



Revista Mexicana de Agroecosistemas

Oaxaca, Volumen XII, Número 3, 2025

Vol. 12 Núm. 3. Septiembre – Diciembre, 2025 ISSN: 2007-9559



Fotografía: Bosque de pino-encino,
San José de Pacífico, Oaxaca.



REVISTA MEXICANA DE AGROECOSISTEMAS, Vol. 12(3), 2025 es un órgano de difusión científica que se publica semestralmente desde 2014 y a partir de 2025 de manera cuatrimestral por el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca; publica resultados de investigaciones científicas originales e inéditas, con enfoque hacia la productividad agrícola, pecuaria, forestal, servicios ecosistémicos y de aprovechamiento y conservación de recursos naturales; también del área social ligada a ese enfoque. La revista está incluida en el listado del *Open Journal System (OJS)*, que incluye *DOI* por artículo (Cross Ref) y en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (*Latindex*).

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2023-041117195200-102 e ISSN 2007-9559, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor y vigentes al 2025.

Responsable de la última actualización de este número en la División de Estudios de Posgrado e Investigación: Dr. Gerardo Rodríguez-Ortiz, MC. Arely Concepción Ramírez Aragón, Dr. Marcos Emilio Rodríguez-Vásquez. Domicilio conocido, Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P. 71233, Tel y Fax. 01 (951) 5170788, <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>, rmae@voaxaca.tecnm.mx, rmae.itvo@gmail.com. Fecha de última modificación, 23 de diciembre de 2025.

Para su publicación, los artículos son sometidos a arbitraje, su contenido es de la exclusiva responsabilidad de los autores y no representa necesariamente el punto de vista de la Institución; las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del equipo editorial.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación, sin previa autorización del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca.

En esta edición se integran “**artículos científicos**” investigaciones originales que abordan problemáticas relevantes en los ámbitos acuícola, agrícola y forestal, con un enfoque en la evaluación de procesos biológicos, fisiológicos y productivos asociados a diferentes condiciones ambientales y de procedencia. Como “**nota técnica**” la evaluación del efecto de diferentes reguladores de crecimiento sobre la capacidad de enraizamiento y emisión de brotes de bugambilía. Finalmente, un “**artículo de revisión (review)**” enfocado en el conocimiento actual sobre *Neopestalotiopsis rosae* en cultivos de interés hortícola.



Comité Editorial (DEPI-ITVO)

Dr. Aarón Martínez Gutiérrez

Dr. Ernesto Castañeda Hidalgo

Dr. Gerardo Rodríguez-Ortiz

Dra. Gisela Margarita Santiago Martínez

Dra. Gisela Virginia Campos Angeles

Dr. Gustavo Omar Díaz Zorrilla

Dr. José Cruz Carrillo Rodríguez

Dr. José Raymundo Enríquez del Valle

M.C. Judith Ruiz Luna

Dr. Marcos Emilio Rodríguez Vásquez

Dra. María Isabel Pérez León

Dra. Martha Patricia Jerez Salas

Dr. Salvador Lozano Trejo

Dr. Vicente Arturo Velasco Velasco

Dr. Yuri Villegas Aparicio

Coordinación editorial

Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz

Diseño de portada y administración de página Web

MC. Arely Concepción Ramírez Aragón



Árbitros de este número

Dr. Daniel Martínez Santiago - Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande, Tlaxiaco, Oaxaca

Dr. Eric Guillermo Echeverría Pérez - Instituto Tecnológico del Valle de Etla, Oaxaca

Dr. Ericel Hernández García - Facultad de Ciencias químicas de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca

Dr. Felipe de Jesús Reynaga Franco - Instituto Tecnológico del Valle de Yaqui, Sonora

Dr. Francisco Castillo Reyes - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noreste (CIRNE)

Dr. Pablo Espinoza Zúñiga - Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, extensión Ixcatlán, Oaxaca

Dra. Susana Elizabeth Ramírez Sánchez - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Veracruz, Centro Altos de Jalisco



Política de revisión de manuscritos

Todos los manuscritos se reciben en español e inglés y se someten mediante la plataforma *OJS* de la revista (<https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>) con carta de originalidad firmada por el autor de correspondencia. Deben ser originales e inéditos, de alta calidad, acordes con las normas editoriales de RMAE y que no se hayan publicado o se vayan a publicar en otra revista.

Las contribuciones pasan a revisión del editor y estilo para el cumplimiento de las normas editoriales; se verifica nivel de plagio mediante Turnitin®, el cual no debe ser mayor a 20 % de coincidencias.

Todas las contribuciones se envían a arbitraje de “pares ciegos” de al menos dos especialistas del área de reconocido prestigio académico y de instituciones diferentes a la de los autores. Los árbitros revisan el documento en formato Word y hacen llenado del “formato de evaluación” (formato pdf), los cuales remiten al Comité Editorial. Cuando el manuscrito es aprobado por los árbitros y editor de RMAE, se envían al autor de correspondencia archivos Word revisados y formatos de evaluación, para que los autores realicen las correcciones pertinentes. El documento corregido por autores se remite al Comité Editorial, el cual extiende “carta de aceptación del manuscrito”.

Previo a la publicación, la RMAE envía al autor de correspondencia y en formato pdf, la “prueba de galeras” y la “carta cesión de derechos”, que debe ser revisada por si existen cambios menores.

ATENTAMENTE

Comité editorial



Contenido

Pág.

Artículo científico

I	Efecto de la procedencia de <i>Macrobrachium tenellum</i> (Decapoda: Palaemonidae) sobre su crecimiento, sobrevivencia y actividad digestiva / Effect of <i>Macrobrachium tenellum</i> (Decapoda: Palaemonidae) provenance on their growth, survival and digestive activity	Rodolfo Benigno De los Santos Romero ^{ID} , María Isabel Pérez-León ^{ID} , Judith Ruiz Luna ^{ID} , Marcelo García Guerrero ^{ID} , Damariz de la Cruz Cisneros ^{ID} , Nathali Martínez Salazar ^{ID}	153 - 165	
2	Evaluación de niveles de humedad aprovechable en el balance hídrico y fotosintético en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) / Evaluation of usable moisture levels in the water and photosynthetic balance in tomato (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Carlos Antonio Gómez-Zúñiga ^{ID} , Víctor Conde-Martínez ^{ID} , Carlos Trejo López ^{ID} , Sabina Velázquez-Márquez ^{ID}	166 - 175	
3	Calidad de semilla de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> de diferentes procedencias de México / Quality of <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> seeds from different provenances of México	Raúl Aarón Ramírez-García ^{ID} , Gisela Virginia Campos-Angeles ^{ID} , Javier López-Upton ^{ID} , Gerardo Rodríguez-Ortiz ^{ID} , Hermila Cruz-García ^{ID} , José Cruz Carrillo-Rodríguez ^{ID}	176 - 187	
4	Nota técnica	Optimización del enraizamiento y brotación en esquejes de <i>Bougainvillea glabra</i> Choisy con reguladores de crecimiento / Optimization of rooting and sprouting in <i>Bougainvillea glabra</i> Choisy cuttings using growth regulators	Aldo Daniel Chan-Arjona ^{ID} , Julio Cesar Ahuatzin-Hernández ^{ID} , René Garruña-Hernández ^{ID} , Roberto Rafael Ruiz-Santiago ^{ID}	188 - 197



Artículo de revisión

Diagnóstico y control de *Neopestalotiopsis rosae* Maharachch., KD Hyde & Crouses en cultivos hortícolas / Diagnosis and control of *Neopestalotiopsis rosae* Maharachch., KD Hyde & Crouses in horticultural crops

5

María Magdalena Cervantes-Zúñiga¹, Agustín Hernández-Juárez², Gabriel Gallegos-Morales¹, Juan Carlos Delgado Ortiz¹, Epifanio Castro-del Ángel¹

198 - 212



DIRECTORIO

Maestro Ramón Jiménez López- Director General, Tecnológico Nacional de México (TecNM)

Dr. Jesús Olayo Lortía- Responsable del Despacho de los Asuntos, Competencia de la Dirección de
Posgrado, Investigación e Innovación (TecNM)

Dra. Marisa Guadalupe Flores Aguilar- Directora (ITVO)

Dr. José Raymundo Enríquez del Valle - Subdirección Académica (ITVO), (jose.ev@voaxaca.tecnm.mx)
Editor Asociado Revista Institucional

Dr. Yuri Villegas Aparicio-Jefe de la DEPI-ITVO, (yuri.va@voaxaca.tecnm.mx)
Editor Asociado Revista Institucional

Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz (gerardo.ro@voaxaca.tecnm.mx)
Editor en jefe Revista Institucional DEPI-ITVO

MC. Arely Concepción Ramírez Aragón (arely.ra@voaxaca.tecnm.mx) - Coordinación de soporte Revista
Institucional DEPI-ITVO

Mayores informes:

Revista Mexicana de Agroecosistemas

Domicilio conocido

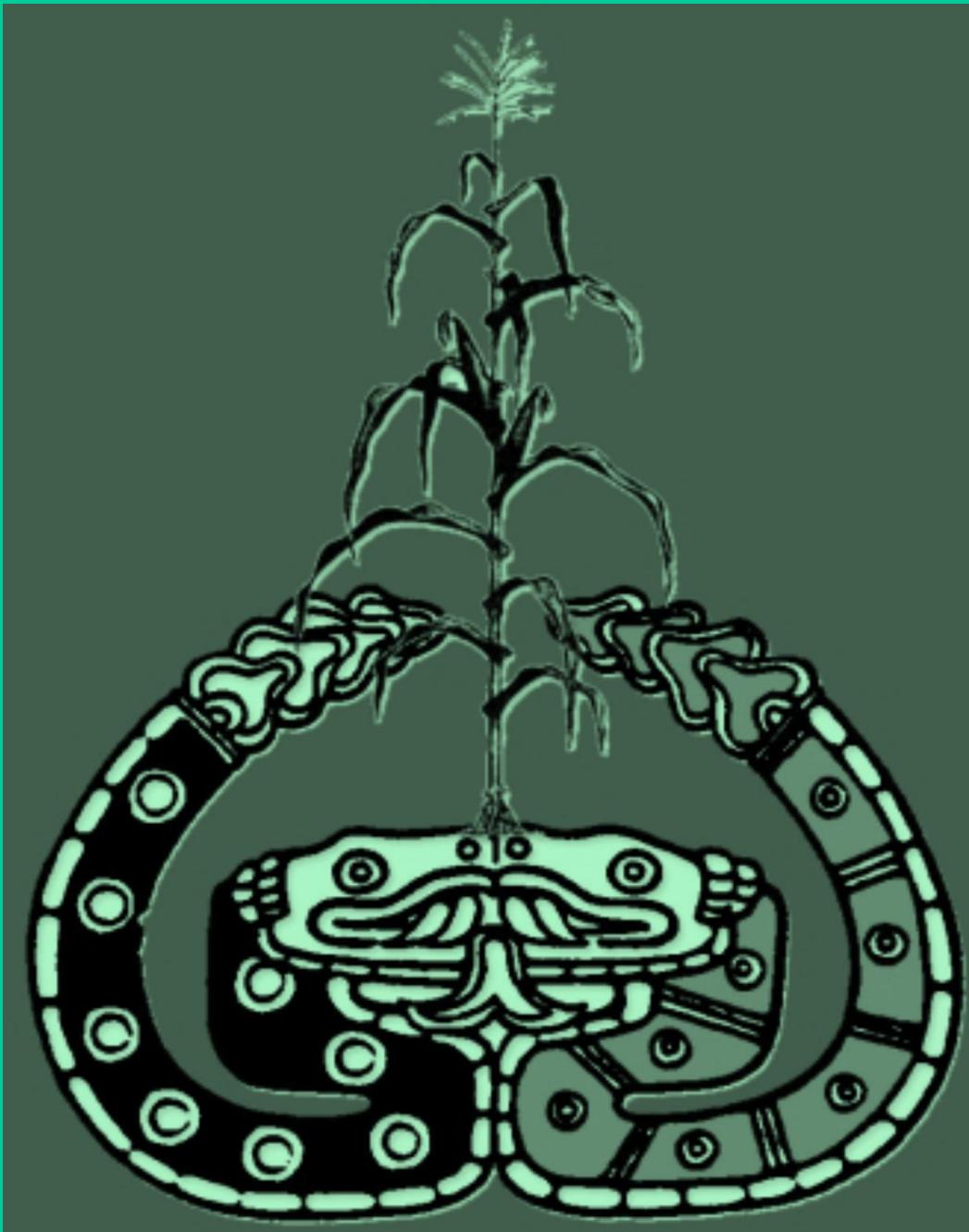
Ex-hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México

C. P. 71233

Tel. y Fax: 01(951) 5170788

Correo: rmae@voaxaca.tecnm.mx, rmae.itvo@gmail.com

<https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>



Efecto de la procedencia de *Macrobrachium tenellum* (Decapoda: Palaemonidae) sobre su crecimiento, sobrevivencia y actividad digestiva

Effect of *Macrobrachium tenellum* (Decapoda: Palaemonidae) provenance on their growth, survival and digestive activity

¹Rodolfo Benigno De los Santos Romero^{ID}, ¹María Isabel Pérez-León^{ID}, ¹Judith Ruiz Luna^{ID}, ²Marcelo García Guerrero^{ID}, ¹Damariz de la Cruz Cisneros^{ID}, ^{1§}Nathali Martínez Salazar^{ID}

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (Itvo). Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. ²Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (Ciidir), Unidad Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. [§]Autor de correspondencia: (nathali.ms@voaxaca.tecnm.mx).

Resumen

El langostino *Macrobrachium tenellum* (Smith 1871) es fuente de alimento para las comunidades costeras de México. En el Pacífico mexicano sus poblaciones se distribuyen en lagunas costeras, estuarios y ríos. Recientemente se ha generado información sobre propuestas alimenticias para el langostino *M. tenellum* en condiciones de cultivo, pero es necesario entender la maquinaria digestiva. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de las procedencias de colecta de juveniles de langostinos en parámetros productivos y actividad enzimática. Entre febrero y marzo del 2024 langostinos juveniles fueron recolectados en río, laguna y estuario de la cuenca de Colotepec. Se estableció un experimento bajo un diseño completamente aleatorizado con un arreglo factorial 3×3 , proporcionándoles tres dietas. Los parámetros fueron registrados cada 15 días durante dos meses y la actividad enzimática fue determinada mediante técnicas espectrofotométricas de microplaca. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza y prueba de medias de Tukey. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) sobre el crecimiento y sobrevivencia, siendo los organismos del río quienes presentaron los mayores valores. Las lipasas, tripsina y leucina aminopeptidasa presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en cuanto al origen de los organismos y el tiempo de cultivo.

Palabras clave: actividad digestiva, acuacultura, dietas, langostino.

Abstract

The prawn *Macrobrachium tenellum* (Smith 1871) is a food source for coastal communities in Mexico. In the Mexican Pacific its populations are distributed in coastal lagoons, estuaries and rivers. Recently, information has been generated on dietary proposals for the prawn *M. tenellum* under culture conditions, but it is necessary to understand the digestive machinery. The objective of this work was to evaluate the effect of juvenile shrimp collection origins on productive parameters and enzymatic activity. Between February and March 2024 juvenile prawns were collected in river, lagoon and estuary of the Colotepec basin. An experiment was established under a completely randomized design with a 3×3 factorial arrangement, providing them with three diets. The parameters were recorded every 15 days for two months and enzyme activity was determined by microplate spectrophotometric techniques. Data were analyzed by analysis of variance and Tukey's mean test. Significant differences ($p < 0.05$) were found for growth and survival, with the river organisms having the highest values. Lipases, trypsin and leucine aminopeptidase showed significant differences ($p < 0.05$) in terms of the origin of the organisms and culture time.

Index words: digestive activity, aquaculture, diets, prawn.

Introducción

La demanda de alimento ante el crecimiento de la población humana ha colocado a la acuacultura como una actividad productiva viable económica y socialmente. Sin embargo, se prefiere el cultivo de especies exóticas debido a sus características biológicas, provocando pocas opciones de cultivo para las poblaciones nativas (García-Guerrero et al., 2013). En la vertiente del Pacífico mexicano *Macrobrachium tenellum* es una especie de langostino de agua dulce que se distribuye en ríos, estuarios y lagunas costeras dependiendo de su ciclo de vida. Durante su migración entre tales ecosistemas experimenta una serie de adaptaciones a diferentes dietas, suplementos alimenticios y parámetros fisicoquímicos (Peña-Almaraz et al., 2024).

En la actualidad los langostinos tienen importancia alimenticia y económica para las comunidades donde se distribuyen, las cuales lo pescan para su consumo alimenticio, obtención de proteína a bajo costo e ingreso económico, tales actividades locales no son reguladas, además la pérdida de su hábitat genera una disminución en sus poblaciones (García-Guerrero et al., 2013). Una opción para revertir este problema es el cultivo en cautiverio para la producción y comercialización, así como la reintroducción de organismos a sus ambientes de origen para su futura pesquería. El problema para lograr lo anterior radica en el poco conocimiento que se tiene acerca de la reproducción y sobre todo de la alimentación de *M. tenellum* (De los Santos-Romero et al., 2021), lo que dificulta alcanzar dietas adecuadas para su cultivo y para prepararlos para su reincorporación al medio silvestre.

Los camarones de agua dulce son carnívoros, omnívoros y carroñeros (Linton et al., 2014). De acuerdo a De los Santos-Romero et al. (2020) estos organismos pueden ajustar su batería enzimática, esto les permite aprovechar los diferentes componentes alimenticios que

encuentra en la naturaleza. El conocimiento de estos cambios fisiológicos y la adaptación a diferentes componentes de alimento permitiría formular dietas que se acerquen a sus necesidades fisiológicas para poder llevarlo a cultivo. La composición de la dieta y su palatabilidad influyen directamente en la capacidad de los langostinos para aprovechar los nutrientes (Amaya et al., 2007; Méndez-Martínez et al., 2022).

Lima et al. (2014) mencionan que la actividad digestiva de los langostinos es determinada por su dieta más que por su filogenia, al existir una relación entre la dieta y la digestibilidad, indicando que las especies carnívoras presentan mayor cantidad de proteasas y las omnívoras muestran mayor nivel de amilasas. Las investigaciones realizadas en organismos cultivados y con organismos extraídos de su medio silvestre, sugieren que la migración de un sistema acuático natural a uno en cautiverio provoca cambios en la actividad digestiva, lo que influye en su sobrevivencia y crecimiento (Badillo-Zapata et al., 2023). Manríquez-Santos et al. (2018) y Fernández-Giménez et al. (2013) mencionan que la actividad de glándulas y enzimas ha sido estudiada por su importancia como auxiliares en la transformación del alimento para lograr mejores tasas de crecimiento y disminuir costos de alimentación durante el cultivo de langostinos de importancia acuícola.

La mayoría de estudios enfocados a determinar la actividad de enzimas digestivas se realizan con organismos en condiciones de laboratorio, controlando, estrategias de alimentación, ritmos circadianos, fotoperiodos y alimentos disponibles (Espinosa-Chaurand et al., 2017). Pero no se tiene claro que sucede con organismos procedentes de medios silvestres o más aún, con organismos alimentados en cautiverio y que tienen como propósito ser reincorporados a su hábitat natural. Por lo cual se han realizado estudios que presentan la actividad enzimática de algunos crustáceos en su medio silvestre (Gutiérrez-Méndez et al., 2024; Hernández-Hernández et al., 2024), presentando diferencias en sus resultados en relación a la

actividad de las enzimas según los alimentos disponibles.

De los Santos-Romero et al. (2022) indican que la actividad digestiva en langostinos provenientes de diferentes hábitats proporciona información para comprender sus capacidades alimenticias, esto ayuda a proponer dietas formuladas acordes con sus requerimientos nutricionales. Lo anterior es de suma importancia en la acuacultura debido a que más del 50 % de los costos de producción son destinados a la alimentación, de ahí la importancia de la formulación de dietas nutritivas a bajo costo. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la procedencia de *M. tenellum* (río, estuario y laguna) sobre su sobrevivencia, crecimiento y actividad digestiva a partir de tres dietas relacionadas con su ambiente de recolecta.

Materiales y métodos

Colecta

La colecta de *M. tenellum* se realizó en tres ecosistemas acuáticos de la cuenca del Río Colotepec (Oaxaca, México): laguna costera de los Naranjos ($15^{\circ}48'19.41''N$; $97^{\circ}00'3.94''O$), río de Colotepec ($15^{\circ}50'5.10''N$; $97^{\circ}01'38.15''O$) y estuario ($15^{\circ}48'44.04''N$; $97^{\circ}01'32.06''O$). Entre febrero y marzo del 2024 se colectaron aproximadamente 200 juveniles de *M. tenellum* con un peso medio de 0.2 g. Diez ejemplares de cada ambiente fueron separados y congelados a -70 °C en un contenedor con nitrógeno líquido hasta su análisis de actividad enzimática. El resto se mantuvieron vivos y se transportaron al área de cultivo en contenedores de 200 L con suministro continuo de oxígeno mediante una bomba de aire (Elite 802).

Aclimatación

En el laboratorio los langostinos fueron recibidos y separados por ambiente de procedencia en tres tanques de 200 L de agua dulce con oxigenación constante y una temperatura de 27 °C. Fueron alimentados una vez al día con pellets para camarón (camaronina 45 % proteína).

Transcurridos 15 días se tomaron cinco ejemplares de cada tanque, se colocaron en un tubo Falcon (15 mL) y se ultracongelaron a -80 °C hasta su posterior análisis de actividad enzimática.

Elaboración de dietas

Se prepararon tres dietas para alimentar a los langostinos de cada uno de los ambientes de procedencia: la dieta uno (DI) y dieta tres (D3) harina de maíz (Maseca, Gruma, Nuevo León, México), harina de soya (Campo fresco, Irapuato, México), harina de *Azolla* sp. (Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, [Itvo, 2025]) y como fuente proteica principal para DI harina de pescado (Poeciliidae) y para D3 alga espirulina liofilizada (tree essentials, GNC, Pensilvania Estados Unidos). Todos los ingredientes se homogenizaron (mezclador Oster 2353-I3) y tamizaron a 800 micrómetros (tamiz JMR No. 20 acero inoxidable), la mezcla se peletizó a un tamaño de 1 mm (peletizador manual de banco Romel mod 4025) agregando agua purificada al 2 % para integrar la mezcla, el pellet se deshidrató en secadores de aire ascendente, se almacenó en contenedores de vidrio y se conservó a 4 °C. La dieta dos (D2) fue alimento comercial para camarón (camaronina Purina). Cada 15 días se prepararon 50 g de alimento de la DI y D3 para evitar su oxidación.

Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental completamente aleatorio (DCA) con un arreglo factorial 3×3. Los factores del arreglo fueron el ambiente de procedencia con tres niveles (río, estuario y laguna) y la dieta también con tres niveles (alimento comercial “camaronina”, alimento con harina de pescado y alimento con espirulina). A partir del arreglo se establecieron nueve tratamientos: RD1 (río/harina de pescado), RD2 (río/camaronina), RD3 (río/espirulina), LD1 (laguna/harina de pescado), LD2 (laguna/camaronina), LD3 (laguna/espirulina), ED1 (estuario/harina de pescado), ED2 (estuario/camaronina), ED3 (estuario/espirulina). Se establecieron tres réplicas por cada tratamiento,

teniendo un total de 27 unidades experimentales. Cada unidad constó de un tanque rectangular de 50 L con 15 langostinos cada una, la oxigenación se mantuvo a saturación (bomba Elite 802), el fotoperiodo a un intervalo 12:12, la temperatura se mantuvo a 27 °C (calentador Aquakrill 4154) y el recambio de agua (50 %) se realizó dos veces a la semana. Se suministró alimento una vez al día (10 % de biomasa) a las 14:00 h durante un periodo de 60 días. Al día 1 y 30 del experimento se retiraron tres organismos de cada unidad experimental y en el día 60 todos los organismos fueron retirados; en todos los casos se realizó la biometría a los organismos, se registró la sobrevivencia y se sacrificaron por choque térmico gradual, inmediatamente fueron congelados a -80 °C hasta su análisis enzimático. El conjunto de langostinos congelados directamente del medio silvestre se consideró como colecta y los organismos congelados el día uno se les consideró como siembra.

Actividad enzimática

Las muestras congeladas se mantuvieron en nitrógeno líquido, posteriormente todos los organismos fueron pesados (balanza Ohaus 0.0001 g), se les retiró el exoesqueleto realizando un corte longitudinal para disecar el hepatopáncreas y los intestinos. Las muestras digestivas se pesaron, se agregó agua bidestilada (peso-volumen 1:10) y se homogeneizaron durante 2 minutos (homogeneizador Ultra Turrax IKA T18). El homogeneizado se centrifugó durante 15 minutos a 14.000 rpm a 4 °C. Luego, se prepararon alícuotas de 200 µL y se mantuvieron a -80 °C hasta el análisis.

La cantidad de proteína soluble se analizó mediante el método de Bradford (1976) con albúmina de suero bovino como estándar. Para la actividad de proteasas alcalinas totales, se usó caseína al 0.5 % en tampón Tris HCl 100 mM + CaCl₂ 10 mM a pH 9 como sustrato. La actividad de la tripsina se midió usando BAPNA (N-succinil-Ala-Pro-Phe p-nitroanilida) como sustrato en Tris-HCl 100 mM, CaCl₂ 10 mM, a

pH 8, según Erlanger et al. (1961). La leucina aminopeptidasa se determinó con el método de Maraux et al. (1973) usando p-nitroanilida de L-leucina 1 mM como sustrato en fosfato de sodio 50 mM, pH 7.2. La actividad de la lipasa se cuantificó usando acetato de 2-naftilo (200 mM) como sustrato en Tris-HCl 50 mM, pH 7.2 y taurocolato de sodio (100 mM) según el método de Versaw et al. (1989).

La actividad enzimática total U (mg mL⁻¹) se calculó mediante la ecuación I:

$$U = \frac{\Delta_{abs} \cdot V_t}{CEM \cdot t \cdot V_{ext} \cdot d} \quad \text{Eq. I}$$

Donde: Δabs = absorbancia; V_t = volumen total de la reacción (µL); V_{ext} = volumen del extracto de enzima utilizado (µL); CEM = coeficiente de extinción molar; t = tiempo de incubación en minutos; d = dilución utilizada. La actividad específica (U mg⁻¹ de proteína) se calculó dividiendo la actividad total (U µL⁻¹) por los mg de proteína soluble en el extracto enzimático.

Análisis estadísticos

Para verificar la distribución normal en los datos se realizó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0.05$). Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) de dos vías mediante el Modelo Lineal General (GLM) para determinar el efecto de cada uno de los factores sobre el crecimiento, sobrevivencia y actividad enzimática de *M. tenellum*. Se aplicaron análisis de medias Tukey ($\alpha = 0.05$) para diferenciar tratamientos.

Se utilizó la prueba de análisis de permutación PERMANOVA para estimar la respuesta simultánea de las dos variables. Y el análisis de correspondencia para establecer la relación de dependencia entre las variables del factor ambiente de procedencias y la respuesta enzimática de *M. tenellum*.

