guna, V., Hu, C., Takemura, A., Leman, Z., & Reddy, N. (2019). Dehulled coffee husk-based biocomposites for green building materials. Journal of Thermoplastic Composite Materials.

Janissen, B., & Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. Resources, Conservation and Recycling, 128, 110-117.

Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2008). Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. Chemosphere, 72(7), 1013-1019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.016

Lim, S. L., Wu, T. Y., Lim, P. N., & Shak, K. P. Y. (2015). The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics. Journal of the Science of Food and Agriculture, 95(6), 1143-1156. https://doi.org/10.1002/jsfa.6849

Lim, S. L., Lee, L. H., & Wu, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. Journal of Cleaner Production, 111, 262-278. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083

Liu, K., Price, G. W., & Burton, D. L. (2011). Evaluation of three composting systems for the management of spent coffee grounds. Bioresource Technology, 102(17), 7966-7974. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.073

Makris, F. (2025). Vermicomposting spent coffee grounds with Eisenia fetida. Biology and Life Sciences Forum.

Manyuchi, M. M., Phiri, A., & Muredzi, P. (2013). Comparison of vermicompost and compost efficacy on tomato growth. International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2(12), 84-92.

Mendes, L. A., et al. (2024). Spent coffee grounds as a suitable alternative to standard soil substrates. Scientific Reports, 14, 4567. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54612-5

Molina, E., & Zuluaga, C. (2017). Caracterización fisicoquímica de subproductos del beneficio del café y su potencial uso agrícola. Revista Facultad Nacional de Agronomía, 70(2), 8141-8152.

Moussa, T., Maalouf, C., Ghanem, A., Bliard, C., Abbes, B., Badouard, C., Lachi, M., Bufalino, L., Bogard, F., & Polidori, G. (2024). Physicomechanical and hygrothermal characterization of a sugarcane waste / spent coffee grounds composite for buildings. Waste and Biomass Valorization, 15(9), 5431-5443. https://doi.org/10.1007/s12649-024-02537-w

Murthy, P. S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry byproducts and value addition — A review. Resources, Conservation and Recycling, 66, 45-58. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005

Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. Food and Bioprocess Technology, 4(5), 661-672.

Nogales, R., Cifuentes, C., & Benítez, E. (2005). Vermicomposting of winery wastes: A laboratory study. Environmental International, 31(5), 659-664. https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.10.009

Ordoñez-Arévalo, B., Guillén-Navarro, K., & Huerta, E. (2018). Enzymatic dynamics into the Eisenia fetida gut during vermicomposting of coffee husk and market waste in a tropical

environment. Environmental Science and Pollution Research, 25(2), 1576-1586. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0572-3

Orozco, F. H., Cegarra, J., Trujillo, L. M., & Roig, A. (1996). Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm Eisenia fetida: Effects on C and N contents and the availability of nutrients. Biology and Fertility of Soils, 22(3), 162-166. https://doi.org/10.1007/BF00384449

Pandey, A., Soccol, C. R., & Nigam, P. (2000). Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. Biochemical Engineering Journal, 6(2), 153-162.

Phrommarat, B., & Paopuree, P. (2024). Assessing the environmental performance of vermicompost from spent coffee grounds based on a life cycle approach. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 13(5), 1-10. https://doi.org/10.57647/ijrowa-tgma-wb03

Ramos-Suárez, J. L., Ritter, A., Mata-González, J., & Camacho-Pérez, A. (2021). Biotechnological applications of coffee waste: Recent advances and future perspectives. Environmental Technology & Innovation, 23, 101592. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101592

Raza, S. T., Bo, Z., Ali, Z., & Liang, T. J. (2019). Vermicomposting by Eisenia fetida is a sustainable and eco-friendly technology for better nutrient recovery and organic waste management in upland areas of China. Pakistan Journal of Zoology, 51(3), 1027-1034. https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2019.51.3.1027.1034

Rizzuto, Q., & Liliana, M. (2014). El mercado mundial del café: tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad. Visión Gerencial, (2), 291-307.

Sharma, K., Garg, V. K., & Gupta, R. (2021). Vermicomposting of organic wastes: A sustainable approach for waste management and nutrient recycling. Bioresource Technology Reports, 15, 100745. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100745

Singh, J., Kalamdhad, A. S., & Ali, M. (2020). Vermicomposting of organic wastes: A review on process, quality, and applications. Environmental Technology Reviews, 9(1), 63-78. https://doi.org/10.1080/21622515.2020.1730885

Sinha, R. K., Herat, S., Bharambe, G., & Brahambhatt, A. (2008). Vermistabilization of sewage sludge by earthworms. Bioresource Technology, 97(3), 391-395. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.051

Smolskii, E., et al. (2025). Effect of composting and vermicomposting on spent coffee grounds for agricultural use. Agronomy, 15(12), 2823. https://doi.org/10.3390/agronomy15122823

Suthar, S., & Singh, S. (2008). Vermicomposting of domestic waste by using two epigeic earthworms (Perionyx excavatus and Perionyx sansibaricus). International Journal of Environment and Waste Management, 2(1-2), 84-101.

Suthar, S. (2009). Vermistabilization of wastewater sludge from milk processing industry. Ecological Engineering, 35(7), 1021-1028. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.007

Sánchez, C., et al. (2019). Potencial agronómico del vermicompost obtenido a partir de subproductos agroindustriales del café. Revista Iberoamericana de Ciencias Ambientales, 10(4), 115-128.

Sánchez-Hernández, J. C., Ro, K. S., & Díaz-Raviña, M. (2017). Vermicompost derived from spent coffee grounds. Environmental Science and Pollution Research, 24, 13491-13500.

Telila, Z., Shifera, B., & Debela, T. (2025). Harnessing Eisenia fetida for the vermconversion of biodegradable wastes in Dambi Dollo town, Ethiopia. Scientific Reports, 15, 1-14. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28044-z

Trujillo-González, J. M., et al. (2024). A comprehensive review of composting from coffee waste. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture.

Urrego, W., & Godoy, M. (2021). Aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica. Prospectiva, 19(2).

Vardon, D. R., Moser, B. R., Zheng, W., Witkin, K., Evangelista, R. L., Strathmann, T. J., Rajagopalan, K., & Sharma, B. K. (2013). Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 1, 1286-1294. https://doi.org/10.1021/sc400145w

Wong, J. W. C., Mak, K. F., Chan, N. W., Lam, A., Fang, M., Zhou, L. X., Wu, Q. T., & Liao, X. D. (2001). Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. Bioresource Technology, 76(2), 99-106. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00103-6

Yadav, A., & Garg, V. K. (2011). Recycling of organic wastes by employing earthworms. Bioresource Technology, 102(3), 2874-2880. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.083

Zergaw, Y., Alemayehu, G., & Tadesse, A. (2023). Direct application of coffee pulp vermicompost produced by Eisenia fetida on hot pepper growth and soil properties. The Scientific World Journal, 2023. https://doi.org/10.1155/2023/8854821

Referencias electrónicas

Camacho Ramírez, J. (1997). Evaluación del proceso de descomposición de pulpa de café por la lombriz de tierra Eisenia fetida [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica]. Repositorio UNA, disponible en: http://hdl.handle.net/11056/20987 [Fecha de acceso: pendiente].

Flores Pincay, E. A. (2025). Producción de humus de lombriz roja californiana Eisenia foetida en diferentes sustratos y densidades de crianza [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador]. Repositorio UPSE [Fecha de acceso: pendiente].

Pennsylvania State College of Agricultural Sciences (2007). Delaware County Master Gardener Program, disponible en: [dirección electrónica pendiente] [Fecha de acceso: pendiente].

Rosas-Calleja, D., Ortiz-Laurel, H., Herrera-Corredor, J. A., & Leyva-Ovalle, O. R. (2016). Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencial de aplicación a suelos agrícolas [datos de la fuente incompletos en el original; verificar revista y páginas].

Siles Calvo, J. (1997). Producción de abono orgánico con pulpa de café mediante el lombricompostaje [Tesis de maestría, CATIE, Costa Rica]. Repositorio CATIE [Fecha de acceso: pendiente].

Sunset (2009). Add used coffee grounds to your garden soil and get amazing results. Soil and Plant Laboratory Inc., Bellevue, WA, disponible en: [dirección electrónica pendiente] [Fecha de acceso: pendiente].