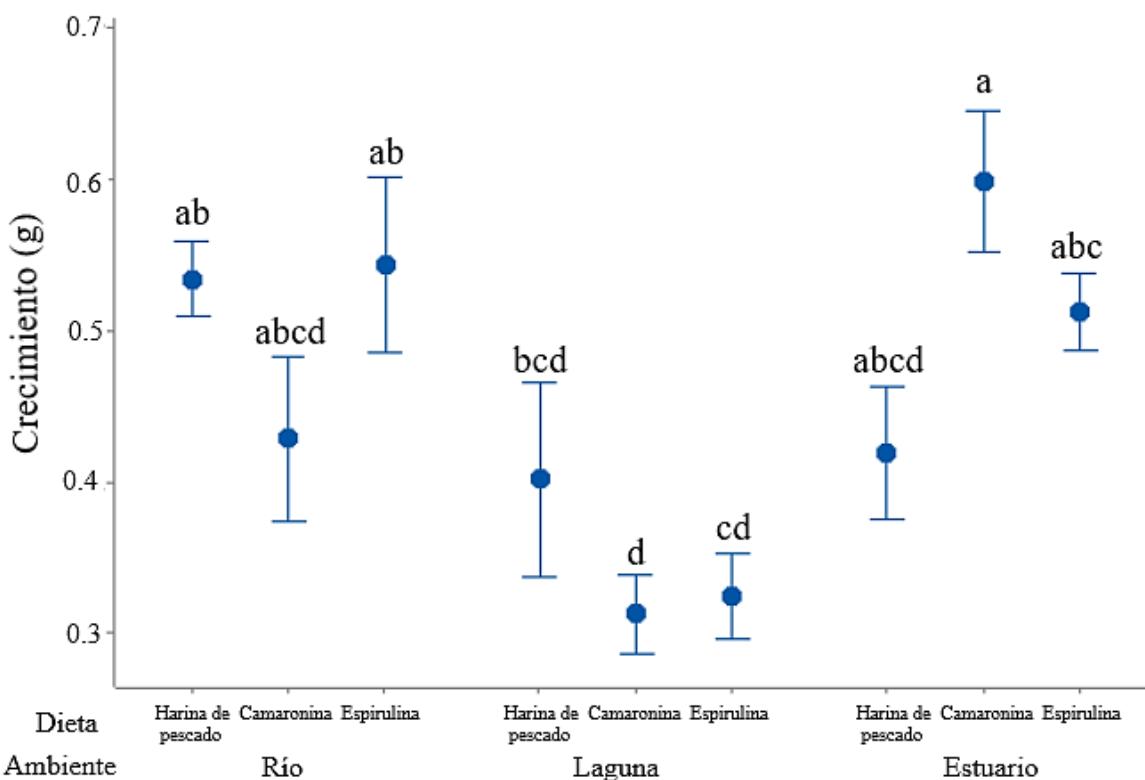


Figura I. Peso promedio de *Macrobrachium tenellum* procedentes de diferentes ambientes, cultivados en el laboratorio y alimentados con diferentes dietas. Letras diferentes en los valores medios representan diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$)

Resultados

En el presente trabajo, se observó que los langostinos provenientes del río y del estuario independientemente de la dieta empleada durante su cultivo, mostraron un mayor crecimiento en peso ($p = 0.0001$), en cuanto al efecto combinado del ambiente de procedencia y dieta empleada en su cultivo (Fig.I). En la Tabla I se observaron diferencias en el crecimiento en peso principalmente cuando se vinculan con el ambiente río y estuario ($p = 0.0001$).

Los organismos provenientes del estuario y río presentaron los mejores porcentajes de sobrevivencia (62.2 % y 61.4 % respectivamente), mientras que los organismos alimentados con una dieta a base de espirulina presentaron la mayor sobrevivencia con un 71.8 %, la menor sobrevivencia (45.9 %) se dio con langostinos

alimentados con camaronina. En la Figura 2 se observa en un análisis combinado, que los organismos alimentados con una dieta a base de espirulina y procedentes del río y estuario son los tratamientos con las mayores sobrevivencias ($p = 0.001$).

El efecto combinado del ambiente de procedencia y la dieta de cultivo sobre la actividad enzimática se presenta en la Tabla I, donde el efecto dieta y el efecto interacción presentaron diferencias significativas (Permanova, $p = 0.001$). La Figura 3 muestra el efecto interacción de la actividad de tripsina, leucina aminopeptidasas y lipasas, se observa para las tres enzimas mayor actividad en los langostinos provenientes del ambiente río y alimentados durante su cultivo con dieta a base de harina de pescado y dieta a base de espirulina.

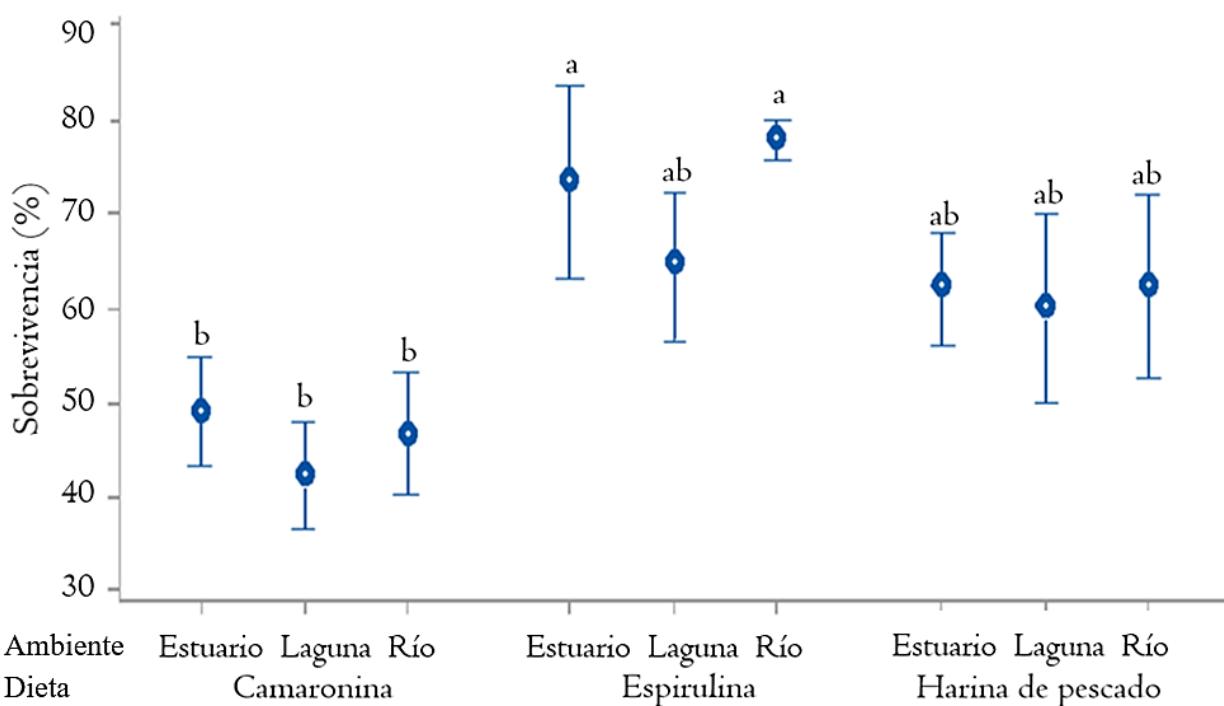


Figura 2. Sobrevida promedio de *Macrobrachium tenellum* procedentes de diferentes ambientes y alimentados con diferentes dietas durante su cultivo. Letras diferentes en los valores medios representan diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Tabla I. Análisis PERMANOVA dos vías, efecto combinado sobre la actividad enzimática de *Macrobrachium tenellum* colectados en diferentes hábitats y cultivados con tres dietas experimentales.

Fuente	SC	GL	CM	p
Ambiente (A)	7006.7	2	3503.3	0.6715
Dieta (D)	1.8891×10^5	4	47227.0	0.0005
A×D	7.7913×10^5	8	97391.0	0.0001
Total	1.6097×10^6	89		

Permutaciones N: 9999, SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrados medios; p = probabilidad.

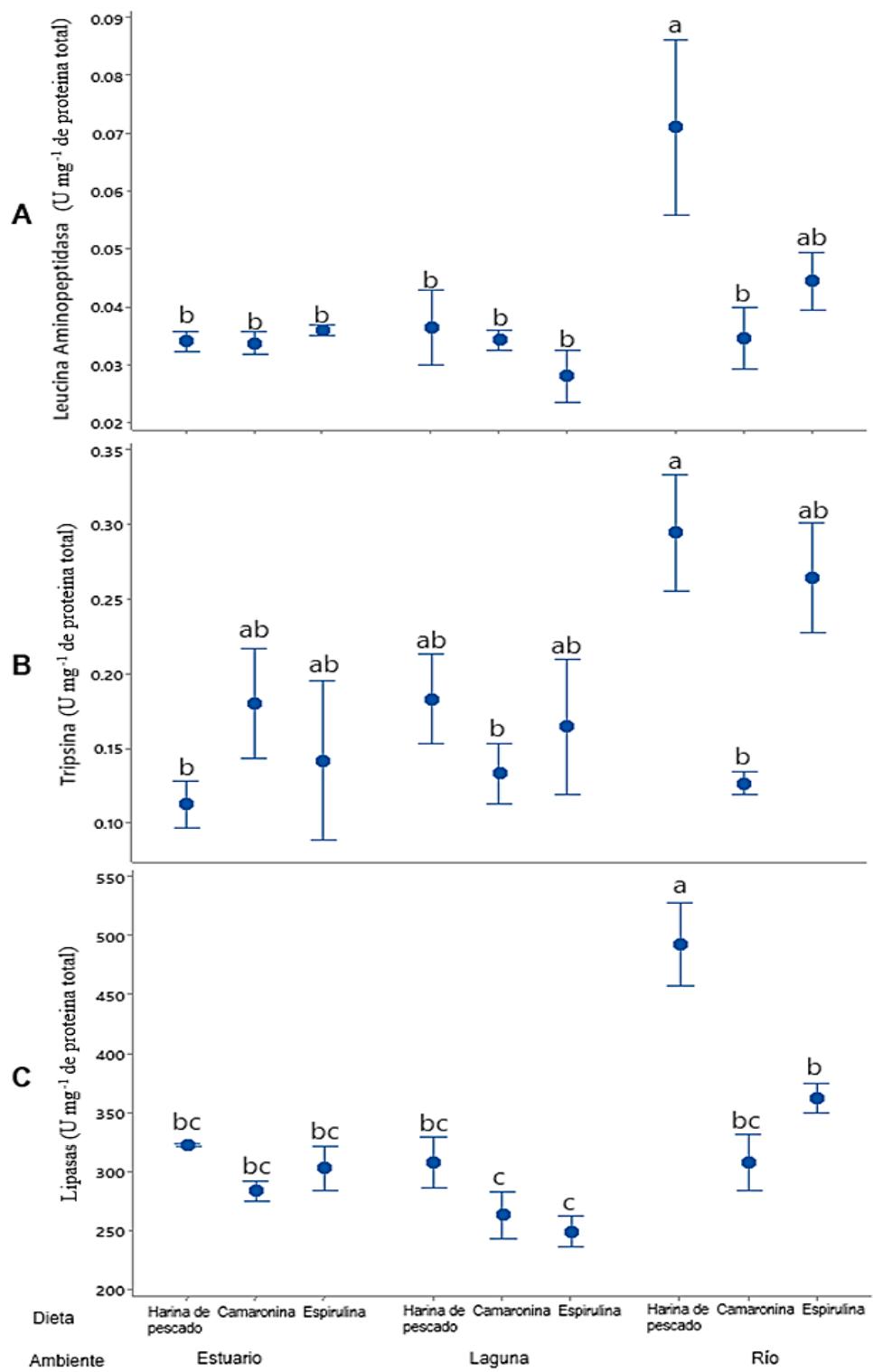


Figura 3. Efecto de la interacción ambiente de procedencia y dieta de cultivo en la actividad de las enzimas digestivas: (A) tripsina, (B) leucina aminopeptidasa y (C) lipasas. Letras diferentes en los valores medios representan diferencias estadísticas (*Tukey*, $\alpha \leq 0.05$).

Discusión

La validación de dietas dentro de un cultivo es necesario para establecer si las necesidades nutricionales de los crustáceos han sido cubiertas, por lo que comparar las variaciones en la actividad enzimática digestiva de los organismos en condiciones silvestres en contraste con aquellos que son sometidos a un cultivo permite reconocer la aceptación de un alimento (Pérez-Chabola et al., 2020; Méndez-Martínez et al., 2022). Lima et al. (2014), Stumpf et al. (2020) y De los Santos-Romero et al. (2022) establecen que en los langostinos dulceacuícolas del género *Macrobrachium*, dicha actividad depende principalmente de la dieta que tienen en su medio silvestre.

Reconocer una dieta que permita establecer una relación entre el crecimiento y actividad enzimática de los langostinos silvestres es necesaria para determinar los hábitos y necesidades alimenticias para estos organismos que tienen potencial para su cultivo; De Los Santos-Romero et al. (2020) analizaron langostinos silvestres (*M. tenellum*) de tres hábitats costeros diferentes estableciendo que los organismos con más edad presentaron las diferencias más significativas en cuanto al crecimiento y actividad enzimática, estos sugiere que, los langostinos tienen diferentes hábitos alimentarios conforme crecen, quizás debido a la habilidad para capturar alimentos con distinta composición nutricional.

Los langostinos con mayor sobrevivencia fueron los alimentados con la dieta de espirulina con un 78.1 %. Cortés-Jacinto et al. (2003) y Espinosa-Chaurand et al. (2019) indican que los mejores rendimientos de supervivencia, crecimiento y biomasa se dan en langostinos juveniles alimentados con dietas contenido el 40 % de proteína cruda. Las dietas suministradas contenían el 35 % de proteína, lo que hace suponer, que en organismos juveniles las enzimas degradadoras de proteínas tienen grandes niveles de secreción.

La espirulina contiene proteína vegetal, celulosa y lípidos lo que favorece la sobrevivencia y

crecimiento de los organismos en cautiverio (Rahim et al., 2021) los langostinos del río y del estuario tienen mayor acceso a proteínas vegetales que a proteínas animales, favoreciendo la aceptación de la dieta a base de espirulina. Los resultados del presente trabajo concuerdan con Rahim et al. (2021) quienes reportan mejores tasas de longitud, alimentación, peso, y tasas metabólicas en poslarvas de *M. rosenbergii* alimentadas con una dieta de *Chlorella vulgaris* la cual contenía 50 % de *C. vulgaris* y 50 % de harina de pescado. La posibilidad de sustituir la harina de pescado con una harina vegetal como la espirulina permite mejorar la eficiencia de los recursos económicos para la acuacultura comercial y de repoblamiento.

Los langostinos provenientes del río y el estuario, presentaron mayor crecimiento al ser alimentados con dietas a base de harina de pescado y espirulina. Los resultados concuerdan con Mustafa et al. (1995) quienes concluyen, que el aumento de algas en la dieta como la espirulina contribuye a un aumento en la asimilación de proteínas y la utilización de alimentos.

De los Santos-Romero et al. (2020) establecieron el comportamiento enzimático de *M. tenellum* en condiciones silvestres y cautiverio para tres ecosistemas acuáticos. Sus resultados indican que los langostinos cultivados mostraron menor actividad enzimática que los silvestres. Contrario a los presentes resultados en donde la actividad enzimática de los langostinos cultivados presentó una resiliencia significativa con el paso del tiempo. Al día 60 de cultivo los U mg⁻¹ de tripsina, lipasas y leucina aminopeptidasa presentan diferencias significativas en relación a la actividad presentada durante la colecta y la siembra. El tiempo de cultivo del experimento fue de 60, días mayor a lo presentado por De los Santos-Romero et al. (2022) con un periodo de 30 días, lo que evidencia, que la intensidad de la actividad enzimática incrementa (se recupera) significativamente ($p < 0.05$) en función del tiempo.

Los langostinos ajustan su maquinaria enzimática a diferentes tipos de alimentos y bajo

diferentes requisitos (De los Santos-Romero et al., 2020), como estrategia para la obtención de energía y ahorro de la misma. La actividad enzimática con relación al tipo de alimento suministrado muestra que la acción de las proteasas es una compensación al tipo y calidad de la dieta (Alexandre et al., 2014).

En condiciones de cultivo, a mayor actividad de tripsinógenos mayor es la presencia de U mg⁻¹ de leucina aminopeptidasa y lipasas. La actividad enzimática de los langostinos de río alimentados con harina de pescado y espirulina presentaron diferencias significativas con respecto a los langostinos de laguna y estuario. Los resultados de este estudio sugieren que los langostinos de río presentan mayor eficiencia en la digestión del alimento, posiblemente causado por la similitud en la digestibilidad de la proteína animal y vegetal utilizados en las dietas propuestas, similar a la que encuentra en su medio silvestre.

Alexandre et al. (2014) mencionan en relación a las proteínas de origen animal, que la variación en la actividad de las proteasas posiblemente son respuesta la calidad y cantidad de insumos proteicos utilizados. Las proteínas en la dieta pueden estimular el incremento o decremento en la actividad de las unidades enzimáticas producidas en la glándula digestiva (Rojo-Arreola et al., 2019). Desde los trabajos de Cortés-Jacinto et al. (2003) se ha reconocido la importancia de determinar la capacidad de digestión de proteínas de diferentes ingredientes que son utilizados en la alimentación de crustáceos omnívoros para lograr el equilibrio de la dieta, tal es el caso de *M. tenellum*.

Lancia et al. (2012) sugieren que el consumo de diferentes dietas requiere de un proceso digestivo diferente. Sin embargo, la actividad enzimática no solo se relaciona con los alimentos disponibles sino también a la capacidad de satisfacer las necesidades nutricionales del organismo mediante la digestión de los componentes de la dieta y asimilación de los nutrientes (Ceballos et al., 2006; Musin et al., 2018). Se observó que la adaptación a la dieta los langostinos asimilan mejor los componentes

alimenticios, lo cual favorece la sobrevivencia y el crecimiento de los organismos.

La relación entre la dieta ingerida y el hábitat de origen también provocó diferencias significativas en el presente trabajo, el crecimiento y la sobrevivencia presentaron relación con el régimen alimentario (Vargas-Ceballos et al., 2020). No obstante, Manríquez-Santos et al. (2018) y Vargas-Ceballos et al. (2024), es fundamental comprender que son muchos los factores que influyen en la supervivencia, y el crecimiento, y no solo la dieta.

Los trabajos concernientes a establecer el papel de la fisiología digestiva son importantes para reconocer las necesidades de alimentación en un organismo (Hernández-Hernández et al., 2024) y sobre todo su respuesta digestiva (Da Silva et al., 2016; De los Santos-Romero et al., 2021; Badillo-Zapata et al., 2023) de los langostinos, así como de otros crustáceos. Coinciendo con Cortés-Jacinto et al. (2004), la formulación de la dieta debe incluir los mejores ingredientes digestibles. La identificación y caracterización de la actividad enzimática digestiva a diferentes regímenes alimentarios y de cultivo, ayuda a comprender los procesos digestivos y es una herramienta útil para formular dietas equilibradas.

Conclusiones

Los langostinos provenientes del río y del estuario son la mejor opción para llevar a cultivo porque asimilan mejor las dietas y presentan mayor sobrevivencia comparados con los langostinos de laguna. La dieta a base de espirulina dio mejores resultados que la de harina de pescado y camaronina. Esto es bueno debido a que la alimentación a base de harinas vegetales generaría menos costos de producción en el cultivo acuícola. Con respecto a la actividad enzimática, aunque disminuye en los primeros treinta días vuelve a remontar superando las expresiones iniciales. Esto confirma que los langostinos pueden adaptar su batería enzimática para asimilar mejor los nutrientes de las dietas proporcionadas. Se necesitan más estudios que permitan comprender

los mecanismos que afectan que los langostinos en cultivo, crezcan mejor con una dieta que con otra y lo que sucedería si se mantienen más tiempo en cultivo.

Agradecimientos

NMS agradece el apoyo de la SECIHTI (antes CONAHCyT) por el apoyo posdoctoral para realizar el presente proyecto. RBSR, JRL y MIPL agradecen al TecNM por el financiamiento al proyecto número 19888.24-P. RBSR agradece al TecNM por el apoyo de año sabático para elaborar el presente artículo. MGG agradece al IPN.

Referencias

- Alexandre, D., Ozorio, R.A., Derner, R.B., Fracalossi, D.M., Oliveira, G.B., Samuels R.I. & Silva, C.P. (2014). Spatial distribution of digestive proteinases in the midgut of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) indicates the existence of endoectoperitrophic circulation in Crustacea. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 172, 90–95. [10.1016/j.cbpb.2014.04.010](https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2014.04.010)
- Amaya, E., Davis, A. & Rouse D. (2007). Replacement of fish meal in practical diets for the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) reared under pond conditions. *Aquaculture*, 262, 393-401. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.015>
- Badillo-Zapata, D., Vega-Villasante, F., Nolasco-Soria, H., López-Acuña, L., Vargas-Ceballos, M., & Barreto-Curiel, F. (2023). Replacement of fishmeal by hydrolyzed feather meal in diets of juvenile *Macrobrachium tenellum* (river prawns) and its effect on muscle fatty acids. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 51(5), 703-716. <http://dx.doi.org/10.3856/vol51-issue5-fulltext-3030>
- Bradford, M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72: 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Ceballos, J.B., Hernández-Llamas, A., García-Galano, T. & Villarreal, H. (2006). Substitution of *Chaetoceros muelleri* by *Spirulina platensis* meal in diets for *Litopenaeus schmitti* larvae. *Aquaculture*, 260, 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.002>
- Cortés-Jacinto, E., Villarreal, H., Civera-Cerecedo, R. & Martínez-Córdova, R. (2003). Effect of dietary protein level on growth and survival of juvenile freshwater crayfish *Cherax quadricarinatus* (Decapoda: Parastacidae). *Aquaculture Nutrition*, 9, 207–213. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2003.00241.x>
- Cortés-Jacinto, E., Villarreal, H., Civera-Cerecedo, R. & Naranjo, J. (2004). Effect of dietary protein level on the growth and survival of pre-adult freshwater crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens) in monosex culture. *Aquaculture Research*, 35, 71–79. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.00988.x>
- Da Silva Santos, F.M., Ribeiro, K., Freitas, V., Carvalho, L.B., Valenti, W.C. y de Souza Bezerra, R. (2016). Digestive proteases from wild and farmed male morphotypes of the Amazon River prawn (*Macrobrachium amazonicum*). *Journal of Crustacean Biology*, 34, 189–198. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002215>
- De los Santos-Romero, R.B., Peña, E., Álvarez-González, C.A., Cruz-Ramírez, F., López-Vásquez, J. & García-Guerrero, M. (2020). Differences in enzymatic activity in wild long-arm river prawns, *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871) (Decapoda: Caridea: Palaemonidae), from different habitats. *Journal of Crustacean Biology*, 40, 455–461. <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruaa035>
- De los Santos-Romero, R. B., Vega-Villasante, F., Cortés-Jacinto, E. & García-Guerrero, M.

- (2021). The culture potential and management problems of freshwater prawns (*Macrobrachium americanum* and *Macrobrachium tenellum*) in their native areas: the case for Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 49(3), 376-390. <https://dx.doi.org/10.3856/vol49-issue3-fulltext-2625>
- De los Santos-Romero, R. B., Álvarez-González, C.A., Peña, E., Cortés J. E., Hernández, L.H. & García-Guerrero, M. (2022). Variations of digestive enzymatic activity of the longarm river prawn, *Macrobrachium tenellum* (Smith 1871) adapted from the wild to culture with prepared meals. *Journal of the World Aquaculture Society*, 53, 681-692. <https://doi.org/10.1111/jwas.12847>
- Erlanger, B., Kokowsky, N. & Cohen, W. (1961). The preparation and properties of two new chromogenic substrates of trypsin. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 95, 271-278. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(61\)90145-X](https://doi.org/10.1016/0003-9861(61)90145-X)
- Espinosa-Chaurand, L.D., Vega-Villasante, F., Carrillo-Farnés, O. & Nolasco-Soria, H. (2017). Effect of circadian rhythm, photoperiod, and molt cycle on digestive enzymatic activity of *Macrobrachium tenellum* juveniles. *Aquaculture*, 479, 225-232.
- Espinosa-Chaurand, L.D., Carrillo-Farnés, O., Vega-Villasante, F. & Nolasco-Soria, H. (2019). Effect of protein level in diet and feeding schedule on the digestive enzymatic activity of *Macrobrachium tenellum* juveniles. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47, 743-752. <http://dx.doi.org/10.3856/vol47-issue5-fulltext-3>
- Fernández-Giménez, A. (2013). Digestive physiology of three species of decapod crustaceans of Argentina. *Journal of Shellfish Research*, 32(3), 767-777. <https://doi.org/10.2983/035.032.0320>
- García-Guerrero, M., Becerril-Morales, F., Vega-Villasante, F. & Espinosa-Chaurand, L.D. (2013). Los langostinos del género *Macrobrachium* con importancia económica y pesquera en América Latina: conocimiento actual, rol ecológico y conservación. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41, 651-675. <http://dx.doi.org/10.3856/vol41-issue4-fulltext-3>
- Gutiérrez-Méndez, I., Rodríguez-Magadan, H., Martínez-Salazar, N., García-Guerrero, M. & De los Santos-Romero, R. (2024). Populational differences in freshwater prawn *Macrobrachium tenellum* Smith (Decapoda: Palaemonidae) from three river basins of Oaxaca, Mexico, determined with microsatellite markers. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 52(4), 595-604. <https://dx.doi.org/10.3856/vol52-issue4-fulltext-3182>
- Hernández-Hernández, L. H., Powell, M. S., Frías-Gómez, S. A., Cortés-Jacinto, E. & Vega-Villasante, F. (2024). Scientific knowledge of the cinnamon river prawn *Macrobrachium acanthurus* and future perspectives for aquaculture. *Aquaculture International*, 32, 10215-10230. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01658-2>
- Lancia, J.A., Fernández-Giménez, C., Bas, C. & Spivak, E. (2012). Adaptive differences in digestive enzyme activity in the crab *Neohelice granulata* in relation to sex and habitat. *Journal of Crustacean Biology*, 32, 940-948. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002090>
- Lima, J. D. F., Garcia, J. D. S. & Silva, T. C. D. (2014). Natural diet and feeding habits of a freshwater prawn (*Macrobrachium carcinus*: Crustacea, Decapoda) in the estuary of the Amazon River. *Acta Amazonica*, 44, 235-244. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672014000200009>
- Linton, S., Saborowski, M. R., Shirley, A. J. & Penny, J. A. (2014). Digestive enzymes of two brachyuran and two anomuran land crabs from Christmas Island, Indian Ocean. *Journal of Comparative Physiology B*, 184, 449-468.

- <https://doi.org/10.1007/s00360-014-0815-2>
- Manríquez-Santos, T. D. J., Álvarez-González, C. A., Peña, E., Camarillo-Coop, S., Martínez-García, R., & Vega-Villasante, F. (2018). Partial characterization of digestive proteases in adults of bigclaw river shrimp *Macrobrachium carcinus*. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 46(3), 525-533. <https://doi.org/10.3856/vol46-issue3-fulltext-5>
- Maraux, S., Louvard, D. & Baratti, J. (1973). The aminopeptidase from hogintestinal brush border. *Biochemistry and Biophysics Acta*, 321, 282–295. [https://doi.org/10.1016/0005-2744\(73\)90083-1](https://doi.org/10.1016/0005-2744(73)90083-1)
- Méndez-Martínez, Y., Torres-Navarrete, Y. G., Cortés-Jacinto E., García-Guerrero, M. U., Hernández-Hernández, L. H. & Verdecia. D. M. (2022). Biological, nutritional, and hematoimmune response in juvenile *Cherax quadricarinatus* (Decapoda: Parastacidae) fed with probiotic mixture. *Revista MVZ Cordoba*, 27(3). <https://doi.org/10.21897/rmvz.2578>
- Mustafa, M.G., Wakamatsu, S., Takeda, T., Umino, T. & Nakagawa, H. (1995). Effect of algae as a feed additive on growth performance in red sea bream, *Pagrus major*. *Trace Nutrients Research*, 12, 67–72.
- Musin, G., Rossi, A., Diawol, V.P., Collins, P.A. & Williner, V. (2018). Development of enzymes during ontogeny of two freshwater Decapoda: *Aegla uruguayana* (Aeglidae) and *Macrobrachium borellii* (Palaemonidae). *Aquaculture Research*, 49, 3889–3897. <https://doi.org/10.1111/are.13858>
- Pérez-Chabela, M.L., Alvarez-Cisneros, Y.M., Soriano-Santos, J. & Pérez-Hernández, M.A. (2020). Los probióticos y sus metabolitos en la acuicultura. Una Revisión. *Hidrobiológica*, 30 (I), 93-105. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2020v30nI>
- Peña-Almaraz, O. A., Castillo-Jiménez, H. E., Vargas-Ceballos, M. A., Badillo-Zapata, D., Chong-Carrillo, O. & Vega-Villasante, F. (2024). A life controlled by the current: rheotaxis behavior of the river prawn *Macrobrachium tenellum* (Decapoda: Palaemonidae). *Revista de Biología Tropical*, 72(1), e56514. <https://dx.doi.org/10.15517/rev.bioltrop.v72i1.56514>
- Rahim, A., Cakir, C., Ozturk, M., Sahin, B., Soulaimanid, A., Sibaouieh, A., Nasser, B., Essamadi, R. & El Amiri, B. (2021). Chemical characterization and nutritional value of *Spirulina platensis* cultivated in natural conditions of Chichaoua region (Morocco). *South African Journal of Botany*, 141, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.006>
- Rojo-Arreola, L., Choquet, C., Cordova-Murueta, J. & Garcia-Carreno, F. (2019). The protease-based compensatory mechanism to minimize the effect of dietary Soybean Trypsin Inhibitor in *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 500, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.10.002>
- Stumpf, L., Timpanaro, S., Battista, A., & López Greco, L. (2020). Effects of intermittent starvation on the survival, growth, and nutritional status of the freshwater prawn *Macrobrachium borellii* Nobili, 1896 (Decapoda: Caridea: Palaemonidae). *The Journal of Crustacean Biology*, 40(5), 489–497. <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruaa051>
- Vargas-Ceballos, M.A., Badillo-Zapata, D., Chong-Carrillo, O., Ponce-Palafox, J.T., Hernandez-Hernandez, L.H. & Vega-Villasante, F. (2020). Intake of different food sources in the first zoeae stages of *Macrobrachium tenellum* (Decapoda: Palaemonidae). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48, 156–161. <http://dx.doi.org/10.3856/vol48-issue1-fulltext-2344>
- Vargas-Ceballos, M.A., Wehrtmann, I.S., López-Uriarte, E., Vega-Villasante, F., Peña-Almaraz,

O., Espinosa-Magaña, A.F. & García-Guerrero, M.U. (2024). Population structure and abundance of the amphidromous prawn *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871) (Decapoda: Caridea: Palaemonidae) in the lower basin of Ameca River, western Mexico, before anthropogenic modifications. *Journal of Crustacean Biology*, 44(1), ruae012.
<https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruae012>

Versaw, W., Cuppet, S. & Winters, D.W. (1989). An improved colorimetric assay for bacterial lipase in nonfat dry milk. *Journal of Food Science*, 54, 1365–2621.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb05159.x>

Evaluación de niveles de humedad aprovechable en el balance hídrico y fotosintético en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Evaluation of usable moisture levels in the water and photosynthetic balance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.)

¹Carlos Antonio Gómez-Zúñiga^{ID}, ²Víctor Conde-Martínez^{ID}, ²Carlos Trejo López^{ID}, ³Sabina Velázquez-Márquez^{ID}

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Comitán. Comitán de Domínguez, Chiapas. México. ²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco, Estado de México. México. ³Universidad Autónoma de México. Instituto de Ecología. Ciudad de México. México. [§]Autor de correspondencia: (vconde@colpos.mx).

Resumen

La disminución del recurso hídrico afecta los procesos fisiológicos de las plantas, la principal señal física es el cambio en la turgencia celular, afectando la expansión foliar y el cierre estomático. El objetivo fue analizar el efecto de dos niveles de humedad aprovechable en las respuestas fisiológicas de dos genotipos de *Solanum lycopersicum* L. En 2017 se evaluaron tratamientos de humedad aprovechable (THA) y en el cultivo se realizaron tres muestreos para seis variables fisiológicas; a los datos se les realizó análisis de varianza bajo diseño completamente aleatorizado y prueba de medias (Tukey, 0.05). La disminución del potencial de agua en planta en los dos materiales del THA 50 % de humedad y del THA Mali-50 no afectó su tasa de asimilación de CO₂ y conductancia estomática. La restricción del 50 % de humedad redujo el potencial hídrico en ambos genotipos de jitomate y causó incremento en la concentración de osmolitos compatibles de las células en tejido foliar en los dos genotipos y en las tres etapas evaluadas, observándose la mayor concentración en la etapa uno correspondiente a la primera floración (-0.790 ± 0.015 MPa). Se observó que, aunque la reducción del recurso hídrico impactó negativamente en el potencial hídrico de las plantas en los THA de 50 % de humedad, este no alteró la fotosíntesis, ni la apertura estomática de las plantas, se detectó incremento en la concentración de prolina en hoja

en el tratamiento Cid-50, aminoácido que en estrés aumenta su concentración.

Palabras clave: conductancia estomática, intercambio de gases, osmolitos secundarios, transpiración.

Abstract

Decreased water availability affects plant physiological processes; the main physical sign is change in cell turgor, impacting leaf expansion and stomatal closure. The objective was to analyze the effect of two levels of available moisture on the physiological responses of two *Solanum lycopersicum* L. Available moisture (AM) treatments were evaluated in 2017, and three samplings were conducted in the crop for six physiological variables. Data were subjected to analysis of variance under a completely randomized design and mean comparison test (Tukey, 0.05). The decrease in plant water potential in both materials, with 50% AM and Mali-50 AM, did not affect their CO₂ assimilation rate or stomatal conductance. The 50% humidity restriction reduced the water potential in both tomato genotypes and caused an increase in the concentration of compatible osmolytes in the cells of leaf tissue in both genotypes and at all three stages evaluated, with the highest concentration observed in stage one, corresponding to the first flowering (-0.790 ± 0.015 MPa). It was observed that, although the reduction in water resources negatively impacted

the water potential of the plants in the 50% humidity treatment, it did not alter photosynthesis or stomatal opening. An increase in proline concentration in the leaves was detected in the Cid-50 treatment; this amino acid increases in concentration under stress.

Index words: stomatal conductance, gas exchange, osmolytes secondary, transpiration.

Introducción

En las plantas, el agua desempeña diversas funciones incluyendo los procesos de transporte y transpiración por lo tanto sus propiedades mecánicas dependen en gran medida del agua y su localización en los tejidos y células (Ievinsh, 2023). El exceso o el déficit en el manejo del riego afecta en el desarrollo del fruto de los tomates (Zhao et al., 2022). Por lo tanto, un déficit hídrico afecta directa o indirectamente a los procesos fisiológicos (Reynaldo et al., 2002). Los principales cambios en la fenología de las plantas de jitomate con éste tipo de afectación es el cambio en la turgencia celular, las hojas cambian de ángulo de inclinación disminuyendo la expansión foliar, así como el cierre estomático y una disminución en la transpiración (Reynaldo et al., 2002; Velázquez-Márquez et al., 2015). Con respecto a los cambios fisiológicos, a medida que el suelo se seca el potencial hídrico (Ψ_a) se hace más negativo. De esta forma, para que pueda mantener el gradiente suficiente que permita la absorción de agua es necesario que reduzca su potencial osmótico (Ψ_o), la disminución del potencial osmótico mediante acumulación de solutos puede conducir a un ajuste osmótico, o por reducción del potencial de presión, consecuencia de la deshidratación. El ajuste osmótico es crucial para mantener la turgencia celular y la estabilidad de la membrana. Los osmolitos también regulan el plegamiento de proteínas, esencial para mediar los mecanismos de señalización del estrés o las vías responsables de la tolerancia. Además, ayudan a mantener la estabilidad de la membrana tilacoidal, manteniendo a las plantas en fase

fotosintéticamente activa en condiciones de estrés (Kaur et al., 2024).

Para tolerar las condiciones de estrés, las plantas desarrollan múltiples mecanismos, incluyendo la acumulación de moléculas protectoras y proteínas, alteraciones en la composición lipídica de la membrana, y composición de metabolitos primarios y secundarios, así como los cambios en la expresión global de genes y proteínas (Miura et al., 2012). En respuesta al estrés, la células pueden sintetizar osmolitos especializados tales como la prolina, glicina betaina y trehalosa para reajustar el potencial osmótico celular (Langridge, 2006; Velázquez-Márquez et al., 2015). Otras señales son la síntesis de la hormona ácido abscísico (ABA) y la modificación de la expresión genética, relacionada con la actividad enzimática. Esta hormona cierra los estomas en las plantas de semilla y se sintetiza a medida que disminuye la turgencia de las hojas. El cierre estomático impulsado por ABA durante la sequía es particularmente evidente en especies que son más isohídricas (Kane & McAdam, 2023).

También se manifiesta la prolina oxidasa (PROX), pirrolina -5- carboxilato sintetasa (P5CS) y pirrolina - 5- carboxilato reductasa (P5CR), que participan en los procesos metabólicos de la síntesis de prolina (Foolad, 2007), proteínas LEA (proteínas de la embriogénesis tardía) con función protectora, enzimas antioxidantes (Moreno, 2009), enzimas con características antioxidantes así como la presencia de antioxidantes no enzimáticos, como ácido ascórbico, Glutatión, carotenoides y α -tocopherol, aumenta (Chen et al., 2008, 2016). *S. lycopersicum* contienen una gran variedad de antioxidantes como los carotenoides, vitamina E, ácido ascórbico, flavonoides y compuestos fenólicos (Borguini y Da Silva, 2009). Siendo el licopeno el carotenoide responsable del color rojo en los frutos maduros quien ha despertado en gran interés por su importancia nutracéutica (Omoni y Aluko, 2005). Muchos estudios han demostrado que el déficit de riego controlado (DRC) es ventajoso cuando se aplica adecuadamente, la aplicación de un déficit de agua en la planta puede

disminuir el vigor vegetativo pero mejorar la partición de carbohidratos a estructuras reproductivas (Tahi et al., 2007).

En la presente investigación bajo un esquema de niveles de humedad aprovechable, se analizaron algunas respuestas fisiológicas en plantas y su relación con el metabolismo de osmolitos en los frutos de *Solanum lycopersicum* L.

Materiales y métodos

Diseño experimental

El experimento se realizó durante el año 2016-2017 en dos etapas: A) invernadero: se llevó a cabo en un invernadero de triple túnel, con estructuras de metal cubiertas de plástico de polietileno de alta densidad con malla anti-insectos en las paredes laterales; B) laboratorio: se llevó a cabo en el laboratorio de Bioquímica del Posgrado en Botánica. Ambos sitios dentro de las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

Se utilizaron semillas de jitomate tipo saladette cv. Cid FI (USA) y semillas de una colecta de Malinalco, Estado de México, identificada como Mali (CP-430).

Cid FI es un cultivar que se distingue por su amplia adaptación, de extraordinario vigor y de crecimiento indeterminado, sus frutos son tipo saladette, de epicarpio grueso y muy firmes, de prolongada vida de anaquel. Mali (CP-430), se colectó en la localidad San Martín, Malinalco, Estado de México el 17 de noviembre de 2010, presenta un crecimiento indeterminado y generalmente se cultiva en condiciones de invernadero, los frutos son de tipo pera, calabaza, bola y arriñonado.

Se diseñaron dos tratamientos de humedad aprovechable (*THA*). *THA* 1: el sustrato mostró una capacidad de retención de humedad de 1.97 L (21.88 %) se mantuvo a 100 % de humedad (capacidad de campo) y por efecto de evapotranspiración se permitió la pérdida de agua del 20 %. *THA* 2: el sustrato se mantuvo a 50 % de humedad (déficit hídrico) y por efecto de evapotranspiración se permitió la pérdida de agua del 10 %. Estos tratamientos de humedad

aprovechable se combinaron con las plántulas del cv. Cid FI y Mali (CP-430) y; en total se obtuvieron cuatro tratamientos a evaluar.

Se realizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 2² (*THA*, cultivar). Se obtuvo una población de 180 plantas de *Solanum lycopersicum* L., 90 plantas por genotipo; las unidades experimentales consistieron en una planta con cinco repeticiones. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de medias (Tukey, 0.05); todos los análisis se realizaron utilizando el paquete Statistical Analysis System (SAS). (SAS Institute Inc., 2022)

Relaciones hídricas

El potencial hídrico (Ψ_a) se determinó en tres etapas fenológicas de los foliolos medios y en una hoja completamente expandida y se utilizó una bomba de presión tipo de Scholander (Soil Moisture, Santa Bárbara, California, USA).

Los foliolos medios identificados previamente se desprendieron del tallo con una navaja afilada e inmediatamente uno de ellos se montó en la cámara de presión siguiendo las indicaciones de manejo de la cámara, se administró presión neumática generada con gas nitrógeno hasta que se pudo observar en el corte del pecíolo una gota de savia proveniente del sistema vascular, entonces se indicó el balance de presión. Se tomó la lectura del manómetro en una libreta de campo y los resultados se expresaron en MPa.

Para la determinación del Ψ_o se usaron foliolos medios de una hoja completamente expandida; se cortaron foliolos y se envolvieron en papel aluminio depositándose en nitrógeno líquido. El potencial osmótico (Ψ_o) se calculó con un osmómetro de presión de vapor de la marca wescor, modelo: 5520; para lo cual se utilizaron los foliolos previamente almacenados, estos se colocaron dentro de una jeringa hipodérmica, y se le aplicó presión manual al émbolo con la finalidad de extraer el contenido celular de los foliolos, se utilizaron aproximadamente 10 μ L del contenido celular para embeber un disco de papel filtro. Se utilizó al mismo tiempo un termómetro para registrar la temperatura al momento de la lectura.

El potencial de presión (Ψ_p) se obtuvo por diferencia de los valores obtenidos del potencial de agua total y potencial osmótico, de acuerdo a la ecuación siguiente: $\Psi_p = \Psi_a - \Psi_s$.

Para la determinación de estas tres variables se utilizó un sistema portátil y abierto de análisis de gases en el espectro infrarrojo (Ciras-2, PP Systems), el procedimiento consistió en tomar las lecturas de los foliolos medios de los nomófilos centrales de la planta, se realizaron dos lecturas por nomófilo. Se resalta que estas lecturas se realizaron entre las 11:30 y 13:30 h del día, cabe mencionar que, en una sola lectura, se obtienen estas tres variables fisiológicas.

Resultados y discusión

Potencial hídrico (Ψ_a)

El Ψ_a foliar disminuyó en mayor grado con el tratamiento Mali-50 (**Figura 1a**), y se observó diferencia estadística ($p \leq 0.05$) con respecto a los tratamientos Mali-100 y Cid-100, este mismo comportamiento se presentó en las tres etapas fenológicas evaluadas, primera floración (-0.372 MPa), formación del fruto (-0.376 MPa) y cosecha (-0.392 MPa).

Estos resultados son similares con los obtenidos por Tahi et al. (2007), quienes observaron que *Solanum lycopersicum* L. sometido a déficit de agua al 50 % de riego controlado, a partir del día 9, presentó una disminución considerable del Ψ_a (-0.4 MPa) foliar y se estabilizó a partir del día 20, cuando el potencial de agua fue de -0.9 MPa. Mientras que los resultados encontrados en esta investigación (**Figura 1**) indicaron que una humedad aprovechable intermedia del 50 % mantuvo constante al potencial de agua (Ψ_a -0.376 MPa) con el tratamiento Mali-50 y este valor se mantuvo durante las tres etapas fenológicas estudiadas, además fue estadísticamente diferente ($p \leq 0.05$) con respecto a los tratamientos Mali-100 y Cid-100. Los valores encontrados de esta variable son ligeramente bajos comparados con los reportados por García et al. (2010), en los cuales el potencial hídrico foliar en sorgo y su relación con la

humedad del suelo fueron superiores con -1.0 MPa y -1.5 MPa, en riego y secano, respectivamente.

Potencial osmótico (Ψ_o)

Los resultados publicados por López-Ordaz et al. (2008) mostraron diferencias estadísticas significativas en los tratamientos evaluados de secado parcial de la raíz (SPR) y testigo (80 % de humedad aprovechable); sin embargo, los resultados encontrados en esta investigación (**Figura 2**), muestran que el Ψ_o difiere en el tratamiento Cid-50 en la etapa 1 (-0.790 MPa) y la etapa 3 (-0.730 MPa), esto es con respecto a los tratamientos de 100 % de humedad (Mali-100 y Cid-100).

La etapa 2 (formación del fruto) no reflejó diferencias con respecto a los cuatro tratamientos evaluados. La reducción del potencial osmótico en la planta por estrés hídrico puede compensarse con la síntesis y acumulación de solutos compatibles, esto puede suceder a nivel del citosol y organelos, sin afectar la actividad de las enzimas, evita disminución de la fotosíntesis, alteraciones en la translocación, distribución de los fotoasimilados y las consecuentes pérdidas de rendimiento (Cortés & Del Real, 2007; Foolad, 2007; Lamz & González, 2013).

El potencial de presión (Ψ_p) indicó en la etapa uno (primera floración) una diferencia estadística ($p < 0.05$) entre materiales evaluados, pero sin efecto entre tratamientos de humedad entre los mismos materiales (**Figura 3**). Los valores de los tratamientos del 100 % de humedad son similares a los reportados por López-Ordaz et al (2008) en plantas de jitomate con tratamientos de raíz dividida.

Con respecto a la etapa 3, no se observaron efectos diferentes entre los cuatro tratamientos, lo que puede indicar un mantenimiento en el potencial de presión en las células del tejido foliar en el tratamiento de 50 % de humedad aprovechable, posiblemente debido a un ajuste osmótico en la planta. Al existir un ajuste osmótico, la acumulación de osmolitos dentro de las células vegetales se incrementa.

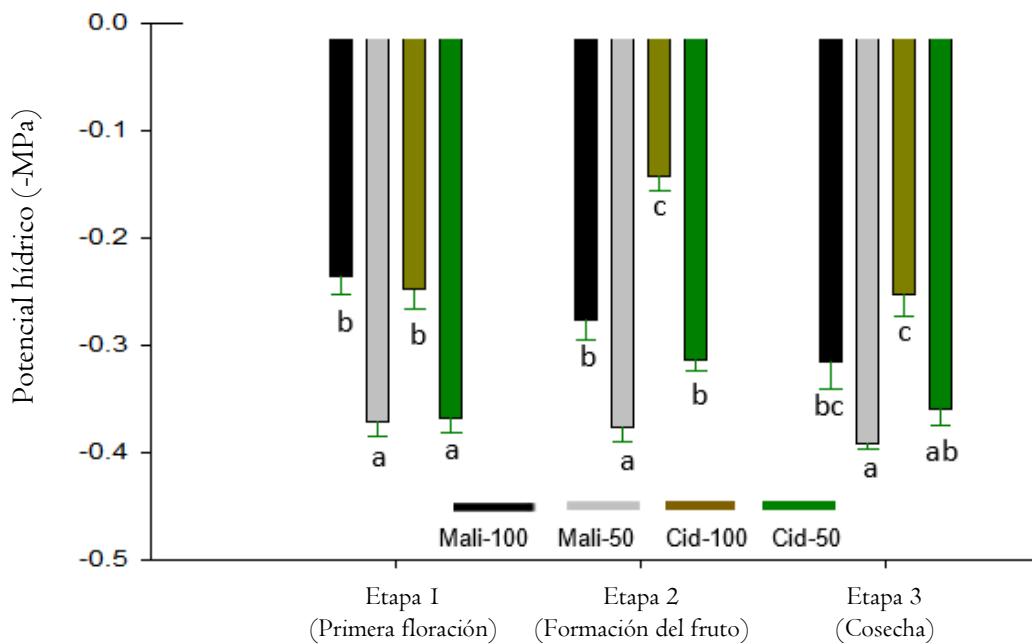


Figura 1. Efecto sobre el potencial hídrico (-MPa) de dos tratamientos de humedad aprovechable en tres etapas fenológicas del cultivo de jitomate. Las líneas verticales en las barras y por etapa fenológica representan el error estándar del promedio de $n = 5$. Letras diferentes dentro de la misma etapa indican diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

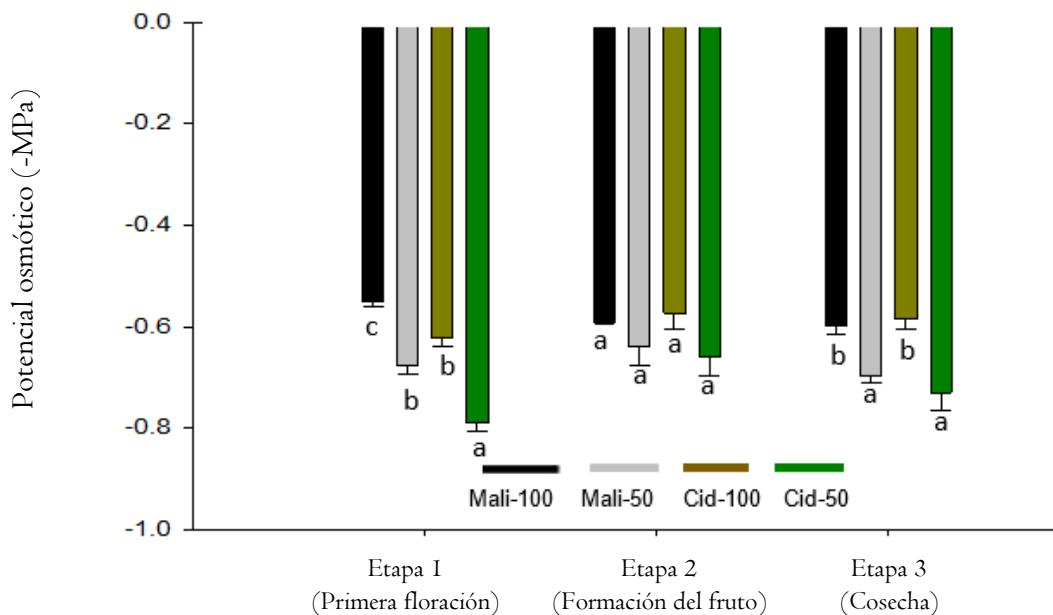


Figura 2. Efecto sobre el potencial osmótico (-MPa) de dos tratamientos de humedad aprovechable en tres etapas fenológicas del cultivo de jitomate. Las líneas verticales en las barras y por etapa fenológica representan el error estándar del promedio de $n = 5$. Letras diferentes dentro de la misma etapa indican diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

Tasa de asimilación de CO₂

La tasa de asimilación de CO₂ del material Cid-FI en su etapa I (primera floración) y con los dos tratamientos de humedad aprovechable (Cid-100 y Cid-50) mostraron valores superiores con respecto a los tratamientos Mali-100 y Mali-50 (**Figura 4**). López-Ordaz et al. (2008) reportaron en su trabajo con raíz dividida de *S. lycopersicum* valores de asimilación de CO₂ del 11.28 % y 48.79 % menos que los encontrados en esta investigación en los tratamientos del 50 % de humedad en la etapa de floración y cosecha del fruto. Asimismo, los valores de asimilación de CO₂ reportados en este trabajo indican similitud con los encontrados en *Prosopis glandulosa* Torr. (mezquite) en la etapa adulta, por Hernández et al. (2007).

Una de las razones que puede explicar el comportamiento de la fotosíntesis entre los tratamientos con restricción de humedad del 50 % versus 100 %, es que debido a la disminución del Ψ_o foliar en los tratamientos Mali-50 y Cid-50 (**Figura 2**) la enzima o el sistema enzimático se ajustó de tal manera que las actividades de las mismas no se inhibieron y permitió un buen funcionamiento, tal vez apoyado por la síntesis de compuestos osmoprotectores que mantuvieron los potenciales osmótico y de presión óptimos, que evitaron el abatimiento de la fotosíntesis entre los tratamientos con restricción hídrica (Foolad, 2007; Cortés & Del Real, 2007).

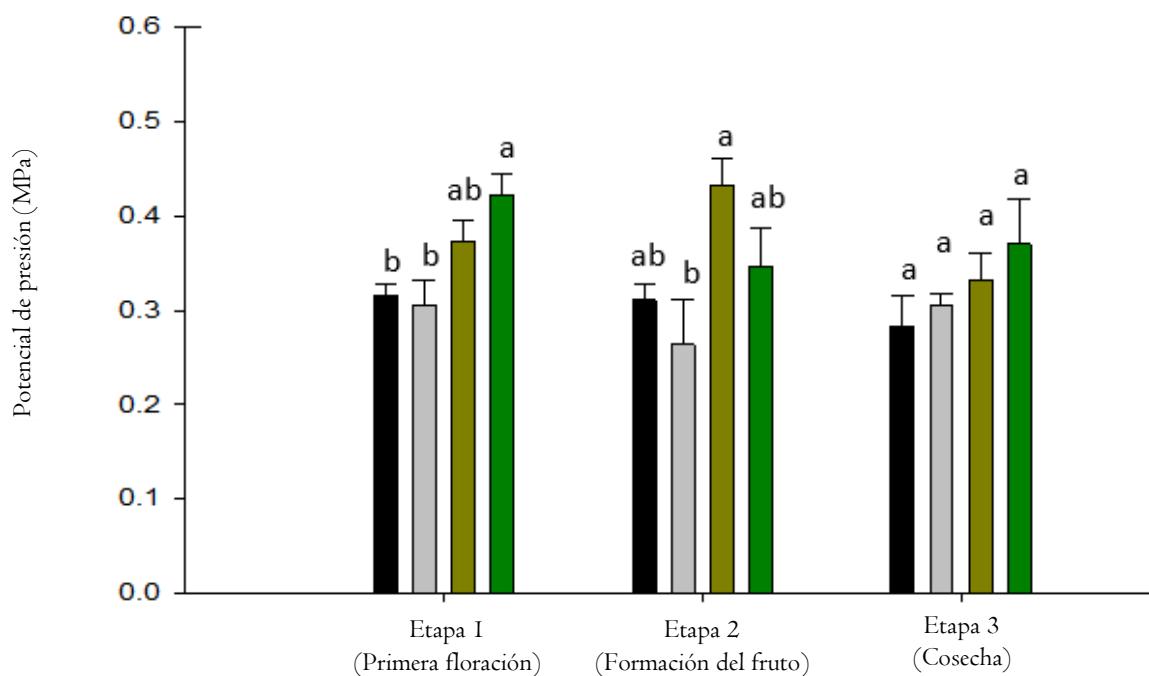


Figura 3. Efecto sobre el potencial de presión (MPa) de dos tratamientos de humedad aprovechable en tres etapas fenológicas del cultivo de jitomate. Las líneas verticales en las barras y por etapa fenológica representan el error estándar del promedio de $n = 5$. Letras diferentes dentro de la misma etapa indican diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

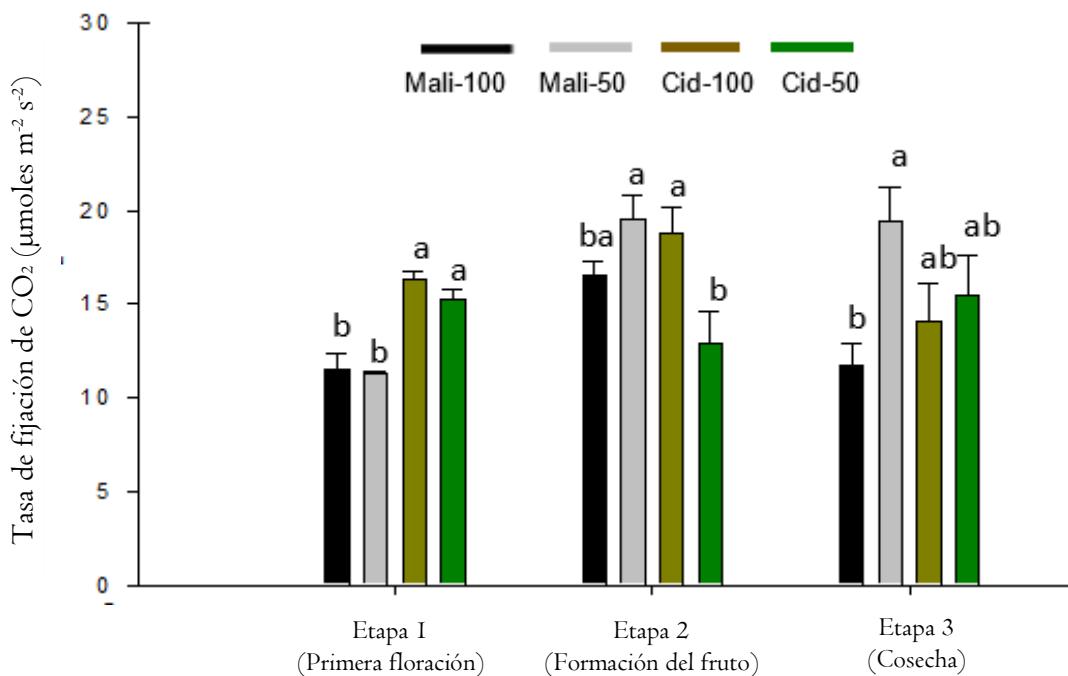


Figura 4. Efecto sobre tasa de fijación de CO_2 ($\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-2}$) de dos tratamientos de humedad aprovechable en tres etapas fenológicas del cultivo de jitomate. Las líneas verticales en las barras y por etapa fenológica representan el error estándar del promedio de $n = 5$. Letras diferentes dentro de la misma etapa indican diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

Transpiración y conductancia estomática

El potencial hídrico de las plantas está altamente relacionado con el proceso de la transpiración, proceso mediante el cual las plantas pierden agua en forma de vapor a través de los estomas. Así pues, los resultados obtenidos en la transpiración con respecto a los tratamientos Mali-50 y Cid-50 mostraron disminución en esta variable a partir de la etapa 2 (Figura 5) y esta se mantuvo hasta la etapa 3.

Tahi et al. (2007) indicaron en su trabajo con *S. lycopersicum* que la transpiración disminuye en un 50 % con respecto a su testigo cuando se restringe el 50 % de humedad aprovechable y que este comportamiento también se presenta en tratamientos de raíz dividida. Sin embargo, aunque la conductividad estomática no se ve afectada durante las etapas I y 2 en los cuatro tratamientos evaluados, para la etapa 3 (cosecha) se observó

disminución en esta variable para los tratamientos Mali-50 (440 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-2}$) y Cid-50 (486 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-2}$) debido a la disminución del recurso hídrico.

Cabe mencionar que esta señalización de cierre parcial estomático puede estar relacionado entre la interacción de la raíz y el contenido de agua del sustrato (Christmann et al., 2007). Con estos resultados se trata de definir si bajo estas condiciones *S. lycopersicum* mantiene los estomas parcialmente cerrados para su buen funcionamiento, con limitaciones en la captación de electrones de CO_2 , o tal vez se prefiera tolerar la pérdida de agua por transpiración; los resultados indicaron que el comportamiento depende de la etapa (I y/o 2) en que se encuentre *S. lycopersicum*, que corresponden a la floración y formación del fruto.

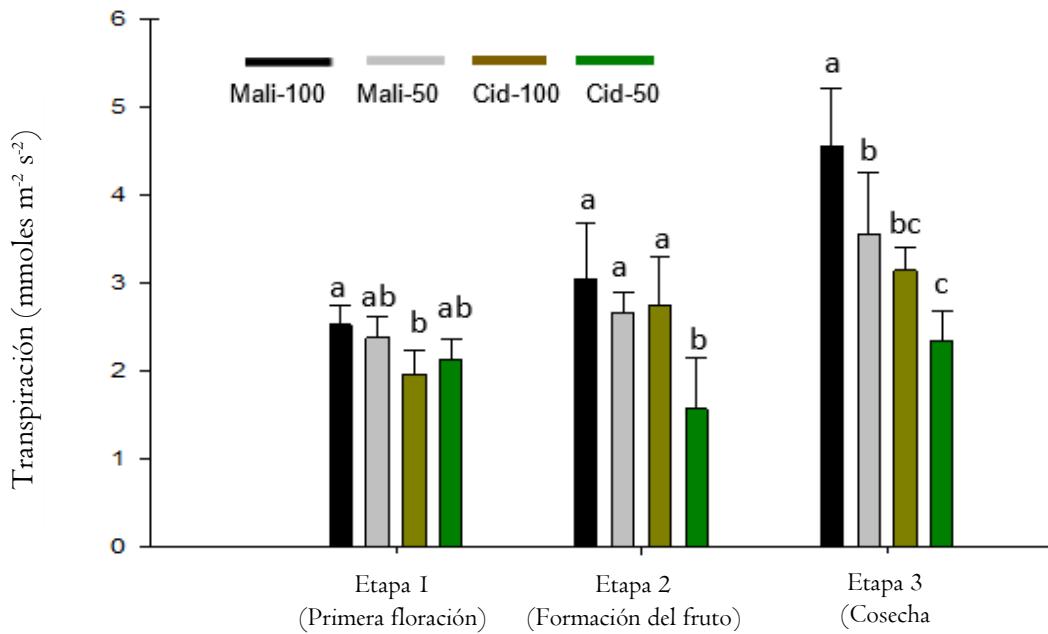


Figura 5. Efecto sobre la transpiración ($\text{mmoles m}^{-2} \text{s}^{-2}$) de dos tratamientos de humedad aprovechable en tres etapas fenológicas del cultivo de jitomate. Las líneas verticales en las barras y por etapa fenológica representan el error estándar del promedio de $n = 5$. Letras diferentes dentro de la misma etapa indican diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

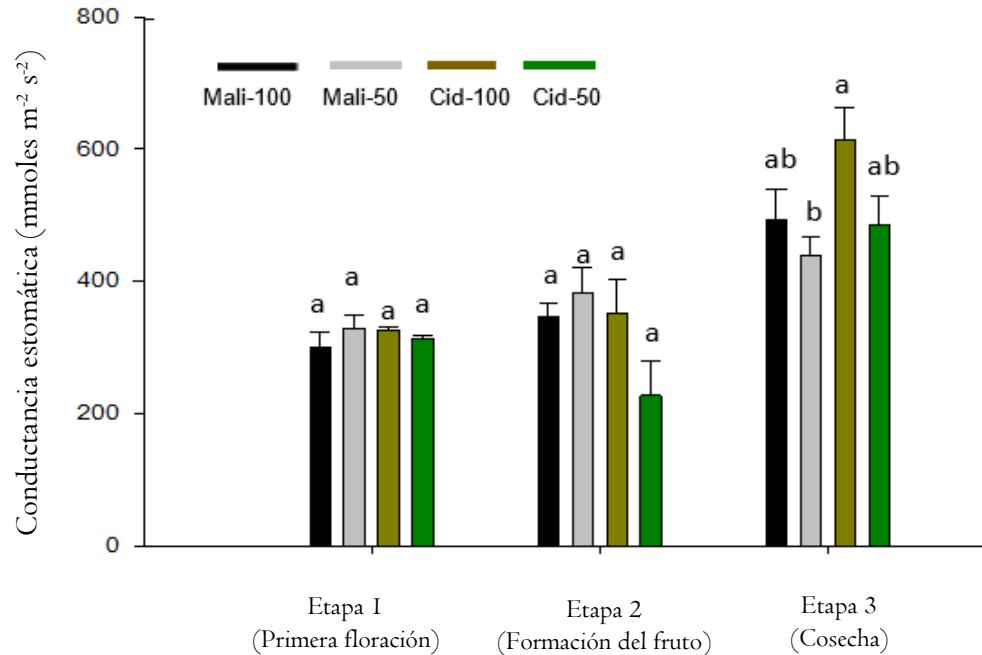


Figura 6. Efecto sobre la conductancia estomática ($\text{mmoles m}^{-2} \text{s}^{-2}$) de dos tratamientos de humedad aprovechable en tres etapas fenológicas del cultivo de jitomate. Las líneas verticales en las barras y por etapa fenológica representan el error estándar del promedio de $n = 5$. Letras diferentes dentro de la misma etapa indican diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

Solanum lycopersicum requiere toda la energía necesaria para producir biomasa a través de la fotosíntesis, esto se ve por la disminución del potencial osmótico (**Figura 2**), que indirectamente indicó un aumento en el contenido de osmoprotectores sin afectar la actividad enzimática, entonces la planta pudo mantener su turgencia (Cortés & Del Real, 2007; Lamz & González, 2013). Asimismo, en el caso de la etapa 3 (cosecha) el índice de transpiración (**Figura 5**) y conductividad estomática (**Figura 6**) se ve disminuido en los tratamientos Mali-50 y Cid-50, posiblemente ante la necesidad de ahorrar energía para reservarla en la formación de nuevas estructuras.

Conclusiones

La limitación del recurso hídrico provocó una reducción del potencial de agua (Ψ_a) en las plantas de jitomate en los tratamientos del 50 % de humedad evaluado, y en consecuencia se redujo el potencial osmótico (Ψ_o) y aumentó el potencial de presión (Ψ_p) que puede ser indicador de un ajuste osmótico. Se obtuvo alteración en los procesos fotosintéticos para los tratamientos Cid-100 y Cid-50 en la etapa uno. Asimismo, los tratamientos Mali-100 y Mali-50 presentaron una mayor tasa de transpiración en la tercera etapa del muestreo. La conductancia no resultó afectada por efecto de la disminución del Ψ_a en ambos materiales de jitomate evaluados. De tal forma, si los resultados en esta investigación son completamente repetibles, entonces se puede aseverar que con la disminución del recurso hídrico en plantas de jitomate como las estudiadas en esta investigación se puede permitir: A) disminuir la cantidad de agua de aproximadamente 12 000 L en 96 plantas. B) disminuir el costo de inversión (fertilizantes), C) mayor rentabilidad.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes (CONACyT) por el apoyo económico y al Colegio de Postgraduados por la

aportación del material biológico, instalaciones y equipos especializados para que esta investigación se llevara a cabo.

Referencias

- Agarwal, S., & Rao, A. V. (2000). Tomato lycopene and its role in human health and chronic diseases. *Canadian Medical Association Journal*, 163(6), 739-744.
- Borguini, R. G., & Da Silva Torres, E. A. F. (2009). Tomatoes and tomato products as dietary sources of antioxidants. *Food Reviews International*, 25(4), 313-325. <https://doi.org/10.1080/87559120903155859>
- Chen, J., Wang, S., Jing, R. & Mao, X. (2008). Cloning the PvP5CS gene from common bean (*Phaseolus vulgaris*) and its expression patterns under abiotic stresses. *Journal of Plant Physiology*, 166(1), 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.02.010>
- Chen, X., Tait, A. R. & Kitts, D. D. (2016). Flavonoid composition of orange peel and its association with antioxidant and anti-inflammatory activities. *Food Chemistry*, 218, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.016>
- Christmann, A., Weiler, E. W., Steudle, E. & Grill, E. (2007). A hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage. *The Plant Journal*, 52(1), 167-174. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2007.03234.x>
- Cortés, V. G., & Del Real, G. S. (2007). Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *Idesia*, 25(3), 47-58. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292007000300006>
- Foolad, M. R. (2007). Genome mapping and molecular breeding of tomato. *International Journal of Plant Genomics*, (2007)1, e64358. <https://doi.org/10.1155/2007/64358>

- García López, A., Cun González, R. & Montero San José, L. (2010). Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3), 7-11.
- Hernández, D. C., Calzada, R. T., Arriaga, O. E., Avila, J. G. A. & Hernández, A. F. (2007). Evaluación de un método para medir fotosíntesis en mezquite (*Prosopis glandulosa*). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 6(2), 185-190.
- Ievinsh, G. (2023). Water content of plant tissues: so simple that almost forgotten?. *Plants*, 12(6), 1238. <https://doi.org/10.3390/plants12061238>
- Kane, C. & McAdam, S. (2023). Abscisic acid driven stomatal closure during drought in anisohydric *Fagus sylvatica*. *Journal of Plant Hydraulics*, 9, 002. <https://doi.org/10.20870/jph.2023.002>
- Kaur, G., Sanwal, S. K., Kumar, A., Pundir, R. K., Yadav, M. & Sehrawat, N. (2024). Role of osmolytes dynamics in plant metabolism to cope with salinity induced osmotic stress. *Discover Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00070-x>
- Lamz, P.A. & González, C.M.C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31-42.
- Langridge, P. (2006). Functional genomics of abiotic stress tolerance in cereals. *Briefings In Functional Genomics and Proteomics*, 4(4), 343-354. <https://doi.org/10.1093/bfgp/eli005>
- López-Ordaz, A., Trejo-López, C., Peña-Valdivia, C. B., Ramírez-Ayala, C., Tijerina-Chávez, L. & Carrillo-Salazar, J. A. (2008). Secado parcial de la raíz de jitomate: efectos en la fisiología de la planta y calidad de fruto. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 297-302.
- Miura, K., Sato, A., Shiba, H., Kang, S. W., Kamada, H. & Ezura, H. (2012). Accumulation of antioxidants and antioxidant activity in tomato, *Solanum lycopersicum*, are enhanced by the transcription factor SLICE1. *Plant Biotechnology*, 29(3), 261-269. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.12.0303b>
- Moreno F., L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191.
- Omoni, A. O., & Aluko, R. E. (2005). The anti-carcinogenic and anti-atherogenic effects of lycopene: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 16(8), 344-350. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.02.002>
- Reynaldo, I. M., Pérez, I., Jerez, E. & Dell'Amico, J. M. (2002). Efectos del estrés hídrico en la asimilación del nitrógeno en plantas de tomate cv INCA 9-1. *Cultivos Tropicales*, 23(2), 47-50.
- SAS Institute Inc. (2022). SAS (Versión 9.0).
- Tahi, H., Wahbi, S., Wakrim, R., Aganchich, B., Serraj, R. & Centritto, M. (2007). Water relations, photosynthesis, growth and water-use efficiency in tomato plants subjected to partial rootzone drying and regulated deficit irrigation. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 141(2), 265-274. <https://doi.org/10.1080/11263500701401927>
- Velázquez-Márquez, S., Conde-Martínez, V., Trejo, C., Delgado-Alvarado, A., Carballo, A., Suárez, R., Mascorro, J. O. & Trujillo, A. R. (2015). Effects of water deficit on radicle apex elongation and solute accumulation in *Zea mays* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.006>
- Zhao, F., Yoshida, H., Goto, E., & Hikosaka, S. (2022). Development of an Automatic Irrigation Method Using an Image-Based Irrigation System for High-Quality Tomato Production. *Agronomy*, 12(1), 106. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010106>

Calidad de semilla de *Pinus greggii* var. *australis* de diferentes procedencias de México

Quality of *Pinus greggii* var. *australis* seeds from different provenances of México

¹Raúl Aarón Ramírez-García^{ID}, ^{1,8}Gisela Virginia Campos-Angeles^{ID}, ²Javier López-Upton^{ID}, ¹Gerardo Rodríguez-Ortíz^{ID}, ¹Hermila Cruz-García^{ID}, ¹José Cruz Carrillo-Rodríguez^{ID}

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. ²Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Texcoco-Estado de México. México. ⁸Autor de correspondencia: (gisela.ca@voaxaca.tecnm.mx).

Resumen

La calidad de semillas es fundamental para el éxito en los programas de reforestación, ya que determina su capacidad de germinación y establecimiento en el entorno. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad de las semillas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl de diferentes procedencias de México después de un almacenamiento prolongado. El estudio se realizó en el Laboratorio de Ecofisiología Vegetal del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca con semillas proporcionadas por el Banco de Germoplasma del COLPOS. La calidad se evaluó siguiendo la ISTA mediante pruebas de tetrazolio, peso de 1000 semillas, número de semillas por kg y mediciones morfológicas (diámetro polar, ecuatorial y coeficiente de forma). Además, se determinó la curva de imbibición registrando el incremento de peso de submuestras de semillas hasta alcanzar peso constante. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el peso por semilla, el peso de 1000 semillas, el número de semillas por kg, el diámetro ecuatorial y polar, el coeficiente de forma, viabilidad e imbibición de las semillas. La procedencia de “La Palma” destacó por el mayor peso por semilla, semillas más anchas y absorción más rápida de agua. Mientras que “El Madroño” tuvo el mayor porcentaje de viabilidad. Los factores como el peso, el tamaño y la viabilidad de las semillas son determinantes para evaluar la calidad de las semillas, lo que define que sean seleccionadas para programas de reforestación y conservación.

Palabras clave: peso de semillas, variación, viabilidad.

Abstract

Seed quality is essential for the success of reforestation programs, as it determines their ability to germinate and establish in the environment. The objective of this study was to evaluate the quality of *Pinus greggii* Engelm. ex Parl seeds from different provenances in Mexico after prolonged storage. The study was conducted at the Laboratorio de Ecofisiología Vegetal del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca with seeds provided by the COLPOS Germplasm Bank. Quality was evaluated according to ISTA standards using tetrazolium tests, 1000-seed weight, number of seeds per kg, and morphological measurements (polar diameter, equatorial diameter, and shape coefficient). In addition, the imbibition curve was determined by recording the weight increase of seed subsamples until reaching constant weight. The results showed significant differences ($p \leq 0.05$) in weight per seed, 1000-seed weight, number of seeds per kg, equatorial and polar diameter, shape coefficient, viability, and imbibition. The “La Palma” provenance stood out for its higher seed weight, larger width, and faster water uptake, while “El Madroño” showed the highest viability. Overall, factors such as seed weight, size, and viability are crucial for evaluating seed quality, which determines their selection for reforestation and conservation programs.

Index words: seed weight, variation, viability.

Introducción

Pinus greggii Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & López es una variedad adaptada a zonas templadas-subhúmedas al sur de la Sierra Madre Oriental (Donahue & López-Upton, 1999; Martínez-Hernández et al., 2007). Su capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales lo convierte en un recurso clave para la restauración de ecosistemas degradados en México (Galicia et al., 2015; Ortiz-Mendoza et al., 2021). Debido a la diversidad de procedencias y cantidad de ensayos realizados en México, esta especie se ha convertido en la más estudiada en cuanto al uso de semillas en plantaciones (Rodríguez-Laguna et al., 2008; Alba-Landa et al., 2009; Rodríguez-Laguna et al., 2012, Mendizábal-Hernández et al., 2015). La elección del origen o procedencia de las semillas constituye una de las primeras decisiones fundamentales en el proceso de reforestación (Jordan et al., 2019).

Las semillas son reconocidas como la principal fuente de germoplasma y constituye uno de los recursos más utilizados para la producción masiva de plantas. Los individuos del género *Pinus*, son relevantes debido a su adaptabilidad y resistencia en diversos entornos, lo que los convierte en un factor determinante para el éxito tanto en programas de reforestación como en plantaciones forestales (Sáenz et al., 2011; Gough, 2020). La calidad de la semilla se determina por cuatro aspectos: genético, sanitario, físico y fisiológico, los cuales se evalúan mediante análisis en laboratorio e invernadero, empleando técnicas normalizadas que garantizan resultados uniformes y reproducibles (Avendaño-López et al., 2015), los principales parámetros que se evalúan son: peso, tamaño y viabilidad (Bonilla-Vichot, 2014; Frischie et al., 2020).

En las especies forestales, este indicador refleja el éxito reproductivo y proporciona datos sobre el

estado de la población, lo que resulta fundamental para diseñar estrategias de conservación (Castilleja-Sánchez et al., 2016). El uso de semillas de alta calidad es esencial para garantizar el éxito de las plantaciones y representa un paso fundamental en la aplicación de los programas de conservación y mejora (Pastorino & Gallo, 2000). Otro factor importante, es la procedencia de las semillas, ya que se considera una de las primeras decisiones fundamentales en el proceso de reforestación (Jordan et al., 2019). Por ello, el objetivo fue evaluar la calidad de semilla de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & López de diversas procedencias de acuerdo con los lineamientos establecidos por la International Seed Testing Association (ISTA, 2024).

Materiales y métodos

Procedencia de las semillas

La investigación se realizó durante 2024, en el laboratorio de Ecofisiología Vegetal del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Las semillas fueron proporcionadas por el Banco de Germoplasma del Colegio de Postgraduados (COLPOS), Campus Montecillo, fueron colectadas en el año 2005 (**Figura I**). La calidad de semillas fue determinada mediante los lineamientos establecidos por la International Seed Testing Association (ISTA, 2024).

Los sitios de colecta de *P. greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & López se distribuyen en diversas localidades de Querétaro, Hidalgo, Veracruz y Estado de México, abarcan una amplia variación en altitud y condiciones geográficas. La altitud varía entre 1200 m en “La Palma”, Hidalgo y 2700 m en “El Madroño”, Querétaro, mostrando la amplitud ecológica de la especie. Cabe destacar que la procedencia “Metepec” en el Estado de México corresponde a un huerto semillero (**Tabla I**).

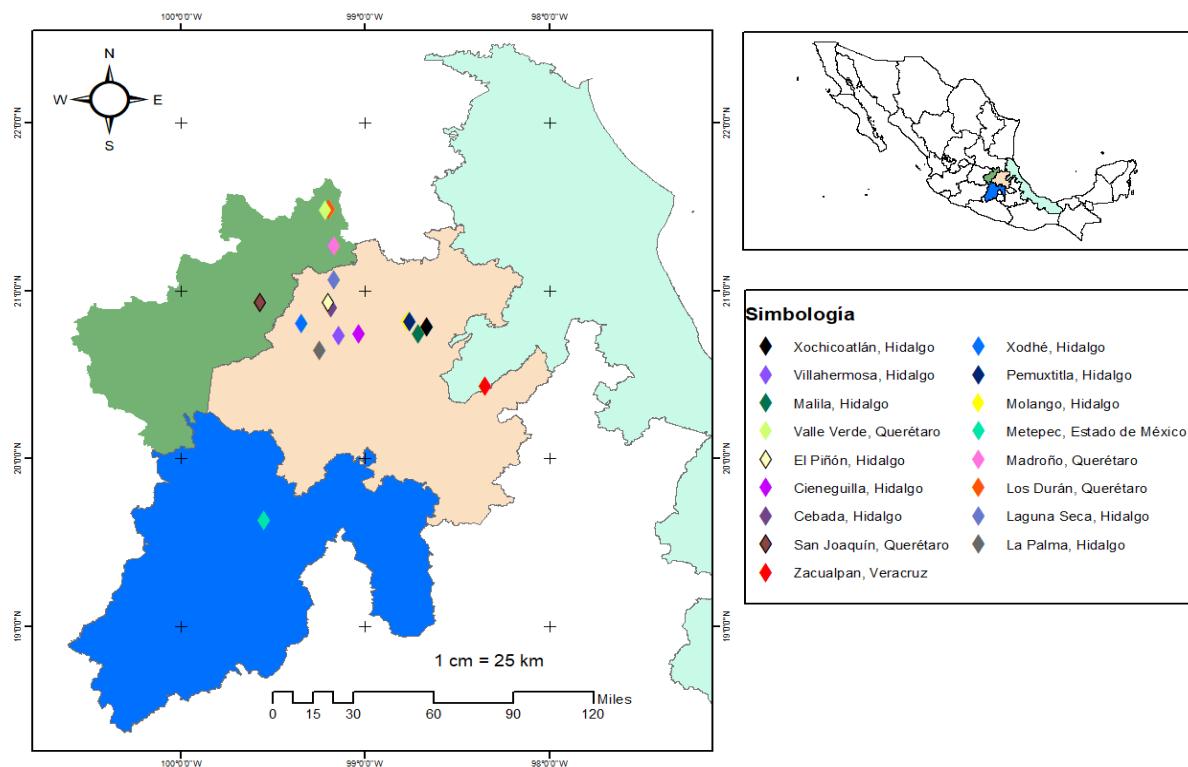


Figura I. Áreas de colecta de las semillas de *Pinus greggii* var. *australis*.

Tabla I. Ubicación geográfica de los sitios de colecta.

Procedencia	Longitud O	Latitud N	Altitud (m)
San Joaquín, Qro.	20° 56'	99° 34'	2 350
La Palma, Hgo.	20° 38'	99° 14'	2 700
Zacualpan, Ver.	20° 26'	98° 20'	1 600
Los Durán, Qro.	21° 28'	99° 12'	1 400
Pemuxtitla, Hgo.	20° 49'	98° 45'	1 370
Villa Hermosa, Hgo.	20° 43'	99° 08'	1 960
Metepec, Méx. [†]	19° 14'	99° 36'	2 600
Valle Verde, Qro.	21° 30'	99° 10'	1 250
Xodhé, Hgo.	20° 48'	99° 20'	1 950
Xochicoatlán, Hgo.	20° 47'	98° 42'	1 840
Cebada, Hgo.	20° 54'	99° 11'	2 090
El Piñón, Hgo.	20° 56'	99° 12'	1 830
El madroño, Qro.	21° 07'	99° 27'	1 200
Molango, Hgo.	20° 50'	97° 40'	1 500
Cieneguilla, Hgo.	20° 44'	99° 02'	2 000
Laguna Seca, Hgo.	21° 04'	99° 10'	1 720
Malila, Hgo.	20° 44'	98° 42'	1 600

[†] Huerto semillero establecido en marzo de 1991 (Azamar-Oviedo et al., 2000).

Prueba de tetrazolio e imbibición

Se seleccionaron al azar 30 semillas sanas de cada procedencia ($n = 510$), fueron sumergidas en agua destilada durante 24 h. Después, se retiró la cutícula mediante un corte longitudinal con la finalidad de exponer el embrión. La tinción se realizó con una solución de cloruro de tetrazolio al 1 % en cajas Petri por 24 h bajo oscuridad (ISTA, 2024). Se registró el número de embriones que tomaron una coloración rosa intenso debido a la reducción de tetrazolio, la cual fue inducida por la función respiratoria de sus células (Maldonado-Peralta et al., 2016).

Para determinar la curva de imbibición de agua, se seleccionaron dos submuestras de 30 semillas cada una. Se registró el peso inicial (g) y el incremento de su peso cada 2 h hasta obtener el peso constante. se utilizó una balanza analítica de precisión (Radwag AS 220/C/2, 0.1 mg).

Variables físicas y morfométricas

La muestra de semillas fue homogeneizada, se dividió en ocho submuestras iguales, de cada una se tomaron 100 semillas, que se pesaron en una balanza analítica Radwag AS 220/C/2 con precisión de 0.1 mg. Para determinar el peso (g) se pesaron ocho muestras de 100 semillas multiplicados por el factor 1.25 como lo indica la ISTA (2024).

Se midió el diámetro polar (mm) y ecuatorial (mm) de 25 semillas por procedencia, para lo que se utilizó un vernier digital Atverce modelo VC I con una precisión de 0.1 mm. El coeficiente de forma se determinó mediante la siguiente fórmula (Ecuación I):

$$CF = DE/DP \quad \text{Ecuación I}$$

Donde: CF: coeficiente de forma, DE: diámetro ecuatorial (mm), DP: diámetro polar (mm).

Análisis estadístico

Para todas las pruebas se empleó un diseño completamente aleatorio (*DCA*) que constó de 17 tratamientos (procedencias) con seis repeticiones, a excepción de la imbibición, que tuvo dos repeticiones. Para cada variable, se realizaron las pruebas de normalidad y homogeneidad de

varianzas mediante la prueba de Shapiro-Wilk y Levene ($\alpha = 0.05$). Tras ajustar y verificar la normalidad, se llevó a cabo un análisis de varianza y la prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$), con el software SAS 9.4® (SAS Institute, 2022), excepto en los datos de viabilidad. En el caso de la imbibición se realizó un análisis de varianza de medidas repetidas.

Resultados y discusión

Peso por semilla

Los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.01$) (Tabla 2) en el peso por semilla; la prueba de medias evidenció que las procedencias La Palma (0.0177 g), el Madroño y la Cebada presentaron el mayor peso, sin diferencias estadísticas entre ellas (Tabla 3). Coincide que La Palma es la que tuvo las semillas con el mayor peso y se sitúa a mayor altitud (2700 m) (Tabla 1), en contraste, Pemuxtitla (0.0118 mg), Villahermosa (0.0118 g), Cieneguilla (0.0118 g) y Malila (0.0116 g) mostraron los pesos más bajos y se sitúan a una altitud entre 1370 m y 2 000 m (Tabla 3). Estos resultados muestran una gran variación en el peso como consecuencia de las condiciones ambientales que predomina en cada procedencia; como temperatura, disponibilidad de agua y nutrientes que pueden afectar el peso por semilla (Hauke-Kowalska et al., 2019; Milberg et al., 1996), como lo describe Muñoz-Flores et al. (2023), quienes encontraron diferencias significativas en el peso de las semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. recolectadas a diferentes altitudes en una misma procedencia, es decir, existe una tendencia de variación morfológica relacionada con la altitud en que se localizan las poblaciones (Viveros-Viveros et al., 2014).

En el caso de la procedencia Zacualpan fue de 0.017 g, valor que resultó ligeramente inferior al reportado por Morante-Carriel et al. (2005), quienes obtuvieron un peso promedio de 0.019 mg en semillas recolectadas en la localidad de Carrizal Chico, dentro del mismo municipio.

Tabla 2. Resumen del análisis de varianza de la calidad de semillas de *Pinus greggii* var. *australis*.

Variable	GL error	Cuadrado medio	Error	CV (%)	\sqrt{CME}
Peso por semilla	85	0.00002282**	0.000003	12.94	0.001765
Peso de 1000 semillas		34.01*	2.296	11.02	1.51
Semillas kg ⁻¹		1348014882**	65697362	10.69	8105.39
Imbibición	17	0.009**	0.00006	9.51	0.027
Diámetro polar ^t	408	0.37**	0.026	4.49	0.10
Diámetro ecuatorial ^t		0.086**	0.100	5.19	0.087
Coeficiente de forma ^t		0.020**	0.013	9.34	0.065

* Valores de datos transformados \sqrt{x} . **Altamente significativo ($p \leq 0.01$), *significativo ($p \leq 0.05$). GL = grados de libertad, CV = coeficiente de variación, \sqrt{CME} = raíz del cuadrado medio del error.

Este decremento en el peso puede estar relacionado con el almacenamiento prolongado, dado que las semillas evaluadas en el presente estudio fueron colectadas hace aproximadamente 20 años donde el envejecimiento y las condiciones de conservación afectaron el peso y vigor de las semillas (Da-Eun et al., 2024).

Según Khan & Shankar (2001), las semillas más pesadas presentan un mayor contenido de proteínas, carbohidratos y lípidos en comparación con las de menor tamaño, esto indica que en las procedencias como La Palma y la Cebada los árboles pueden enfrentar condiciones adversas, como es lluvias escasas, suelos erosionados y heladas, en comparación con los de Pemuxtitla, Villahermosa y Malila, todos en Hidalgo.

Peso de 1000 semillas y semillas kg⁻¹

Los resultados indican que La Palma y Zacualpan (17.71 g) a pesar de provenir de altitudes diferentes obtuvieron el peso de 1000 semillas más alto; Sánchez-Mendoza et al. (2023) encontraron que la altitud puede influir en la calidad y peso de las semillas, pero la adaptación genética y las condiciones ambientales específicas pueden resultar en pesos similares a diferentes altitudes. La procedencia Xhodé presentó el peso más bajo con un promedio de 8.26 g, este resultado se relaciona con el número de semillas por kilogramo, ya que Xhodé obtuvo un promedio de 121 585 mientras que La Palma 56 817 y Zacualpan 57 271, al contar con semillas de mayor peso, mostraron una

cantidad menor (Tabla 3), según Muñoz-Flores et al., (2023), las diferencias en altitud pueden influir en el tamaño y peso, afectando así la cantidad por kilogramo, por lo tanto las características de las semillas pueden variar dependiendo de la población de origen (Alba-Landa et al., 2006).

Se observó una relación entre el peso y la cantidad de semillas por kilogramo, es decir las más pesadas tienden a ser menos numerosas por unidad de peso en comparación con las más ligeras, esto es importante en la selección ya que, si el objetivo es obtener un gran número de plántulas, se pueden utilizar las más pequeñas, pero si se busca asegurar un mejor establecimiento, se deben elegir más grandes (Simoes-Macayo & Renison, 2015).

Diámetro polar, ecuatorial y coeficiente de forma

En el diámetro polar, El Madroño presentó la mayor longitud promedio (6.76 mm), en contraste con Xhodhé (4.97 mm) y Xochicoatlán (4.91 mm) que mostraron longitudes menores ($p \leq 0.01$). En cuanto al diámetro polar, Cebada (3.13 mm), Los Durán y La Palma (3.10 mm) mostraron los valores más altos, mientras que Villahermosa (2.58 mm), El Piñón (2.59 mm) y Laguna Seca (2.59 mm) presentaron los valores más bajos. Además, el coeficiente de forma mostró que las semillas de Xochicoatlán (0.56) eran más esféricas, mientras que las de Cieneguilla (0.43 mm) mostraron una forma más alargada (Tabla 3).

Tabla 3. Características morfológicas de *Pinus greggii* var. *australis* de diferentes procedencias de México.

Procedencia	Peso por semilla (g)	Peso de 1000 semillas (g)	Número de semillas kg ⁻¹	Diámetro polar (mm)	Diámetro ecuatorial (mm)	Coefficiente de forma
San Joaquín, Qro.	0.0136±0.0009 ^{dc}	14.49±0.63 ^{bdac}	67376±2837.32 ^{fecd}	6.26±0.089 ^{bdac}	2.78±0.0416 ^{bdc}	0.44±0.0078 ^{bc}
La Palma, Hgo.	0.0177±0.0006 ^a	17.71±0.60 ^a	56817±2060.26 ^f	6.40±0.182 ^{bac}	3.10±0.1733 ^a	0.53±0.0799 ^{bac}
Zacualpan, Ver.	0.0151±0.0011 ^{bdac}	17.71±0.94 ^a	57271±3053.96 ^f	5.53±0.071 ^{feg}	2.65±0.0408 ^d	0.48±0.0073 ^{bac}
Los Duran, Qro.	0.0146±0.00055 ^{bdac}	14.11±0.02 ^{bdec}	70977±1260.20 ^{fcebd}	6.26±0.108 ^{bdac}	3.10±0.0464 ^a	0.49±0.0090 ^{bac}
Pemuxtitlán, Hgo.	0.0118±0.0007 ^d	11.91±0.69 ^{de}	85231±4389.61 ^b	5.10±0.069 ^{hg}	2.75±0.0497 ^{dc}	0.54±0.0127 ^{bac}
Villahermosa, Hgo.	0.0118±0.0007 ^d	13.27±1.26 ^{dec}	78476±6694.77 ^{cbd}	5.86±0.102 ^{dc}	2.58±0.0453 ^d	0.44±0.0121 ^{bc}
Metepec, Méx.	0.0155±0.0005 ^{bac}	15.46±0.54 ^{bac}	65075±2322.66 ^{fcd}	6.03±0.105 ^{dc}	3.02±0.0692 ^{bac}	0.50±0.0119 ^{bac}
Valle Verde, Qro.	0.014±0.00068 ^{bdc}	13.80±0.66 ^{dec}	72998±3697.07 ^{fcebd}	5.98±0.073 ^{dec}	3.01±0.0652 ^{bac}	0.50±0.0094 ^{bac}
Xodhé, Hgo.	0.012±0.00044 ^{dc}	8.26±0.26 ^f	121585±3883.22 ^a	4.97±0.074 ^h	2.75±0.0409 ^{dc}	0.55±0.0120 ^{ba}
Xochicoatlán, Hgo.	0.0123±0.00055 ^{dc}	12.18±0.24 ^{de}	82236±1546.79 ^{cb}	4.91±0.068 ^h	2.76±0.0408 ^{dc}	0.56±0.0102 ^a
Cebada, Hgo.	0.0175±0.0007 ^{ba}	17.08±0.38 ^{ba}	58679±1358.30 ^{fe}	6.59±0.124 ^{ba}	3.13±0.0462 ^a	0.45±0.0207 ^{bac}
El Piñón, Hgo.	0.0135±0.0006 ^{cd}	13.62±0.71 ^{dec}	74461±4113.13 ^{cabd}	5.14±0.067 ^{hg}	2.59±0.0350 ^d	0.50±0.0092 ^{bac}
El Madroño, Qro.	0.0141±0.0010 ^{bdac}	13.001±0.02 ^{dec}	77124±1834.27 ^{cbd}	6.76±0.160 ^a	3.09±0.0460 ^{ba}	0.46±0.0206 ^{bac}
Molango, Hgo.	0.012±0.00076 ^{dc}	13.04 ± 0.45 ^{dec}	77156±2322.66 ^{cbd}	5.24±0.054 ^{hg}	2.75±0.0504 ^{dc}	0.52±0.0092 ^{bac}
Cieneguilla, Hgo.	0.0118±0.0006 ^d	13.42 ± 0.65 ^{dec}	75372±3615.26 ^{cbd}	6.25±0.131 ^{bdc}	2.70±0.0386 ^d	0.43±0.0092 ^c
Laguna Seca, Hgo.	0.012±0.0007 ^{dc}	12.39 ± 0.62 ^{dec}	81653±3952.41 ^{cbd}	5.77±0.093 ^{fde}	2.59±0.0472 ^d	0.45±0.0111 ^{bc}
Malila, Hgo.	0.0116±0.0003 ^d	11.63 ± 0.24 ^c	86156±1766.15 ^b	5.34±0.049 ^{fhg}	2.69±0.0650 ^d	0.50±0.0122 ^{bac}

Valores promedios ± error estándar, n = 6-25. Letras diferentes en las columnas son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Estos hallazgos son consistentes con los resultados de Rodríguez-Laguna et al. (2012), quienes también encontraron variaciones significativas en el tamaño de las semillas de *P. greggii* Engelm. ex Parl. en función de su procedencia y las condiciones del suelo. La relación entre el tamaño y la procedencia muestra que factores ambientales pueden influir en las características morfológicas, lo que a su vez podría impactar el crecimiento y la adaptación en diferentes condiciones.

Mendoza-Pedroza et al. (2023) demostraron que semillas más grandes de *Cajanus cajan* (L.) Millsp. generaron plántulas de mayor altura, diámetro y acumulación de biomasa, lo que se traduce en una mayor capacidad de supervivencia y crecimiento en condiciones adversas. Aunque el estudio se realizó en una especie diferente, el principio fisiológico es aplicable a especies forestales como *P. greggii* Engelm. ex Parl. donde las más grandes pueden conferir ventajas adaptativas similares. Por lo tanto, las diferencias observadas entre procedencias demuestran que la

selección de procedencias con semillas más grandes puede mejorar la calidad y éxito de los programas de reforestación y mejoramiento genético.

Bhat et al. (2015) encontraron que las dimensiones más altas para la longitud (10.05 mm) y ancho (5.38 mm) de las semillas de *P. wallichiana* A. B. Jacks. se registraron en rangos altitudinales más bajos (1600-2400 m) y conforme aumentaba la altitud, los valores, contrario a este estudio donde las más largas se obtuvieron a una altitud baja (1200 m) y las más anchas se obtuvieron a 2090 m, lo que demuestra que la altitud, aunque es un factor determinante no siempre se relaciona con las dimensiones de las semillas.

La variabilidad en el tamaño es crucial para su adaptación en distintos entornos, como señalan Rubio-Licona et al. (2011) y Manning et al. (2009) que las semillas más grandes tienden a tener una mayor supervivencia en diversas condiciones ambientales, en este caso El Madroño con diámetro ecuatorial de 6.76 mm y Cebada con un diámetro polar de 3.13 mm fueron las más

grandes, lo que indica una mayor capacidad de adaptación y supervivencia en ambientes más difíciles en comparación con Xochicoatlán que presentó diámetros menores (4.97 mm y 4.91 mm), lo que podría indicar una menor resiliencia en condiciones adversas. Estos hallazgos son coherentes con las observaciones de Bareke (2018), quien señala que el tamaño de las semillas está relacionado con su desarrollo y fisiología de germinación, donde las más grandes tienden a tener ventajas en términos de recursos almacenados, lo que les permite superar condiciones desfavorables durante la germinación y el establecimiento. Por lo tanto, la diferencia en los diámetros de las semillas podría ser un factor clave que influya en la capacidad de adaptación y supervivencia de las plántulas en entornos desafiantes.

En la localidad de Carrizal Chico, Zacualpán Veracruz, Morante-Carriel et al. (2005), reportaron valores de longitudes de 5.12–7.84 mm, anchos de 2.69–4.09 mm y pesos de 0.0190–0.0294 g. En el presente estudio, se obtuvieron valores ligeramente superiores con longitudes de 4.91 mm a 6.76 mm y anchos de 2.59 mm a 3.10 mm. Estas diferencias se deben a que en este estudio se emplearon solo semillas de *P. greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & López, la cual tiende a presentar semillas de mayor tamaño en comparación con las de ambas variedades consideradas en el estudio de referencia.

Viabilidad

Las procedencias de El Madroño y Metepec mostraron el mayor porcentaje de semillas teñidas, con un 83 % (**Figura 2**) a pesar de haber transcurrido 20 años de almacenamiento aún se siguen conservando lo que demuestra una viabilidad potencial superior en estas poblaciones; en el caso de Metepec proveniente de un huerto semillero las plantas se manejan con énfasis en la producción de semillas de calidad que incluye técnicas de polinización controlada, fertilización adecuada y control de plagas que mejoran a grandes rasgos la viabilidad (López-López et al., 2019). En contraste, Molango (3 %) presentó un porcentaje significativamente bajo. Por otro lado,

en Xhodhé, se observó que el 100 % no mostraron evidencias de teñido, lo que es evidente que el embrión está muerto o dañado.

La viabilidad es un indicador clave de la capacidad de germinación, ya que una semilla viable posee estructuras internas funcionales que le permiten iniciar el proceso germinativo (Bewley et al., 2013), la calidad y viabilidad disminuye con el tiempo y bajo condiciones desfavorables, como alta humedad o contaminación por hongos (Vázquez-López et al., 2021). En especies forestales puede conservarse durante períodos prolongados de entre 5 años y 10 años mediante técnicas de almacenamiento apropiadas, donde los elementos más determinantes son la temperatura y el nivel de humedad (Bonilla-Vichot, 2014). Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio muestran diferencias en la viabilidad según su procedencia, esta variabilidad indica que no todas las semillas de *P. greggii* Engelm. ex Parl. tienen la misma capacidad de conservación, por ello, aunque la viabilidad es un factor determinante para la germinación, su impacto puede variar dependiendo del origen, así como de factores fisiológicos y ambientales (Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2006). López-López et al. (2019) mencionan que las semillas se deben guardar con fungicidas como Captán®, sellados y refrigerados por un periodo de 3 años, realizando prueba de germinación cada seis meses y almacenar solo los lotes que tengan un porcentaje mayor al 85 % evitando cambios bruscos en el voltaje de la corriente que suministra energía al refrigerador.

Imbibición

Se encontraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) en la imbibición de las semillas de *P. greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & López entre procedencias, a través del tiempo y en la interacción tiempo-procedencia.

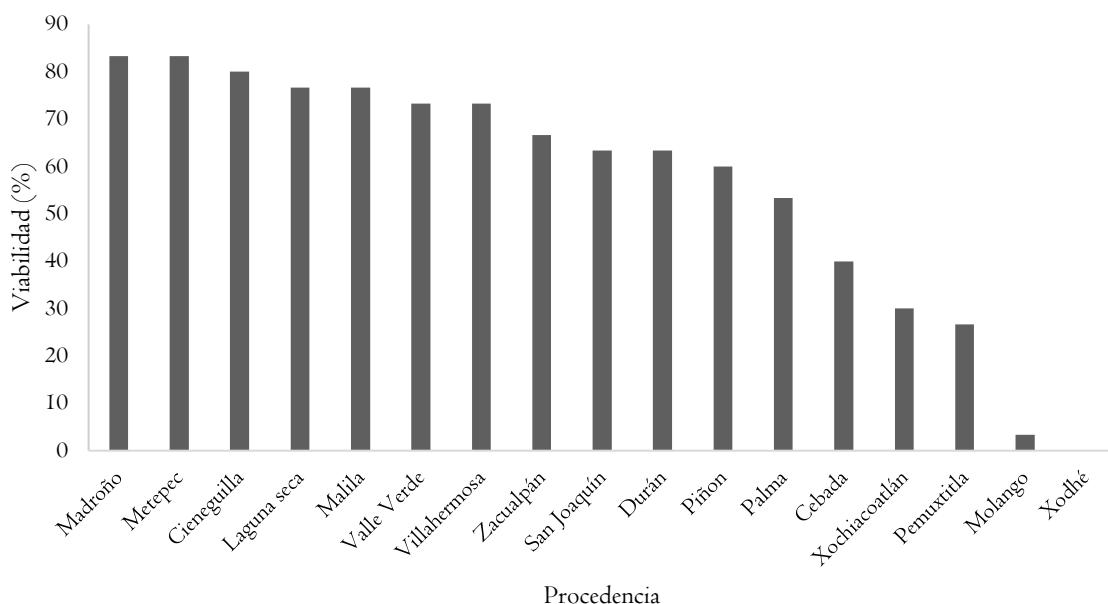


Figura 2. Viabilidad de semillas de *Pinus greggii* var. *australis* de 17 procedencias, error estándar= 6.70 %.

La Palma registró el peso inicial más alto, (1 g) mientras que Malila inició con el más bajo (0.54 g) (**Figura 3**); de acuerdo con Monroy-Vázquez et al. (2017) las semillas más viables y vigorosas pueden absorber más agua durante la imbibición, lo que puede estar relacionado con un mayor potencial para germinar y crecer, sin embargo, la imbibición puede ocurrir en semillas no viables por lo que, este fenómeno no asegura la germinación (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Las semillas más pesadas absorben más agua principalmente porque tienen un mayor volumen y cantidad de tejido, lo que implica más espacios celulares y estructuras internas para retener y almacenar agua durante la imbibición como el caso de La Palma que presentó el peso por semilla más alto en comparación con Malila que fue el más bajo (**Tabla 3**), Hernández-Anguiano et al. (2018) encontraron que las semillas con mayor tamaño y menor grosor de testa en *P. cembroides* Zucc. y *P. orizabensis* D. K. Bailey & Hawksworth presentaron una mayor tasa y cantidad de absorción de agua durante la imbibición, lo que explica que las semillas más pesadas absorban más agua comparadas con las más pequeñas.

En las primeras horas de imbibición las semillas absorbieron más agua como el caso de Metepec que aumentó de 0.63 g de la hora cero a 1.03 g en la hora seis, lo que representa un incremento del 63.5 %. Malila fue el primero que mostró un peso constante después de 8 h y después de las 18 h subió de forma gradual al igual que Molango solo que después de 12 h comenzó a subir de forma gradual. Por su parte, Zacualpan mostró estabilidad después de haber transcurrido 12 h. Metepec, Xodé, Cieneguilla y Laguna seca mantuvieron un peso constante por 4 h.

Zacualpan fue el primero que obtuvo un peso estable desde las 12 h, seguido de San Joaquín desde la h 16. Duran fue la procedencia que tuvo más variaciones en el peso a través del tiempo sin llegar a estabilizarse. La Palma y Valle Verde obtuvieron un peso estable desde las 18 h, Pemuxtitla estabilizó su peso en la h 18 y subió de nuevo en la h 20, según López-Upton & Escobar-Alonso (2021) para iniciar la germinación y garantizar una emergencia uniforme, la semilla de esta especie debe ser sumergida entre 18 h y 24 h, ya que permite que alcancen su máxima hidratación, lo que favorece su proceso de germinación (**Tabla 4**).

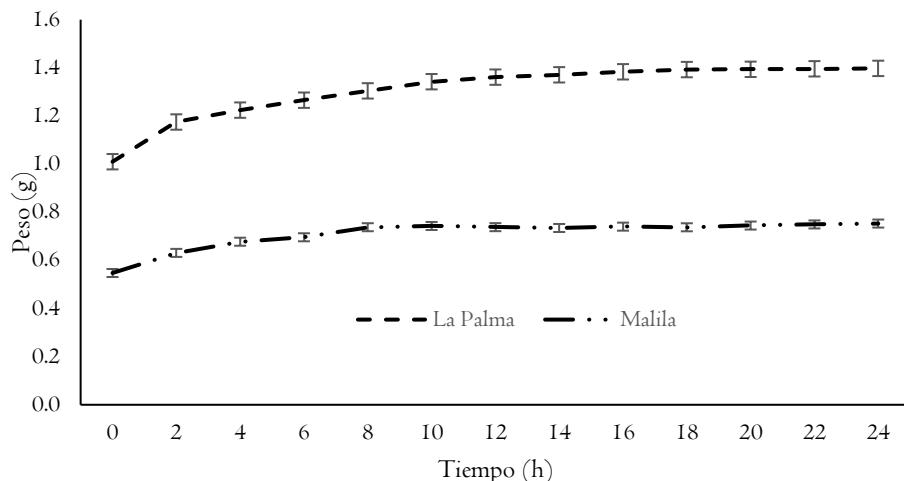


Figura 3. Imbibición de semillas de *Pinus greggii* var. *australis* durante 24 h: comparación de la procedencia con mayor y menor peso inicial. Las líneas verticales indican el error estándar ($n = 510$).

Tabla 4. Peso de las semillas de *Pinus greggii* var. *australis* desde la hora 0 hasta las 24 horas.

Procedencia	H0	H2	H8	HI2	HI8
San Joaquín, Qro.	0.79±0.05 ^{bac}	0.92±0.07 ^{bcd}	1.03±0.08 ^{bed}	1.07±0.08 ^{bed}	1.11±0.09 ^{bdec}
La Palma, Hgo.	1±0.16 ^a	1.17±0.15 ^a	1.30±0.11 ^a	1.36±0.13 ^a	1.39±0.16 ^a
Zacualpan, Ver.	0.71±0.09 ^{bdc}	0.81±0.12 ^{bdc}	0.92±0.14 ^{bcd}	0.95±0.14 ^{bcd}	0.95±0.14 ^{bdc}
Los Duran, Qro.	0.67±0.02 ^{bdc}	0.77±0.03 ^{bdc}	0.86±0.03 ^{ecd}	0.89±0.03 ^{ecd}	0.92±0.03 ^{dec}
Pemuxtitla, Hgo.	0.63±0.01 ^{bdc}	0.72±0.01 ^{dc}	0.81±0.02 ^{ecd}	0.84±0.02 ^{ecd}	0.85±0.01 ^{dec}
Villahermosa, Hgo.	0.79±0.03 ^{bc}	0.90±0.01 ^{bc}	0.99±0.03 ^{bcd}	1.03±0.02 ^{fed}	1.07±0.05 ^{bdc}
Metepec, Méx.	0.63±0.007 ^{bdc}	0.93±0.07 ^{bac}	1.04±0.08 ^{bc}	1.08±0.06 ^{bcd}	1.08±0.05 ^{bdc}
Valle Verde, Qro.	0.81±0.01 ^{ba}	0.94±0.01 ^{bac}	1.03±0.02 ^{bcd}	1.10±0.02 ^{bc}	1.11±0.02 ^{bac}
Xodhé, Hgo.	0.58±0.04 ^{dc}	0.70±0.05 ^{dc}	0.83±0.07 ^{ecd}	0.85±0.09 ^{ed}	0.89±0.08 ^{dec}
Xochicoatlán, Hgo.	0.60±0.01 ^{dc}	0.70±0.002 ^{dc}	0.80±0.03 ^{ed}	0.82±0.04 ^{ed}	0.82±0.02 ^{de}
Cebada, Hgo.	0.85±0.01 ^{ba}	0.97±0.03 ^{ba}	1.13±0.02 ^{ba}	1.19±0.02 ^{ba}	1.21±0.03 ^{ba}
El Piñón, Hgo.	0.75±0.02 ^{bdc}	0.87±0.02 ^{bc}	1±0.03 ^{bcd}	1.04±0.02 ^{bcd}	1.02±0.04 ^{bdc}
El madroño, Qro.	0.68±0.005 ^{bdc}	0.77±0.007 ^{bdc}	0.87±0.002 ^{ecd}	0.91±0.007 ^{ecd}	0.93±0.01 ^{bdc}
Molango, Hgo.	0.66±0.03 ^{bdc}	0.77±0.05 ^{bdc}	0.88±0.03 ^{ecd}	0.88±0.05 ^{ecd}	0.91±0.07 ^{dec}
Cieneguilla, Hgo.	0.64±0.02 ^{bdc}	0.72±0.02 ^{dc}	0.80±0.03 ^{ed}	0.82±0.03 ^{ed}	0.85±0.03 ^{dec}
Laguna Seca, Hgo.	0.68±0.04 ^{bdc}	0.79±0.03 ^{bdc}	0.89±0.03 ^{bcd}	0.91±0.05 ^{ecd}	0.91±0.03 ^{dec}
Malila, Hgo.	0.54±0.004 ^d	0.63±0.007 ^d	0.73±0.009 ^e	0.73±0.004 ^e	0.73±0.001 ^e

H = hora. Los datos con letras distintas en las columnas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Media ± desviación estándar, $n = 2$.

Conclusiones

La calidad de las semillas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl de diferentes procedencias reveló variaciones significativas en sus características morfológicas. La Palma, Hidalgo proveniente de 2 700 m destacó en peso por semilla, peso de 1 000

semillas, además presentó la mejor capacidad de imbibición, Xhodé obtuvo el mayor número de semillas por kg mientras que El Madroño y Metepec a pesar de 20 años de almacenamiento, mostraron el porcentaje más alto de semillas teñidas, lo que muestra una buena conservación. Esta variabilidad resalta la importancia de

seleccionar las procedencias de forma adecuada para optimizar los programas de reforestación, ya que algunas pueden ofrecer ventajas significativas en germinación y establecimiento.

Referencias

- Alba-Landa, J., Ramírez-García, E. O., & Rojas-Pérez, G. (2006). Variación en semillas de *Pinus greggii* Engelm. En el municipio de Naolinco, Veracruz, México. *Forest Veracruzana*, 8(2), 7-12.
- Alba-Landa, J., Cruz-Jiménez, H., Mundo-Zamora, J. E. & Ramírez-García, E. (2009). Diseño y establecimiento de una prueba de procedencias/progenie de *Pinus greggii* Engelm. *Forest Veracruzana*, 11(1), 39-42.
- Avendaño-López, A., Quintana-Camargo, M., Padilla-García, J., & Arriaga-Ruiz, M. (2015). Análisis de semilla de *Pinus devoniensis* con rayos X. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 2(4), 556-560.
- Azamar-Oviedo, M., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., & Plancarte-Barrera, A. (2000). *Evaluación de un ensayo de procedencias-progenies de Pinus greggii y su conversión a huerto semillero*. In: Ier Congreso Nacional de Reforestación. Montecillo, Méx. 08-10 Nov. Memorias in extenso.
- Azcón-Bieto, J. & Talón, M. (2000). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. (pp. 522). Editorial Mc Graw Hill Interamericana.
- Bareke, T. (2018). Biology of seed development and germination physiology. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(4), 336-346. <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00335>
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. & Nonogaki, H. (2013). Longevity, Storage, and Deterioration. En N. Bewley, J. D., Bradford, K., & Hilhorst, H. (Ed.), *Seeds: physiology of development, germination and dormancy*. (pp. 341-376). Editorial Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4_8
- Bhat, G., Mughal, A., Malik, A., Khan, P., Sofi, P., Islam, M., Singh, A. & Shazmeen, Q. (2015). Altitudinal variation in different seed source of *Pinus wallichiana* under temperate conditions of Kashmir. *The Bioscan*, 9(4), 677-681.
- Bonilla-Vichot, M. (2014). Variación del peso y viabilidad de las semillas de *Pinus tropicalis* para diferentes procedencias. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 2(1), 10.
- Castilleja-Sánchez, P., Delgado-Valerio, P., Sáenz-Romero, C. & Herreras-Diego, Y. (2016). Reproductive success and inbreeding differ in fragmented populations of *Pinus rzedowskii* and *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*, two endemic Mexican pines under threat. *Forests*, 7(8), 178. <https://doi.org/10.3390/f7080178>
- Da-Eun, G., Sim-Hee, H. & Kyu-Suk, K. (2024). Viability and integrity of *Pinus densiflora* seeds stored for 20 years at three different temperatures. *Conservation Physiology*, 12(1), coae046. <https://doi.org/10.1093/conphys/coae046>
- Donahue, J. & López-Upton, J. (1999). A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in Mexico. *SIDA, Contributions to Botany*, 18(4), 1083-1093. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16428307>
- Finch-Savage, W. E. & Leubner-Metzger, G. (2006). Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist*, 171(3), 501-523. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x>
- Frischie, S., Miller, A. L., Pedrini, S. & Kildisheva, O. A. (2020). Ensuring seed quality in ecological restoration: Native seed cleaning and testing. *Restoration Ecology*, 28, S239-S248. <https://doi.org/10.1111/rec.13217>
- Galicia, L., Potvin, C. & Messier, C. (2015). Maintaining the high diversity of pine and oak species in Mexican temperate forests: A new management approach combining functional zoning and ecosystem adaptability. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(10), 1358-1368. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-056>
- Gough, R. (2020). *Seed quality: Basic mechanisms and agricultural implications*. Editorial CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003075226>

- Hauke-Kowalska, M., Borowiak, E., Barzdajn, W., Kowalkwski, W., Korzeniewicz, R. & Wawro, T. (2019). Cone and seeds variability in seed orchards and seed stands of *Pinus sylvestris* L. *Baltic Forestry*, 25(2), 187-192. <https://doi.org/10.46490/vol25iss2pp187>
- Hernández-Anguiano, L. A., López-Upton, J., Ramírez-Herrera, C. & Romero-Manzanares, A. (2018). Variación en germinación y vigor de semillas de *Pinus cembroides* y *Pinus orizabensis*. *Agrociencia*, 52(8), 1161-1178.
- International Seed Testing Association. (Ista). (2024). *International Rules for Seed Testing* (Edition 2024). ISTA. www.seedtest.org
- Jordan, R., Breed, M. F., Prober, S. M., Miller, A. D. & Hoffmann, A. A. (2019). How well do revegetation plantings capture genetic diversity? *Biology Letters*, 15(10), 20190460. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0460>
- Khan, M. & Shankar, U. (2001). Effect of seed weight, light regime and substratum microsite on germination and seedling growth of *Quercus semiserrata* Roxb. *Tropical Ecology*, 42(1), 117-125.
- López-López, J. Á., García-Reyes, R. & Villalvazo-Núñez, J. (2019). *Manejo de un huerto semillero y banco clonal de Pinus douglasiana Martínez en Jalisco*. Editorial Universitario.
- López-Upton, J. & Escobar-Alonso, S. (2021). *Pinus greggii* Engelmann ex Parlatore (Pinaceae). En N. Rodríguez-Trejo, D. A. (Ed.), *Semillas de Especies Forestales*. (pp. 201-207). División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.
- Maldonado-Peralta, M. A., De los Santos-García, G., García-Nava, J. R., Ramírez-Herrera, C., Hernández-Livera, A., Valdez-Carrazco, J. M., Corona-Torres, T. & Cetina-Alcalá, V. M. (2016). Seed viability and vigour of two nanche species (*Malpighia mexicana* and *Byrsinima crassifolia*). *Seed Science and Technology*, 44(1), 168-176. <https://doi.org/10.15258/sst.2016.44.1.03>
- Manning, P., Houston, K. & Evans, T. (2009). Shifts in seed size across experimental nitrogen enrichment and plant density gradients. *Basic and Applied Ecology*, 10(4), 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2008.08.004>
- Martínez-Hernández, J., López-Upton, J., Hernández-Vargas, J. J. & Jasso-Mata, J. (2007). Zonas semilleras de *Pinus greggii* var. *australis* en Hidalgo, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 241-249.
- Mendizábal-Hernández, L. del C., Alba-Landa, J., Rodríguez-Juárez, M. C., Ramírez-García, E. O., Ramírez-Márquez J. & Cruz-Jiménez, H. (2015). Estudio de germinación de cinco procedencias de *Pinus greggii* Engelm. *Forestal Veracruzana*, 17(1), 49-56.
- Mendoza-Pedroza, S. I., Méndez-Gaona, E., Pérez-Cruz, K. U., Hernández-Livera, A., Escalante-Estrada, J. A. S. & Domínguez-Martínez, P. A. (2023). Tamaño de semilla y su efecto sobre el crecimiento de plántulas de *Cajanus cajan* (L.) Millsp. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(4A), 497-497. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4A.497>
- Milberg, P., Andersson, L., Elfverson, C. & Regner, S. (1996). Germination characteristics of seeds differing in mass. *Seed Science Research*, 6(4), 191-198. <https://doi.org/10.1017/S0960258500003251>
- Monroy-Vázquez, M. E., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, J. R., Solano-Camacho, E., Campos, H. & García-Villanueva, E. (2017). Imbibición, viabilidad y vigor de semillas de cuatro especies de *Opuntia* con grado distinto de domesticación. *Agrociencia*, 51(1), 27-42.
- Morante-Carriel, J., Alba-Landa, J. & Mendizábal-Hernández, L. del C. (2005). Estudio de conos, semillas y plántulas de *Pinus greggii* Engelm. de una población del estado de Veracruz, México. *Forestal Veracruzana*, 7(2), 23-31.
- Muñoz-Flores, H. J., Sáenz-Reyes, J., Gómez-Cárdenas, M., Hernández-Ramos, J. & Barrera-Ramírez, R. (2023). Variación morfológica en semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. altamente productores de resina. *Acta Universitaria*, 33, e3549. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3549>

- Ortiz-Mendoza, R., Aguirre-Calderón, O. A., Gómez-Cárdenas, M., Treviño-Garza, E. J., & González-Tagle, M. A. (2021). Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64), 4-22. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.710>
- Pastorino, M., & Gallo, L. (2000). Variación geográfica en peso de semilla en poblaciones naturales argentinas de “Ciprés de la Cordillera”. *Bosque*, 21(2), 95-109. <https://doi.org/10.4206/bosque.2000.v21n2-08>
- Rodríguez-Laguna, R., Razo-Zárate, R., Juárez-Muñoz, J., Capulín-Grande, J. & Soto-Gutiérrez, R. (2012). Tamaño de cono y semilla en procedencias de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* establecidas en diferentes suelos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 289-298.
- Rodríguez-Laguna, R., Valencia-Manzo, S., Meza-Rangel, J., Capó-Arteaga, M. Á. & Reynoso-Pérez, A. (2008). Crecimiento y características de la copa de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Galeana, Nuevo León. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(1), 19-26.
- Rubio-Licona, L. E., Romero-Rangel, S., Rojas-Zenteno, E. C., Durán-Díaz, Á. & Gutiérrez-Guzmán, J. C. (2011). Variación del tamaño de frutos y semillas en siete especies de encino (*Quercus*, *Fagaceae*). *Polibotánica*, 32, 135-151.
- Sánchez-Mendoza, J. L., Jiménez Casas, M., Ramírez Herrera, C. & Viveros Viveros, H. (2023). Seed quality and plant growth in populations and altitudes of *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(75), 143-165. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1297>
- Sáenz, R., Muñoz, F., & Rueda, S. (2011). *Especies promisorias de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.
- Institute SAS. (2024). The SAS system for Windows user's guide. Release 9.4. SAS Institute, Cary, NC.
- Simoes-Macayo, N. & Renison, D. (2015). ¿Cuántos años monitorear el éxito de plantaciones con fines de restauración?: Análisis en relación al micrositio y procedencia de las semillas. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 315-322. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200016>
- Vázquez-López, M. S., Vázquez-Badillo, M. E., Antonio-Bautista, A., & Mancera-Rico, A. (2021). Hongos en semillas de *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. Almacenadas bajo dos humedades relativas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), 165-180. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.689>
- Viveros-Viveros, H., Tapia-Olivares, B. L. & Sáenz-Romero, C. (2014). Variación isoenzimática de *Pinus pseudostrobus* Lindl. a lo largo de un gradiente altitudinal en Michoacán, México. *Agrociencia*, 48(7), 713-723.

Optimización del enraizamiento y brotación en esquejes de *Bougainvillea glabra* Choisy con reguladores de crecimiento

Optimization of rooting and sprouting in *Bougainvillea glabra* Choisy cuttings using growth regulators

¹Aldo Daniel Chan-Arjona^{ID}, ²Julio Cesar Ahuatzin-Hernández^{ID}, ⁴René Garruña-Hernández^{ID}, ³Roberto Rafael Ruiz-Santiago^{ID}

¹Tecnológico Nacional de México (TecNM). Instituto Tecnológico de Conkal. Conkal, Yucatán. México.

²Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Unidad Sureste. Mérida, Yucatán. México. ³Centro de Investigación Científica de Yucatán. Unidad de Recursos Naturales, Laboratorio Regional para el Estudio y Conservación de Germoplasma. Mérida, Yucatán. México.

⁴Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Instituto Tecnológico de Conkal. Conkal, Yucatán. México. [§]Autor de correspondencia: (jahuatzin.al@ciatej.edu.mx).

Resumen

La propagación por esquejes de *Bougainvillea glabra* Choisy es una práctica clave en viveros ornamentales, pero su eficiencia depende de señales hormonales exógenas. El objetivo fue evaluar el efecto de tres reguladores de crecimiento vegetal (*RCV*) comerciales sobre el desempeño de esquejes de *B. glabra*. A los 60 días después del trasplante se registraron variables que se analizaron mediante análisis de varianza y separación de medias (Tukey, 0.05). Todos los *RCV* mejoraron significativamente las variables respecto al control; BioGib promovió el crecimiento aéreo, con la mayor formación de brotes (5.78) y el mayor número de hojas (35.5). ProRoot destacó en el desarrollo radicular, maximizando el número de raíces primarias. La combinación estratégica de GA_3 y auxinas puede optimizar la producción de plántulas de *B. glabra* con una arquitectura aérea y radicular superior en condiciones de vivero. Estos hallazgos ofrecen criterios prácticos para seleccionar *RCV* según el objetivo y las restricciones operativas del vivero.

Palabras clave: ácido salicílico, auxinas, esquejes ornamentales, giberelinas, reproducción asexual

Abstract

Vegetative propagation through cuttings of *Bougainvillea glabra* Choisy is a key practice in

ornamental nurseries; however, its efficiency depends strongly on exogenous hormonal cues. The objective of this study was to evaluate the effects of three commercial plant growth regulators (*PGRs*) on the growth performance of *B. glabra* cuttings. All variables were measured 60 days after transplanting (*DAT*) and analyzed using analysis of variance, and means were separated using Tukey's test ($\alpha = 0.05$). All *PGRs* significantly improved the assessed variables compared with the control. BioGib enhanced shoot growth, resulting in the highest values for shoot formation (5.78) and leaf number (35.5). ProRoot performed best in root development, producing the greatest number of primary roots. These results indicate that an appropriate combination of GA_3 and auxins can optimize the production of uniform and vigorous *B. glabra* plantlets under nursery conditions. Overall, this study provides practical criteria for selecting *PGRs* according to specific production goals and operational constraints in nursery systems.

Index words: salicylic acid, auxins, ornamental cuttings, gibberellins, asexual propagation

Introducción

La *Bougainvillea glabra* Choisy perteneciente a la familia Nyctaginaceae, es una especie originaria de América del Sur ampliamente reconocida por su valor ornamental, debido a su floración vistosa y prolongada. Su nombre común varía

geográficamente según donde se produzca, siendo conocida como buganvilla, gloria del jardín y flor de papel (Fabricant y Farnsworth, 2001; Gobato et al., 2016). Gracias a su adaptabilidad a diversos climas y bajos requerimientos de manejo, esta especie es ampliamente utilizada en jardinería urbana y paisajismo, especialmente en regiones tropicales y subtropicales (Elumalai et al., 2012). Pese a sus ventajas ornamentales, la propagación sexual de *B. glabra* se ve limitada por la baja viabilidad y germinación irregular de sus semillas, lo cual ha motivado el uso preferentemente de métodos de propagación asexual, particularmente por esquejes (Datta et al., 2022; Shrestha et al., 2023). Sin embargo, este método enfrenta limitantes relacionadas con la formación de raíces y el desarrollo vegetativo inicial (Lin et al., 2024; Pacurar et al., 2014), ya que el éxito del enraizamiento depende de una compleja interacción de factores endógenos y ambientales que determinan la capacidad morfológica y genética del tejido (Druege et al., 2019).

El uso de reguladores de crecimiento vegetal (*RCV*) se ha consolidado como una herramienta biotecnológica capaz de optimizar la propagación asexual. Los *RCV* son compuestos de origen natural o sintético que modulan procesos fisiológicos en las plantas, como la división y elongación celular, la formación de raíces, la floración y el cuajado de frutos (Bhatla et al., 2018; Small y Degenhardt, 2018). En la propagación asexual, su aplicación promueve la diferenciación de tejidos y acelera el establecimiento de los esquejes, lo que resulta crucial para especies de interés ornamental. Entre los *RCV* más empleados en este proceso se destacan las auxinas, como el ácido indolacético (*IAA*), el ácido indolbutírico (*IBA*) y el ácido naftalenacético (*ANA*), debido a su capacidad para aumentar el número de raíces y estimular el crecimiento de tejidos meristemáticos (Finet y Jaillais, 2012; Bhatla et al., 2018; Kaewchangwat et al., 2020; Vaishnav y Chowdhury, 2023).

No obstante, aunque el uso de *RCV* ha demostrado eficacia general en la propagación por esquejes, su desempeño es marcadamente específico de especie y cultivar, y depende de la

dosis, la formulación y el estado fisiológico del material vegetal (Campbell et al., 2021). En ornamentales leñosas, se han documentado respuestas no lineales e incluso compensaciones entre variables (Lakehal y Bellini, 2019). Por ejemplo, las giberelinas que pueden favorecer la brotación aérea pero reducir el número de raíces al alterar la homeostasis de las auxinas, o el ácido salicílico (*AS*) cuyo efecto sobre el enraizamiento es fuertemente dosis-dependiente (Mauriat et al., 2014; Pasternak et al., 2019). Para *B. glabra*, la evidencia comparativa entre auxinas sintéticas (*IBA/ANA*) y reguladores no auxínicos (*GA₃, AS*) es escasa, dispersa y poco estandarizada, lo que dificulta definir protocolos reproducibles en condiciones de vivero tropical. En este contexto, el aporte de este trabajo radica en (i) comparar los *RCV* más representativos en el mercado bajo un diseño experimental uniforme; (ii) cuantificar de manera puntual el enraizamiento y el desempeño vegetativo temprano; y (iii) proveer criterios prácticos para la selección de tratamientos con base en eficacia biológica y viabilidad operativa en vivero. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes reguladores de crecimiento vegetal en la propagación asexual de *B. glabra*, con énfasis en su influencia sobre el enraizamiento, desarrollo vegetativo y viabilidad económica, a fin de optimizar la obtención de plantas con una arquitectura aérea y radicular superior con potencial comercial en la horticultura ornamental.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en áreas experimentales del Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI) del Tecnológico Nacional de México - Campus Conkal, ubicada en Avenida Tecnológico s/n, Conkal, Yucatán, México; durante los meses de agosto a octubre del 2023. La temperatura media mensual del sitio fue de 27.1 °C, la máxima de 33.0 °C y la mínima fue de 21.0 °C. La precipitación media mensual fue de 100.66 mm.



Figura I. Esquejes de *Bougainvillea* antes de la aplicación de los reguladores de crecimiento.

Material vegetal y tratamientos

Se colectaron esquejes de *B. glabra* a partir de una planta madre sana y libre de enfermedades, de aspecto vigoroso, procedente de jardines ubicados en el Campus Conkal. Los esquejes fueron rectos, con 18-20 cm de longitud y 1.5-2 cm de diámetro, de acuerdo con recomendaciones publicadas para la propagación por esquejes de esta especie (Fanego et al., 2009; Ibironke, 2019) (Figura I). Inmediatamente después de su obtención, se retiró completamente el follaje y los esquejes se mantuvieron en agua destilada hasta la aplicación de los tratamientos, a fin de evitar su deshidratación.

Posteriormente, se establecieron cuatro tratamientos basados en productos comerciales con compuestos activos: ácido naftalenacético + ácido indolbutírico (ProRoot®), ácido giberélico

(BioGib®), ácido salicílico (grado reactivo) y agua destilada como control (Tabla I). Para el caso de BioGib y ProRoot se utilizó la dosis recomendada por el fabricante, la solución del AS se preparó siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez-Coronado et al. (1998), la cual consiste en partir del peso molecular ($138.12 \text{ g mol}^{-1}$). Se preparó una solución madre de 10^{-2} M y se ajustó a la concentración de $1 \mu\text{M}$. El producto se pesó en una balanza analítica (PK-2401, Denver Instrument, EE. UU.) y posteriormente se disolvió en agua destilada. Se asignaron aleatoriamente 12 esquejes por tratamiento, las cuales se sometieron a inmersión en las respectivas soluciones durante 10 minutos. Finalmente, los esquejes se colocaron en contenedores de plástico de 1 L de volumen y como sustrato de anclaje de raíces se utilizó agrolita.

Tabla I. Reguladores de crecimiento utilizados para la reproducción asexual de esquejes de buganvilia.

Tratamiento	Contenido	Concentración (%)	Dosis
Control	Agua	Normal	
ProRoot®	Ácido naftalenacético + ácido indolbutírico	0.30 + 0.02	0.5 g L ⁻¹
BioGib®	Ácido giberélico	10	0.8 g L ⁻¹
Ácido salicílico	Ácido salicílico	Grado reactivo	1 μmol L ⁻¹

Diseño experimental y variables evaluadas

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (*DCA*) con tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental consistió en un contenedor con cuatro esquejes, conformando un total de 12 esquejes por tratamiento evaluado ($n = 48$), cuyos valores se promediaron para el análisis. El crecimiento de los esquejes se evaluó a los 60 días después del trasplante (*DDT*). Las variables registradas en los esquejes fueron: número de brotes por esqueje, número total de hojas, número de raíces primarias y área foliar total (cm^2). El conteo de brotes, hojas y raíces se realizó manualmente, mientras que el área foliar se determinó con un medidor de área portátil (LI-3000C, LI-COR, Lincoln NE, EE. UU.).

Análisis de datos

La validación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad se realizó sobre los residuos de las variables de respuesta, utilizando las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene ($\alpha = 0.05$), respectivamente. Para las variables cuyos residuos no cumplieron con estos supuestos, se procedió a la transformación de los datos: raíz cuadrada \sqrt{x} para el número de brotes y raíces, y logaritmo natural $\ln(x)$ para el área foliar. Se realizó análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0.05$). Todos los análisis fueron ejecutados con el paquete estadístico InfoStat, versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

Resultados y discusión

Los tratamientos mostraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas (**Figura 2**).

La aplicación de BioGib indujo la mayor formación de brotes (6), superando a ProRoot (3) y al control (2) (**Figura 2a**). Estos resultados coinciden con lo reportado por Gad et al. (2016), quienes observaron un mayor número de brotes en *Ixora coccinea* L. (coralito asiático) tratada con ácido giberélico (GA_3) en comparación con el tratamiento de *AS*. De forma similar, Sevik y Güney (2013) reportaron que la aplicación de GA_3

incrementó significativamente la brotación en *Melissa officinalis* L., comparada con el tratamiento de ácido I-naftalenacético. Esto puede explicarse debido a que las giberelinas actúan degradando las proteínas DELLA. Estas proteínas son reguladores negativos del crecimiento que interfieren con factores de transcripción para suprimir la expresión de genes de expansión celular, su degradación por GA_3 libera esos factores para activar rutas de crecimiento (Xue et al., 2022). Al liberarse dichos factores, se activan genes de aflojamiento de la pared celular, como las expansinas (expansin), las xiloglucano endotransglucosilasa/hidrolasa (xth) y los genes gasa. Los genes *expansin* codifican proteínas que otorgan extensibilidad a la pared celular al romper interacciones no covalentes entre microfibrillas de celulosa y hemicelulosa, lo que permite el deslizamiento de las fibras bajo presión de turgencia (Sampedro y Cosgrove, 2005; Cosgrove, 2024). Los genes *xth* codifican enzimas que reestructuran la red de xilano-celulosa mediante cortes y reconexiones de cadenas de xilanos, facilitando la expansión celular bajo condiciones de crecimiento. Por su parte, los genes de la familia gasa codifican moléculas pequeñas secretadas que regulan el crecimiento celular y modulan la homeostasis hormonal, contribuyendo al desarrollo y a la respuesta al estrés (Han et al., 2021). Todos estos mecanismos actúan en conjunto para acelerar la división y elongación de células meristemáticas (Thomas et al., 2005; Ito et al., 2018; Bouteraa et al., 2023). En condiciones naturales, los brotes y hojas formados durante otoño requieren de estímulos abióticos específicos para reactivar su desarrollo, como el fotoperiodo creciente y temperatura primaveral (Saleem et al., 2021), sin embargo, la aplicación exógena de GA_3 puede sustituir tales señales, desencadenando una brotación más temprana y vigorosa.

ProRoot se destacó en el número de raíces por esqueje (6.82) (**Figura 2b**); después de su absorción, el *IBA* se β -oxida a *IAA* en los peroxisomas, esta auxina, junto con el *ANA*, activan los factores *ARF7/ARF19* y los genes *LBD16/18/29* que reprograman células del floema para originar raíces adventicias, procesos en

los que también intervienen transportadores de flujo de auxinas y señales inducidas por el corte (Hoermayer et al., 2020; Li et al., 2020; Lee et al., 2019). Este mecanismo se sustenta en la evidencia de que las rutas ARF/LBD constituyen el núcleo transcripcional que regula la organogénesis radicular en plantas superiores (Hu et al., 2018). Diversos estudios en ornamentales han documentado que el uso de auxinas sintéticas, como *IBA* y *ANA*, incrementa significativamente el porcentaje de enraizamiento y la longitud de raíces en esquejes (Elmongy et al., 2018; Saeed y Amin, 2020; Kentelky et al., 2021; Sourati et al., 2022; Sivakumar et al., 2024). Nuestros resultados también concuerdan con estudios en *B. glabra* que señalan que dosis de 1000 mg L⁻¹ de *IBA* pueden generar más de 34 raíces por esqueje, lo que resalta la plasticidad de la especie a la señal de auxinas (Shrestha et al., 2023). Esto es fundamental, ya que un sistema radicular abundante mejora el anclaje y la absorción hídrica, factores determinantes de la supervivencia post-trasplante (**Figura 3**).

BioGib fue superior a los demás tratamientos con 35.1 hojas por esqueje (**Figura 2c**); la mayor activación de yemas discutida previamente inducida por *GA₃* incrementa los puntos de iniciación foliar y, además, promueve la expansión foliar mediante la reorientación de microtúbulos y el ablandamiento de la pared celular (Ito et al., 2018). De igual manera, este proceso está asociado con la activación de genes expansin, cuyo aumento de expresión promueve la extensibilidad de la pared celular y, por ende, el crecimiento foliar (Wang et al., 2024). Resultados similares a los obtenidos en este estudio fueron observados por Sardoei y Shahdadnegahd (2015) en *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch., donde la aplicación de *GA₃* y *AS* favoreció una mayor emisión de hojas y un área foliar superior, en comparación con el control. Esto es especialmente benéfico para la producción de plantas en vivero, ya que un dosel denso desarrollado en etapas tempranas mejora la asimilación de carbono y favorece la lignificación posterior de los esquejes, aspectos clave para la calidad de plántulas ornamentales.

El mismo tratamiento con BioGib destacó el área foliar por esqueje (63.33 cm²) (**Figura 2d**); el alargamiento celular mediado por *GA₃* incrementa la turgencia vacuolar y, a la vez, adelgaza la pared secundaria, lo que permite desarrollar hojas más amplias sin comprometer la integridad mecánica (Cho y Kende, 1997). La expansión foliar temprana se correlaciona directamente con la captación de luz solar y, por ende, con una mayor acumulación de biomasa útil para los viveros.

Cabe destacar que el *AS* no fue el más destacado en ninguna de las variables, en comparación con ProRoot y BioGib, pero sí incrementó más de cuatro veces el número de raíces, hojas y área foliar frente al control. Su acción se asocia con la regulación de óxido nítrico y especies reactivas de oxígeno, lo que eleva las enzimas antioxidantes *SOD*, *APX* y *CAT*. Este entorno redox más estable favorece la iniciación de raíces y reduce el marchitamiento post-injerto (Yang et al., 2013; Koo et al., 2020; Emamverdian et al., 2020). Desde el punto de vista económico, los tres reguladores evaluados son una opción asequible para su incorporación a los procesos operativos de un vivero comercial. BioGib (10 % *GA₃*) se etiqueta para usarse típicamente entre 10 y 40 g por cada 100 L de agua (0.10-0.40 g L⁻¹), rango que genera un costo aproximado de \$ 1.5 – 6.0 pesos mexicanos (MXN) por litro de solución (~\$150 MXN por 10 g). ProRoot se recomienda entre 100 (0.5 g L⁻¹) y 400 g (4 g L⁻¹); con un precio comercial aproximado de \$372 MXN por 500 g de producto, oscilando su costo operativo entre \$0.37 y 2.98 MXN L⁻¹, lo que lo ubica como la opción de menor inversión cuando se aplica en dosis bajas para trasplante o drench. Para el *AS*, los ensayos hortícolas reportan concentraciones efectivas de 1 µmol L⁻¹ (0.14 mg L⁻¹) (Dzib-Ek et al., 2021); a un precio típico de aproximadamente \$2 865 MXN por 1 kg (~ \$2.9 MXN g⁻¹), el costo resultante es prácticamente simbólico (0.0004 MXN L⁻¹), por lo que resulta la alternativa más económica de los tres. En síntesis, aunque BioGib requiere el mayor gasto económico por litro, su desempeño superior en todas las variables aéreas justifica la inversión; ProRoot, más económico y destacado en el desarrollo radicular,

podría complementar de forma óptima a BioGib, mientras que el uso opcional de AS puede reservarse para situaciones de estrés donde su beneficio antioxidante compense su inversión o en situaciones de recorte económico. De este modo, la decisión de incorporar estos reguladores queda justificada tanto por su rendimiento fisiológico como por su accesibilidad económica a largo plazo.

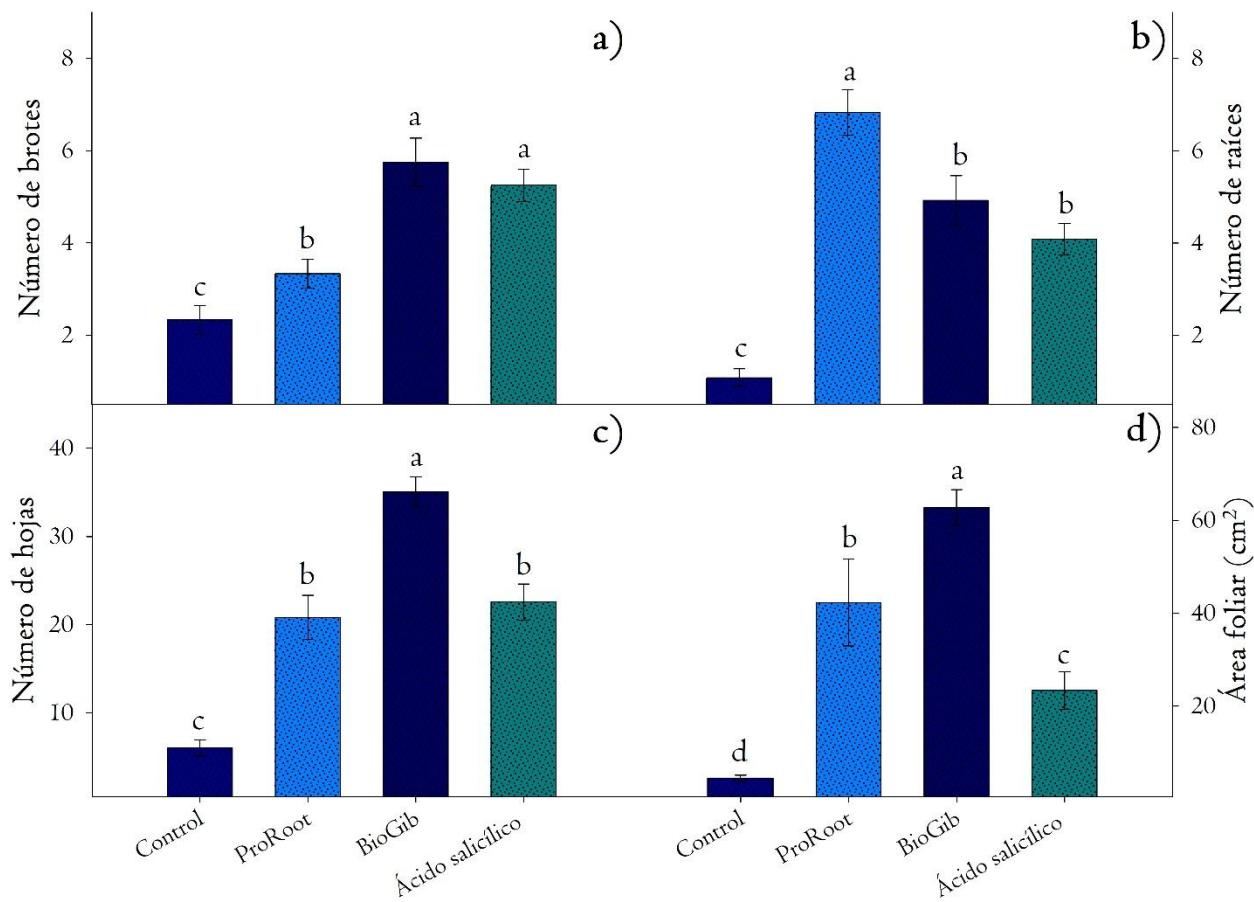


Figura 2. Crecimiento vegetal de esquejes de *Bougainvillea* como efecto de la aplicación de reguladores de crecimiento. Líneas verticales sobre las barras representan el error estándar de la media ($\pm \text{EE}$). Letras diferentes por variable indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). a) = número de brotes; b) = número de raíces; c) = número de hojas; d) = área foliar (cm^2).



Figura 3. Enraizamiento y mejoramiento de los órganos vegetales en esquejes de *Bougainvillea* como efecto de la aplicación de reguladores de crecimiento.

Conclusiones

La aplicación de reguladores de crecimiento vegetal tiene un impacto significativo positivo sobre la propagación asexual de *Bougainvillea glabra* Choisy. En particular, el tratamiento con BioGib promovió desarrollo vegetativo superior, reflejado en el número de brotes, hojas y área foliar total. El tratamiento con ProRoot mostró un efecto sobresaliente en la formación de raíces, lo que confirma su eficacia como inductor radicular en *B. glabra*. Estos hallazgos subrayan la relevancia del uso dirigido de fitohormonas según el objetivo fisiológico deseado, ya sea la brotación aérea o radicular, y reafirman que su aplicación exógena representa una estrategia efectiva para optimizar la propagación vegetativa de la buganvilla bajo condiciones controladas. En conjunto, los tratamientos con BioGib, ProRoot y AS mostraron una respuesta significativamente superior al control, lo que refuerza su potencial como herramientas biotecnológicas en la horticultura ornamental.

Referencias

- Bhatla, S.C., Lal, A.M., & Bhatla, S.C. (2018). Plant growth regulators: An overview. En S.C. Bhatla & A.M. Lal (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism* (pp. 559–568).
- Bouteraa, M.T., Ben Romdhane, W., Baazaoui, N., Alfaifi, M.Y., Chouaibi, Y., Ben Akacha, B., Ben Hsouna, A., Kačániová, M., Čavar Zeljković, S., Garzoli, S. & Ben Saad, R. (2023). GASA proteins: Review of their functions in plant environmental stress tolerance. *Plants*, 12(10), 2045. <https://doi.org/10.3390/plants12102045>
- Campbell, S. M., Anderson, S. L., Brym, Z., & Pearson, B. J. (2021). Evaluation of substrate composition and exogenous hormone application on vegetative propagule rooting success of essential oil hemp (*Cannabis sativa* L.). *bioRxiv Preprint*. <https://doi.org/10.1101/2021.03.15.435449>

- Cho, H. T., & Kende, H. (1997). Expression of expansin genes is correlated with growth in deepwater rice. *The Plant Cell*, 9(9), 1661–1671. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.9.1661>
- Cosgrove, D. J. (2024). Plant cell wall loosening by expansins. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 40, 329-352. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-111822-115334>
- Datta, S.K., Jayanthi, R., & Janakiram, T. (2022). *Bougainvillea*. En T. Janakiram & R. Jayanthi (Eds.), *Floriculture and Ornamental Plants* (pp. 643–675).
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. (2020). *InfoStat (Versión 2020)* [Computer software]. Universidad Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar>
- Druege, U., Hilo, A., Pérez-Pérez, J. M., Klopotek, Y., Acosta, M., Shahinnia, F., Zerche, S., Franken, P., & Hajirezaei, M. R. (2019). Molecular and physiological control of adventitious rooting in cuttings: Phytohormone action meets resource allocation. *Annals of Botany*, 123(6), 929–949. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy234>
- Dzib-Ek, G., Villanueva-Couoh, E., Garruña-Hernández, R., Vergara-Yoisura, S., & Larqué-Saavedra, A. (2021). Effect of salicylic acid on tomato germination and root growth. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), 735 – 740. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2642>
- Elmongy, M.S., Cao, Y., Zhou, H., & Xia, Y. (2018). Root development enhanced by indole-3-butyric acid and naphthalene acetic acid and associated biochemical changes of in vitro azalea microshoots. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37, 813–825.
- Elumalai, A., Eswaraiah, M.C., Lahari, K.M., & Shaik, H.A. (2012). In vivo screening of *Bougainvillea glabra* leaves for analgesic, antipyretic and anti-inflammatory activities. *Asian Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*, 2(3), 85–87.
- Emamverdian, A., Ding, Y., & Mokhberdoran, F. (2020). The role of salicylic acid and gibberellin signaling in plant responses to abiotic stress with emphasis on heavy metals. *Plant Signaling & Behavior*, 15(7), 1777372. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1777372>
- Fabricant, D.S., & Farnsworth, N.R. (2001). The value of plants used in traditional medicine for drug discovery. *Environmental Health Perspectives*, 109(1), 69–75.
- Fanego, A., Soto, R. & Martínez, S. (2009). Brotación y enraizamiento de estacas procedentes de diferentes secciones de las ramas de *Bougainvillea glabra* Choisy. *Centro Agrícola*, 36(3), 9–13.
- Finet, C. & Jaillais, Y. (2012). Auxology: When auxin meets plant evo-devo. *Developmental Biology*, 369(1), 19–31.
- Gad, M.M., Abdul-Hafeez, E.Y., & Ibrahim, O.H.M. (2016). Foliar application of salicylic acid and gibberellic acid enhances growth and flowering of *Ixora coccinea* L. plants. *Journal of Plant Production*, 7(1), 85–91. <https://doi.org/10.21608/jpp.2016.43477>
- Gobato, R., Gobato, A., & Fedrigo, D. (2016). Study of the molecular electrostatic potential of D-pinitol, an active hypoglycemic principle found in spring flower “Three Marys” (*Bougainvillea* spp.), using the MM+ method. *Parana Journal of Science and Education*, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i3.1389>
- Gutiérrez-Coronado, M. A., Trejo-López, C. & Larqué-Saavedra, A. (1998). Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiology and Biochemistry*, 36(8), 563–565.
- Han, S., Jiao, Z., Niu, M.-X., Yu, X., Huang, M., Liu, C., Wang, H.-L., Zhou, Y., Mao, W., Wang, X., Yin, W. & Xia, X. (2021). Genome-wide comprehensive analysis of the GASA gene family in *Populus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12336. <https://doi.org/10.3390/ijms222212336>
- Hoermayer, L., Montesinos, J.C., Marhava, P., Benková, E., Yoshida, S., & Friml, J. (2020).

- Wounding-induced changes in cellular pressure and localized auxin signalling spatially coordinate restorative divisions in roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(26), 15322–15331.
- Hu, J., Israeli, A., Ori, N. & Sun, T.-P. (2018). The interaction between DELLA and ARF/IAA mediates crosstalk between gibberellin and auxin signaling to control fruit initiation in tomato. *The Plant Cell*, 30(8), 1710–1728.
<https://doi.org/10.1105/tpc.18.00363>
- Ibironke, O. A. (2019). Root initiation of *Bougainvillea* from cuttings using different rooting hormones. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 9(1), 121–125.
<https://doi.org/10.15406/apar.2019.09.00421>
- Ito, T., Okada, K., Fukazawa, J., & Takahashi, Y. (2018). DELLA-dependent and DELLA-independent gibberellin signaling. *Plant Signaling & Behavior*, 13(3), e1445933.
<https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1445933>
- Kaewchangwat, N., Thanayupong, E., Jarussophon, S., Niamnont, N., Yata, T., Prateepchinda, S., & Suttisintong, K. (2020). Coumarin-caged compounds of 1-naphthaleneacetic acid as light-responsive controlled-release plant root stimulators. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(23), 6268–6279.
- Kentelky, E., Jucan, D., Cantor, M. & Szekely-Varga, Z. (2021). Efficacy of different concentrations of NAA on selected ornamental woody shrubs cuttings. *Horticulturae*, 7(1), 464.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7110464>
- Koo, Y. M., Heo, A. Y., & Choi, H. W. (2020). Salicylic acid as a safe plant protector and growth regulator. *The Plant Pathology Journal*, 36(1), 1–10.
<https://doi.org/10.5423/PPJ.RW.12.2019.0295>
- Lakehal, A., & Bellini, C. (2019). Control of adventitious root formation: Insights into synergistic and antagonistic hormonal interactions. *Physiologia Plantarum*, 165(1), 90–100.
<https://doi.org/10.1111/ppl.12823>
- Lee, H. W., Cho, C., Pandey, S. K., Park, Y., Kim, M.-J., & Kim, J. (2019). LBDI6 and LBDI8 acting downstream of ARF7 and ARF19 are involved in adventitious root formation in Arabidopsis. *BMC Plant Biology*, 19(1), 46.
<https://doi.org/10.1186/s12870-019-1659-4>
- Li, Y.H., Mo, Y.W., Wang, S.B., & Zhang, Z. (2020). Auxin efflux carriers, MiPINs, are involved in adventitious root formation of mango cotyledon segments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 150, 15–26.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.028>
- Lin, H., Xu, J., Wu, K., Gong, C., Jie, Y., Yang, B., & Chen, J. (2024). An efficient method for the propagation of *Bougainvillea glabra* 'New River' (Nyctaginaceae) from in vitro stem segments. *Forests*, 15(3), 519.
<http://doi.org/10.3390/F15030519>
- Mauriat, M., Petterle, A., Bellini, C., & Moritz, T. (2014). Gibberellins inhibit adventitious rooting in hybrid aspen and Arabidopsis by affecting auxin transport. *The Plant Journal*, 78(3), 372–384.
<http://doi.org/10.1111/tpj.12478>
- Pacurar, D. I., Perrone, I., & Bellini, C. (2014). Auxin is a central player in the hormone cross-talks that control adventitious rooting. *Physiologia Plantarum*, 151(1), 83–96.
<https://doi.org/10.1111/ppl.12171>
- Pasternak, T., Groot, E. P., Kazantsev, F. V., Teale, W., Omelyanchuk, N., Kovrizhnykh, V., Palme, K., & Mironova, V. V. (2019). Salicylic acid affects root meristem patterning via auxin distribution in a concentration-dependent manner. *Plant Physiology*, 180(3), 1725–1739.
<https://doi.org/10.1104/pp.19.00130>
- Saeed, A., & Amin, T. (2020). Effects of location, gender and indole-3-butryic acid on rooting of *Laurus nobilis* L. semi-hardwood stem cuttings. *Agricultural Science and Technology*,

- 12(3), 260–263.
<https://doi.org/10.15547/ast.2020.03.041>
- Saleem, H., Usman, A., Mahomoodally, M.F., & Ahemed, N. (2021). *Bougainvillea glabra* (Choisy): A comprehensive review on botany, traditional uses, phytochemistry, pharmacology and toxicity. *Journal of Ethnopharmacology*, 266, 113356.
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113356>
- Sampedro, J., & Cosgrove, D. J. (2005). The expansin superfamily. *Genome Biology*, 6(12), 242. <https://doi.org/10.1186/gb-2005-6-12-242>
- Sardoei, A. S., & Shahdadneghad, M. (2015). Effect of salicylic acid synergists on rooting softwood cuttings of poinsettia (*Euphorbia pulcherrima*). *Journal of Plant Sciences*, 10(5), 206–209.
<https://doi.org/10.3923/jps.2015.206.209>
- Sevik, H. & Güney, K. (2013). Effects of IAA, IBA, NAA, and GA₃ on rooting and morphological features of *Melissa officinalis* L. stem cuttings. *The Scientific World Journal*, 2013(1), 909507.
<https://doi.org/10.1155/2013/909507>
- Shrestha, J., Bhandari, N., Baral, S., Marahatta, S.P., & Pun, U. (2023). Effect of rooting hormones and media on vegetative propagation of *Bougainvillea*. *Ornamental Horticulture*, 29(3), 397–406.
<https://doi.org/10.1590/2447-536X.v29i3.2637>
- Sivakumar, B., Senthilkumar, P., Deivamani, M., Sasikumar, K., Ayyadurai, P., Govindan, K., Senthilkumar, T. y Mangammal, P. (2024). Influence of IBA and NAA on rooting of terminal cuttings of chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* L.). *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(10), 680–685.
https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i10_2493
- Small, C.C., & Degenhardt, D. (2018). Plant growth regulators for enhancing revegetation success in reclamation: A review. *Ecological Engineering*, 118, 43–51.
- <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.010>
- Sourati, R., Sharifi, P., Poorghasemi, M., Alves Vieira, E., Seidavi, A., Anjum, N.A., & Sofo, A. (2022). Effects of naphthaleneacetic acid, indole-3-butyric acid and zinc sulfate on the rooting and growth of mulberry cuttings. *International Journal of Plant Biology*, 13(3), 245–256.
<https://doi.org/10.3390/ijpb13030021>
- Thomas, S.G., Rieu, I., & Steber, C.M. (2005). Gibberellin metabolism and signaling. *Vitamins and Hormones*, 72, 289–338.
[https://doi.org/10.1016/S0083-6729\(05\)72009-4](https://doi.org/10.1016/S0083-6729(05)72009-4)
- Vaishnav, D., & Chowdhury, P. (2023). Types and function of phytohormones and their role in stress. En P. Chowdhury (Ed.), *Plant Abiotic Stress Responses and Tolerance Mechanisms*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.109325>
- Wang, Z., Cao, J., Lin, N., Li, J., Wang, Y., Liu, W., Yao, W. & Li, Y. (2024). Origin, evolution, and diversification of the expansin family in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11814.
<https://doi.org/10.3390/ijms252111814>
- Xue, H., Gao, X., He, P., & Xiao, G. (2022). Origin, evolution, and molecular function of DELLA proteins in plants. *The Crop Journal*, 10(2), 287–299.
<https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.005>
- Yang, W., Zhu, C., Ma, X., Li, G., Gan, L., Ng, D., & Xia, K. (2013). Hydrogen peroxide is a second messenger in the salicylic-acid-triggered adventitious rooting process in mung bean seedlings. *PLoS ONE*, 8(12), e84580.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084580>

Diagnóstico y control de *Neopestalotiopsis rosae* Maharachch., KD Hyde & Crouses en cultivos hortícolas

Diagnosis and control of *Neopestalotiopsis rosae* Maharachch., KD Hyde & Crouses in horticultural crops

¹María Magdalena Cervantes-Zúñiga^{ID}, ¹Agustín Hernández-Juárez^{ID}, ¹Gabriel Gallegos-Morales^{ID}, ²Juan Carlos Delgado Ortiz^{ID}, ¹Epifanio Castro-del Ángel^{ID}

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo. México. ²Investigadoras e investigadores por México, CONAHCYT. [§]Autor de correspondencia: (epifanio.castro@uaaan.edu.mx)

Resumen

Neopestalotiopsis rosae (Maharachch., KD Hyde & Crouses) es un hongo emergente que ha causado pérdidas de rendimiento hasta el 70 % en México y otras partes del mundo, tomando importancia en los últimos años debido a que ocasiona enfermedades como la pudrición de la corona en diversos cultivos como la fresa. Actualmente la información sobre la descripción, identificación, control se encuentran dispersas es por eso que, el objetivo de esta revisión fue realizar un análisis profundo sobre las publicaciones, de la situación actual de *N. rosae* en el país, descripción, identificación y control, y las soluciones recientes que busquen mitigar los daños de este hongo. Se realizó una revisión bibliográfica de *N. rosae* en la siguiente base de datos: Google académico, Google Scholar, Scielo, Science Direct, Scopus y Redalyc. Se utilizaron las palabras claves: *Neopestalotiopsis rosae*, diagnóstico, identificación, morfológica, molecular, control, la recopilación de la información sobre la especie de *Neopestalotiopsis rosae* reportada. Se observaron los reportes recientes de la enfermedad y las técnicas para su diagnóstico nuevas que aportan información valiosa para la oportuna detección de la enfermedad. *N. rosae* se encuentra descrito y clasificado taxonómicamente, así como determinada su distribución geográfica y actualizados los nuevos reportes de su incidencia; sin embargo, es importante actualizar los reportes constantemente sobre todo en zonas de nuevas incidencias, por lo que es importante el desarrollo y conocimiento de técnicas de detección temprana

para su correcta y eficaz clasificación, que ayude a enfrentar al patógeno sin permitir que este afecte de manera significativa los cultivos.

Palabras clave: control, cultivos, identificación del fitopatógeno, pudrición de la corona.

Abstract

Neopestalotiopsis rosae (Maharachch., KD Hyde & Crouses) is a fungus emerging that has caused yield losses up to 70 % in Mexico and other parts of the world, taking importance in recent years because it causes diseases such as crown rot in various crops such as strawberry. Currently the information on the description, identification, control is dispersed, for this reason, the objective of this review was to perform an in-depth analysis of the publications, the current situation of *N. rosae* in the country, description, identification and control, and recent solutions that seek to mitigate the damage of this fungus. A bibliographic review of *N. rosae* was carried out in the following databases: Google Scholar, Google Scholar, Scielo, Science Direct, Scopus and Redalyc. The keywords were used: *Neopestalotiopsis rosae*, diagnosis, identification, morphological, molecular, Control, the collection of information on the species of *Neopestalotiopsis rosae* reported. The most recent reports of the disease and the newest diagnostic techniques were observed, which provide valuable information for the timely detection of the disease. *N. rosae* is described and classified taxonomically, as well as its geographic distribution determined and the new reports of its incidence updated; however it is important to update the reports constantly,

especially in areas of new incidences, so it is important to develop and know early detection techniques for its correct and effective classification, which helps to confront the pathogen without allowing it to significantly affect crops.

Index words: control, crops, phytopathogen identification, crown rot.

Introducción

Una gran diversidad de cultivos se ve altamente afectada por varios patógenos que disminuyen el rendimiento, así como la calidad, lo cual trae como resultado en pérdidas económicas importantes (Xu-J et al., 2022). Estos microorganismos patógenos pueden causar una variedad de enfermedades importantes, incluyendo la mancha foliar (*Mycosphaerella fragariae*), la podredumbre del fruto y del rizoma (*Botrytis* sp., *Phytophthora* spp. y *Collototrichum* sp.) y el marchitamiento (*Fusarium* spp. y *Verticillium* sp.), que no solo ocasionan pérdidas en el rendimiento cuantitativamente, sino que también tienen un impacto negativo en la calidad del fruto, volviéndola inservible para el mercado (Ghimire et al., 2023). Los patógenos obligan a los productores a aumentar los insumos agrícolas, es decir, los fungicidas y la mano de obra, lo que aumenta los costos de producción y complica las prácticas agrícolas (Sinuhaji et al., 2024). Recientemente algunos patógenos fúngicos emergentes como *Pestalotia* spp. se han reconocido cada vez más como amenazas graves en varios países productores de fresas, incluidos India, Israel, Egipto, Estados Unidos y Brasil (Schierling et al., 2024). Lo cual nos indica la importancia que tiene estas enfermedades y lo que conlleva a los desafíos de los productores para manejar estas enfermedades de manera adecuada. Entre estos hongos se encuentra *Neopestalotiopsis rosae*, surgido como un hongo fitopatógeno de importancia creciente en los últimos años (Acosta-González et al., 2024).

Pestalotia es un género y los hongos previamente agrupados bajo este género han sido clasificados bajo varios géneros como *Pestalotiopsis*, *Pseudopestalotiopsis* y *Neopestalotiopsis*, entre otros (Chen et al., 2021). En general, se sabe que los miembros que pertenecen al género *Pestalotiopsis*, incluida *Neopestalotiopsis* spp., causan enfermedades en una amplia gama de plantas hospedantes, incluida la fresa (Ayoubi y Soleimani, 2016). Estas enfermedades a menudo provocan síntomas como manchas en las hojas, podredumbre de la fruta y tizón, y pueden ser importantes en climas húmedos y cálidos que favorecen el crecimiento de hongos (Baggio et al., 2021). Los informes de varias regiones indican que los patógenos relacionados se asociaron con la producción de fresas en varios países.

Neopestalotiopsis rosae es un hongo fitopatógeno que ha sido identificado en varias regiones del mundo, incluyendo México, en Guanajuato, se han observado infecciones en cultivos de fresa, principalmente en los municipios donde la producción de esta fruta es significativa (Álvarez et al., 2024). En 2018, en el municipio de Jacona, Michoacán, se inició la investigación de una enfermedad desconocida que provocaba el colapso de las plantas de fresa, mostrando un alto potencial de daño. Algunos productores tuvieron que replantar varias veces y en algunos casos hubo pérdidas totales de las plantaciones. Las pérdidas estimadas en la región ascendieron a 2500 millones de pesos (Senasica, 2022). En 2021, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (Siap) reportó en Irapuato una producción de 64.04 t ha⁻¹ cosechadas, mientras que en 2023 reportó una producción de 64.18 t ha⁻¹ cosechadas.

Las plantas infectadas por *N. rosae* suelen mostrar síntomas como manchas foliares, lesiones en tallos y frutos, y en casos severos, marchitez y muerte de la planta, estos síntomas pueden llevar a pérdidas económicas significativas para los productores, el desarrollo de este fitopatógeno es favorecido por condiciones de alta humedad y temperaturas moderadas (Baggio et al., 2021).

Desde una perspectiva taxonómica, *N. rosae* se ha identificado como una especie distinta dentro del género *Neopestalotiopsis*, caracterizado por su amplia gama de hospedantes vegetales, en cuanto a sus características morfológicas, el hongo se presenta como una colonia que varía en color desde blanco hasta gris oscuro en los medios de cultivo, sus estructuras reproductivas, conocidas como conidios, son cilíndricas o fusiformes, y se agrupan en conidióforos ramificados (Rebollar-Alviter et al., 2020).

En México, *N. rosae* ha sido identificada como un agente causal de pudrición de raíz, pudrición de corona y mancha foliar en fresas, marcando los primeros reportes en el país de esta especie infectando cultivos de fresa (Rebollar-Alviter et al., 2020). Al mismo tiempo, se ha reportado que *N. rosae* causa tizón foliar y pudrición de corona en Taiwán en cultivares de fresa (Wu et al., 2021). En América del Sur, *N. clavispora* ha sido implicada en enfermedades de pudrición de raíz y corona en países como Uruguay y Argentina indicando la presencia de múltiples especies de *Neopestalotiopsis* que afectan cultivos de fresa en esta región (Schierling et al., 2024). Además, *N. mesopotamica* ha sido reportada en Ecuador, marcando su primera asociación con pudrición de corona de fresa (Hidrobo-Chavez et al. 2022). En los Estados Unidos, particularmente en Florida, *Neopestalotiopsis* spp. han sido identificadas como contribuyentes significativos a enfermedades de mancha foliar y pudrición de fruto en fresas (Ávila-Hernández et al., 2025; Baggio et al., 2021).

La historia de *N. rosae* revela su progresiva aparición en diversos países y su rápida expansión geográfica, se han registrado casos de infección en múltiples regiones, abarcando desde América del Norte y del Sur hasta Asia y África, esta amplia distribución ha despertado preocupación entre los productores agrícolas, quienes han experimentado la devastación de sus cultivos por la infección causada por este fitopatógeno (Ávila-Hernández et al., 2025; Baggio et al., 2021).

La importancia económica de *N. rosae* radica en su capacidad para afectar una amplia variedad de plantas cultivadas, incluyendo frutas, hortalizas,

árboles ornamentales y cultivos de importancia económica, la infección por este hongo puede provocar síntomas devastadores, como la aparición de manchas necróticas en hojas, tallos y frutos, defoliación prematura, malformaciones y pudriciones. Estos daños resultan en pérdidas significativas de rendimiento y calidad de los productos agrícolas, lo que impacta directamente en la economía de los agricultores y en la seguridad alimentaria a nivel global (Baggio et al., 2021).

Ante este escenario, es crucial profundizar en el estudio de *N. rosae*, comprendiendo su biología, mecanismos de patogenicidad y estrategias de supervivencia, así como desarrollar estrategias efectivas de manejo y control. Además, es esencial establecer programas de vigilancia epidemiológica y monitoreo continuo para anticipar y mitigar los efectos perjudiciales de este fitopatógeno emergente en los sistemas agrícolas.

En este artículo de revisión, se explorarán la descripción taxonómica y las características morfológicas de *N. rosae*, así como su historia y distribución geográfica. También se analizará su importancia económica y el impacto que genera en los cultivos, con el objetivo de proporcionar una visión completa de este fitopatógeno y resaltar la necesidad de investigaciones futuras para el manejo y control efectivo de esta enfermedad.

Esta investigación se llevó a cabo mediante un exhaustivo estudio de artículos científicos recopilados de múltiples bases de datos, entre las cuales destacan Google académico, Google Scholar, Scielo, Science Direct, Scopus y Redalyc.

Desarrollo

Características generales y propagación de *Neopestalotiopsis rosae*

La distribución de *N. rosae* es variada, prefiriendo climas de templado a tropical, este hongo se ha identificado como un patógeno de plantas en diferentes partes del mundo siendo reportado en países como Egipto, Taiwán, Estados Unidos, Italia, China, India, México, entre otros, las características que presentaron las plantas afectadas principalmente fueron el secado del borde de las hojas completamente secas y

decoloración de los tejidos internos de la corona, pudrición de raíz y corona principalmente en el cultivo de fresa (Rebollar-Alviter et al., 2020; Baggio et al., 2021; Wu et al., 2021).

En México ha sido reportada la incidencia de *N. rosae* presentando los síntomas típicos como pudrición de la corona y la raíz en los estados de Michoacán, Guanajuato y Puebla (Ávila-Hernández et al., 2025), causando daños y pérdidas económicas a los productores de frutos como fresa y frutillas en general. *Neopestalotiopsis rosae* es un hongo que se propaga principalmente por medio de esporas producidas en las lesiones de las plantas infectadas, estas esporas pueden ser transportadas por el viento, el agua, los insectos y otros medios, y pueden infectar a otras plantas en las cercanías (Schierling et al., 2024).

Además, la enfermedad también puede propagarse por medio de herramientas de jardinería contaminadas y por la manipulación de plantas infectadas sin tomar las debidas precauciones, es importante evitar la propagación de la enfermedad manteniendo las herramientas de jardinería limpia y desinfectada, y evitando tocar las plantas infectadas sin usar guantes y ropa de protección, es importante destacar que la propagación de *N. rosae* puede ser limitada si se llevan a cabo prácticas adecuadas de gestión de enfermedades, como la eliminación y destrucción de las plantas infectadas y la aplicación de fungicidas preventivos en las plantas sanas (Baggio et al. 2021; Schierling et al., 2024).

Ciclo de vida de *Neopestalotiopsis rosae*

Neopestalotiopsis rosae es un hongo que causa una enfermedad en las rosas llamada mancha foliar, el ciclo de vida de este hongo es típico de la mayoría de los hongos que causan enfermedades en las plantas y sigue un patrón de desarrollo con varios pasos importantes (Baggio et al., 2021) los cuales se describen a continuación.

Infección: el hongo *N. rosae* infecta las hojas de las plantas como rosas y fresa entrando en ellas a través de pequeñas heridas o cortes, una vez que el hongo entra en la hoja, comienza a crecer y a multiplicarse.

Incubación: Después de infectar la hoja, el hongo comienza a crecer y se desarrolla dentro de ella durante un período de tiempo, que puede variar de unos pocos días a varias semanas, dependiendo de las condiciones ambientales.

Síntomas: después del período de incubación, aparecen los síntomas de la enfermedad, en el caso de *N. rosae*, se observan manchas de color marrón oscuro en las hojas. Las manchas pueden ser pequeñas o grandes, y en ocasiones se unen para formar manchas más grandes.

Diseminación: Una vez que se forman las manchas, el hongo produce esporas que se diseminan por el aire y pueden infectar otras partes de la planta o plantas cercanas.

Reproducción sexual: en condiciones adecuadas, el hongo puede reproducirse sexualmente, esto implica la fusión de dos células fúngicas diferentes para formar un cigoto, que luego se desarrolla en una estructura llamada ascoma. Dentro de los ascocamas, se forman las esporas que se utilizarán para infectar a otras plantas.

Ciclo de vida continuo: una vez que se forman las esporas, el ciclo de vida de *N. rosae* continúa, y las esporas pueden infectar nuevas plantas y comenzar el proceso de nuevo, es importante tener en cuenta que el ciclo de vida de *N. rosae* puede variar ligeramente dependiendo de las condiciones ambientales y de la variedad de planta afectada (Baggio et al., 2021; Darapanit et al., 2021; Wu et al., 2021).

Mecanismos de patogenicidad de *Neopestalotiopsis rosae*

Penetración y colonización: *N. rosae* utiliza diferentes estrategias para ingresar a los tejidos de las plantas hospedantes. Se ha observado que el hongo puede penetrar a través de heridas naturales o daños causados por insectos, así como a través de estomas y lenticelas. Una vez dentro de la planta, el hongo se expande y coloniza los tejidos, produciendo enzimas que degradan componentes celulares y facilitan su crecimiento (EFSA Panel on Plant Health et al., 2023).

Producción de toxinas: *N. rosae* es capaz de producir una variedad de metabolitos secundarios

y toxinas, los cuales pueden desempeñar un papel en su patogenicidad. Estos compuestos tóxicos pueden causar daño directo a las células vegetales, inhibir la respuesta de defensa de la planta o facilitar la colonización del hongo (Ávila-Hernández et al., 2025).

Manipulación de la respuesta de defensa de la planta: el hongo tiene la capacidad de modular la respuesta de defensa de la planta, interferir con las rutas de señalización y evadir o suprimir las respuestas de inmunidad vegetal. Esto le permite evitar o debilitar la resistencia de la planta, facilitando su colonización y propagación (Hadi et al., 2024).

Secreción de enzimas degradativas: *N. rosae* produce diversas enzimas extracelulares, como celulasas, pectinasas y proteasas, que tienen la capacidad de degradar los componentes de la pared celular de la planta. Estas enzimas facilitan la invasión del hongo al degradar las barreras físicas de la planta y liberar nutrientes esenciales para su crecimiento (Kumar et al., 2022).

Estrategias de supervivencia de *Neopestalotiopsis rosae*

Formación de estructuras de resistencia: el hongo puede formar estructuras de resistencia, como conidios y cuerpos fructíferos, que le permiten sobrevivir en condiciones desfavorables. Estas estructuras pueden permanecer en el suelo, residuos vegetales o en tejidos infectados, esperando condiciones ambientales propicias para su germinación y reinfección, sobrevivencia en residuos vegetales: *N. rosae* tiene la capacidad de colonizar y sobrevivir en residuos vegetales, lo que puede servir como fuente de inóculo para futuras infecciones, esta estrategia le permite persistir en el ambiente y reinfestar los cultivos en temporadas de siembra sucesivas (Blagojević et al., 2024; Marín et al., 2024).

Tolerancia a condiciones adversas: el hongo ha mostrado tolerancia a diversas condiciones ambientales, como temperaturas fluctuantes, sequía y cambios en la humedad del suelo, esta capacidad de adaptación le permite sobrevivir en diferentes ecosistemas y colonizar una amplia gama de hospedantes, interacción con otros

microorganismos: *N. rosae* puede establecer interacciones con otros microorganismos presentes en el suelo o en la superficie de las plantas, estas interacciones pueden ser beneficiosas o perjudiciales para la supervivencia y el desarrollo del hongo, y pueden influir en su capacidad patogénica (Baggio et al., 2021; Addison et al., 2023).

Respuesta de defensa de las plantas frente a la infección por *Neopestalotiopsis rosae*

La respuesta de defensa de las plantas frente a la infección por *N. rosae* es un proceso complejo que involucra diversas respuestas bioquímicas, fisiológicas y moleculares.

Producción de metabolitos antimicrobianos: las plantas activan la producción de metabolitos antimicrobianos, como fitoalexinas, compuestos fenólicos y terpenoides, como parte de su respuesta de defensa, estos metabolitos pueden inhibir el crecimiento y la propagación de *N. rosae*, actuando como agentes tóxicos o restringiendo su desarrollo en los tejidos infectados (Tiku, 2018). Reforzamiento de la pared celular: la planta puede fortalecer su pared celular como una respuesta de defensa frente a la infección, esto implica la deposición de compuestos como lignina y calosa, que refuerzan la estructura de la pared celular y dificultan la invasión del hongo, además, la síntesis y acumulación de celulosa y hemicelulosas pueden contribuir a la formación de barreras físicas que limitan el avance del patógeno (Wang et al., 2020). Activación de respuestas de inmunidad: las plantas desencadenan respuestas de inmunidad específicas, como la activación de genes de defensa y la producción de proteínas de defensa, en respuesta a la infección por *N. rosae*, estas respuestas incluyen la expresión de proteínas antifúngicas, enzimas de degradación de patógenos y factores de transcripción que regulan las respuestas de defensa. Respuestas de señalización sistémica: además de la respuesta local en el sitio de infección, las plantas pueden desencadenar respuestas de señalización sistémica para proteger los tejidos no infectados. Esto implica la movilización de señales químicas, como el ácido salicílico (SA), el ácido jasmónico (JA) y el ácido

abscísico (*ABA*), que coordinan respuestas de defensa en toda la planta y activan genes de defensa en sitios distantes (Xu-X et al., 2022; Tiku, 2018).

Muerte celular programada: En algunos casos, las plantas pueden inducir la muerte celular programada, conocida como apoptosis, en los tejidos infectados por *N. rosae*. Esto ayuda a limitar la propagación del patógeno y a prevenir la extensión de la infección a tejidos sanos (Liang et al., 2022).

Técnicas de diagnóstico

Las técnicas de diagnóstico del hongo *N. rosae* son un conjunto de procedimientos utilizados para detectar la presencia de este hongo en las plantas infectadas, el diagnóstico preciso es fundamental para poder controlar la enfermedad y evitar su propagación a otras plantas, las técnicas de diagnóstico del hongo *N. rosae* incluyen: observación visual: se realiza una observación detallada de los síntomas que presenta la planta, como manchas o deformaciones en hojas y frutos, y se examina la apariencia general de la planta infectada. Toma de muestras: se toman muestras de las áreas afectadas de la planta para examinarlas bajo el microscopio y confirmar la presencia del hongo. Pruebas de laboratorio: se pueden realizar pruebas moleculares, como la amplificación de ácido nucleico mediante *PCR*, generalmente amplificando ITS + TEF1- α + β -tubulina (tub2) para identificar específicamente la presencia del hongo *N. rosae* en la muestra. Cultivo del hongo: se pueden cultivar muestras de tejido infectado en medios de cultivo específicos para el hongo y observar el crecimiento y características del hongo. Identificación morfológica: se examinan las características morfológicas del hongo, como el tamaño y la forma de las esporas, la forma de las colonias, la presencia de conidióforos y conidios, para confirmar la presencia del hongo *N. rosae* (Xu-X et al., 2022; Ávila-Hernández et al., 2025).

En general, las técnicas de diagnóstico del hongo *N. rosae* se basan en una combinación de observación visual, toma de muestras, pruebas de laboratorio y análisis morfológico para confirmar la presencia del hongo en las plantas infectadas.

Algunas de las formas de caracterizar y diagnosticar la presencia de *N. rosae* se describen a continuación.

Identificación morfológica de *Neopestalotiopsis rosae*

El género *Neopestalotiopsis* se caracteriza por ser monofilético, lo que indica que todas sus especies comparten un ancestro común (Muslimin et al., 2022). Este hongo produce estructuras reproductivas asexuales denominadas conidiomata o picnidios, que presentan formas subglobosas, globosas, claviformes, ya sea de manera individual o agrupada. Dichas estructuras presentan una coloración que varía del marrón oscuro al negro, y se desarrollan dentro de una masa mucilaginosa, la cual puede ser unilocular o presentar compartimentos de forma irregular. Los conidios, también de tonalidad marrón oscura a negra, se encuentran agrupados en masas mucilaginosas globosas. Morfológicamente, estos conidios son fusiformes, elipsoides a subcilíndricos, rectos o con una leve curvatura, y poseen cuatro septos. La célula basal muestra una forma cónica a subcilíndrica, con base truncada, de apariencia hialina o con una pigmentación entre marrón claro y verdosa, con pared delgada y textura rugosa (Fiorenza et al., 2022).

Las tres células medias son doliformes de pared rugosa a verruculosa, versicolor, con una septa más oscura que el resto, la célula apical del conidio es hialina, puede ser cónica a cilíndrica, con paredes finas y lisas, tiene apéndices apicales tubulares pudiendo ser uno o más, atenuados o filiformes, flexibles, ramificados o no, el apéndice basal del conidio es único, en forma tubular no ramificado y céntrico (Landeros et al., 2024). El tamaño de los conidios de *N. rosae* es de aproximadamente 10-20 μM de longitud y 4-6 μM de ancho, los conidios son estructuras asexuales en forma de bastón o huso, con extremos afilados y ligeramente curvados (Álvarez et al., 2024). Los conidios se producen en grupos en las lesiones de las plantas infectadas y se liberan al ambiente cuando las condiciones son adecuadas, son la forma principal en que el hongo se propaga y se disemina de una planta a otra (Álvarez et al., 2024).

Los conidios de *N. rosae* son estructuras reproductivas asexuales en forma de bastón o de huso, con extremos afilados y ligeramente curvados, tienen una longitud de aproximadamente 30-40 µM y una anchura de 4-6 µM, se producen en grupos en las lesiones de la planta infectada y son liberados al ambiente cuando las condiciones son adecuadas. Estos conidios son la forma principal en que el hongo se propaga y se disemina de una planta a otra (Landeros et al., 2024).

Los conidios de *N. rosae* son estructuras importantes para la identificación del hongo, la observación de la forma y el tamaño de los conidios bajo un microscopio puede ayudar a distinguir esta especie de otros hongos que causan enfermedades similares en las plantas.

Neopestalotiopsis se podría clasificar como un hongo hemi-biotrófico lo que significa que puede tener una estrategia de vida mixta en la que pasa por dos fases durante su ciclo de vida, pudiendo ser un hongo necrotrófico y cambiando más adelante a biotrófico, formando una asociación simbiótica con la planta, esto genera la facultad de cambiar las rutas nutricionales como mecanismo de sobrevivencia, por lo tanto, es capaz de permanecer tanto en materia orgánica fresca como descompuesta (Hadi et al., 2024).

Identificación molecular y secuenciación de ADN
La caracterización molecular de *Neopestalotiopsis* es un conjunto de técnicas que se utilizan para analizar el material genético del hongo, identificar, diferenciar y caracterizar a nivel molecular el mismo, su identidad taxonómica y filogenética, estas técnicas se basan en el análisis de las características genéticas y moleculares del hongo, como su secuencia de ácido desoxirribonucleico (ADN), patrones de restricción de ADN, perfiles de amplificación de ADN y características de hibridación de ADN (Landeros et al., 2024).

La secuenciación de ADN para *N. rosae* es un procedimiento de laboratorio que permite determinar el orden exacto de las bases nucleotídicas que componen el ADN de este hongo, esta técnica implica la amplificación y secuenciación del ADN de un gen específico o de

todo el genoma del hongo, las secuencias de ADN se comparan con las de otras especies conocidas para determinar la identidad taxonómica del hongo (Acosta-González, 2022), la secuenciación de ADN se ha convertido en una herramienta esencial para el estudio de la diversidad genética y la evolución de los organismos, y es particularmente útil en el campo de la microbiología y la fitopatología para la identificación precisa de especies y cepas de hongos patógenos.

La secuenciación de ADN es una técnica muy precisa y sensible que permite identificar especies de hongos patógenos con alta precisión, lo que resulta útil para la toma de decisiones en cuanto al control y manejo de las enfermedades causadas por estos hongos (González-Garza, 2017)

Análisis filogenético

Una vez que se ha secuenciado el ADN, se utiliza un análisis filogenético para determinar la relación evolutiva del hongo con otras especies relacionadas. Esto puede ayudar a determinar su posición taxonómica precisa. Un análisis filogenético para *N. rosae* es un procedimiento que permite estudiar las relaciones evolutivas entre diferentes cepas o especies de este hongo patógeno, la filogenia es la rama de la biología que se encarga de estudiar la evolución y la diversidad de los seres vivos, y el análisis filogenético se basa en la comparación de secuencias de ADN para determinar la relación entre diferentes organismos (Sun et al., 2021; Sharifnabi & Nourbakhsh, 2024). El análisis filogenético de *N. rosae* consiste en la selección de muestras, en donde se seleccionan varias muestras de *N. rosae* para el análisis, preferiblemente de diferentes regiones geográficas o hospederos.

El análisis filogenético de *N. rosae* es una herramienta útil para estudiar la diversidad genética y la evolución de este hongo patógeno, y puede ayudar a entender la epidemiología y la patogenia de las enfermedades causadas por este hongo en diferentes regiones geográficas y hospederos (Fiorenza et al., 2022).

Análisis de restricción del ADN

El análisis de restricción del ADN (ARD) es una técnica que se utiliza en la caracterización molecular de *N. rosae* y otros organismos, consiste en el corte del ADN con enzimas de restricción específicas, que reconocen y cortan secuencias de nucleótidos específicas en la molécula de ADN. El patrón de fragmentos obtenido se utiliza para identificar y diferenciar entre diferentes cepas o especies de *N. rosae* (Kaur et al., 2023).

El análisis de restricción del ADN es una técnica sencilla y de bajo costo que se utiliza para caracterizar y diferenciar entre diferentes cepas o especies de *N. rosae*, y puede proporcionar información valiosa sobre la diversidad genética y la epidemiología de las enfermedades causadas por este hongo patógeno, sin embargo, esta técnica tiene limitaciones en términos de resolución y sensibilidad en comparación con otras técnicas más avanzadas de caracterización molecular.

Análisis de PCR

La técnica de PCR (reacción en cadena de la Polimerasa) se utiliza en la caracterización molecular de *N. rosae* para amplificar y detectar específicamente fragmentos de ADN que se encuentran en el genoma del hongo. La PCR es una técnica de amplificación de ADN in vitro que permite la obtención de múltiples copias de un segmento específico de ADN en un corto período de tiempo (Kaur et al., 2023). La técnica es muy útil para estudiar la diversidad genética y la filogenia de *N. rosae*, así como para identificar la presencia del hongo en diferentes muestras.

El análisis de PCR es una técnica sensible, rápida y específica para la detección y caracterización molecular de *N. rosae* (Sun et al., 2021). Puede ser utilizado para identificar la presencia del hongo en diferentes muestras de plantas, como ramas, hojas, flores y frutas, así como en suelos y otros materiales relacionados con la infección. Además, la PCR se puede combinar con otras técnicas de caracterización molecular, como la secuenciación de ADN, para obtener información adicional sobre la diversidad y la filogenia de *N. rosae*.

Hibridación de ADN

El análisis de hibridación de ADN es una técnica utilizada en la caracterización molecular de *N. rosae* para identificar la presencia y la diversidad genética del hongo en diferentes muestras. Esta técnica se basa en la capacidad de dos hebras de ADN complementarias para unirse entre sí mediante puentes de hidrógeno, formando una estructura de doble hélice (Aslam et al., 2017).

El análisis de hibridación de ADN es una técnica útil para la detección y caracterización de *N. rosae*, ya que permite la identificación de la presencia del hongo en diferentes muestras y la determinación de la diversidad genética, además, esta técnica puede ser utilizada para detectar la presencia de otras especies de hongos relacionados con *N. rosae*.

Cabe señalar que, aunque la técnica de hibridación de ADN es útil para la detección de la presencia de un hongo específico, es menos sensible que la técnica de PCR y otras técnicas de secuenciación de ADN en términos de detección de pequeñas cantidades de ADN fúngico en una muestra compleja (Freeman et al., 2000).

En resumen, el análisis de hibridación de ADN es una técnica útil en la caracterización molecular de *Neopestalotiopsis rosae*, especialmente cuando se utiliza en combinación con otras técnicas de detección y caracterización. En general, la caracterización molecular es una herramienta poderosa para la identificación y caracterización de *Neopestalotiopsis*, y es especialmente útil cuando se trabaja con especies que tienen características morfológicas o bioquímicas similares.

Medidas culturales y prácticas agronómicas para prevenir la propagación del hongo.

Para prevenir la propagación del hongo *N. rosae* y reducir el riesgo de infección en los cultivos, se pueden implementar varias medidas culturales y prácticas agronómicas, algunas de las estrategias recomendadas se mencionan a continuación:

Selección de variedades resistentes: optar por cultivar variedades de plantas que sean menos susceptibles a la infección por *N. rosae* puede ser una medida preventiva efectiva. Investigar y elegir variedades con resistencia o tolerancia demostrada

al hongo puede reducir la incidencia de la enfermedad en los cultivos (Baggio et al., 2021).

Rotación de cultivos: practicar la rotación de cultivos ayuda a interrumpir el ciclo de vida del hongo y disminuir la acumulación de inóculo en el suelo. Evitar el cultivo repetido de especies vegetales susceptibles en la misma área puede reducir la presencia y propagación del patógeno (Del Prado et al., 2018).

Manejo adecuado de residuos vegetales: retirar y eliminar adecuadamente los residuos vegetales, especialmente aquellos infectados por *N. rosae*, es importante para reducir la fuente de inóculo del hongo. Los restos de plantas infectadas pueden ser una fuente de propagación y reinfección en futuras temporadas de cultivo (Chandana et al., 2024).

Prácticas de poda y saneamiento: realizar podas adecuadas para eliminar y destruir las partes de la planta infectadas o lesionadas puede prevenir la propagación de *N. rosae*. Esto incluye la eliminación de hojas, ramas y frutos afectados, así como la desinfección de las herramientas de poda entre cortes y plantas para evitar la contaminación cruzada.

Manejo adecuado del riego: evitar el riego excesivo y garantizar un buen drenaje del suelo puede ayudar a reducir la humedad y la creación de condiciones favorables para el desarrollo de *N. rosae*. El hongo tiende a prosperar en ambientes húmedos, por lo que es importante mantener un equilibrio adecuado de humedad en los cultivos (Chandana et al., 2024).

Fertilización equilibrada: mantener una nutrición equilibrada de las plantas puede fortalecer su sistema inmunológico y ayudar a aumentar su resistencia a las enfermedades. Proporcionar una adecuada cantidad de nutrientes esenciales y evitar desequilibrios nutricionales puede fortalecer la salud de las plantas y reducir su susceptibilidad a *N. rosae* (Huber & Graham 1999).

Uso de material de siembra y trasplante sano: utilizar material de siembra y trasplante libre de infecciones por *N. rosae* es esencial para prevenir la introducción del patógeno en nuevas áreas o cultivos. Realizar inspecciones visuales y tomar precauciones al adquirir plántulas o semillas de

proveedores confiables puede ayudar a evitar la introducción de la enfermedad.

Uso de fungicidas y su efectividad en el control de *Neopestalotiopsis rosae*

El uso de fungicidas puede ser una herramienta importante en el control de *N. rosae*, sin embargo, es importante tener en cuenta que la efectividad de los fungicidas puede variar y depende de varios factores, como la especie vegetal, el estado de la infección, la resistencia del hongo y las condiciones ambientales, algunos puntos a considerar sobre el uso de fungicidas en el control de *N. rosae* son:

Identificación del fungicida adecuado: es fundamental seleccionar un fungicida que sea efectivo contra *N. rosae*, dado que este hongo puede presentar resistencia a ciertos fungicidas, es importante realizar pruebas de sensibilidad o recurrir a asesoramiento especializado para determinar cuáles son los productos más eficaces (Acosta-González et al., 2024).

Momento de aplicación: el momento adecuado para aplicar los fungicidas puede influir en su eficacia. Por lo general, se recomienda aplicar los fungicidas antes de que se presenten los síntomas de la enfermedad o en las primeras etapas de la infección, esto puede ayudar a prevenir la propagación del hongo y reducir los daños en los cultivos (Huber & Graham, 1999).

Intervalos de aplicación y dosis: es importante seguir las recomendaciones del fabricante en cuanto a la dosis y los intervalos de aplicación de los fungicidas. Aplicar los fungicidas en los intervalos correctos y respetar las dosis recomendadas puede maximizar su efectividad y minimizar el riesgo de desarrollo de resistencia por parte del hongo (Jennings et al., 2024).

Rotación de fungicidas: la rotación de fungicidas con diferentes modos de acción puede ser una estrategia eficaz para evitar la resistencia del hongo. Alternar el uso de fungicidas de diferentes grupos químicos puede ayudar a prevenir la selección de cepas resistentes de *N. rosae* (Acosta-González et al., 2024).

Buenas prácticas de aplicación: para garantizar la eficacia de los fungicidas, es importante seguir buenas prácticas de aplicación. Esto incluye la cobertura uniforme de las plantas con el fungicida, la aplicación en condiciones climáticas adecuadas y el uso de equipos de aplicación calibrados correctamente.

Integración con otras medidas de manejo: el uso de fungicidas debe considerarse como parte de un enfoque integrado de manejo de enfermedades. Combinar el uso de fungicidas con medidas culturales, como la selección de variedades resistentes, prácticas de saneamiento y monitoreo regular, puede mejorar la eficacia general del control de *N. rosae*.

Desarrollo de métodos biológicos o alternativos de control para *Neopestalotiopsis rosae*

En los últimos años, se han llevado a cabo diversas investigaciones para desarrollar métodos biológicos y alternativos de control para *N. rosae*. Debido a la alta incidencia que ha tenido en diversos países del mundo (**Tabla I**) incluyendo México, a continuación, se presentan algunos avances y enfoques prometedores en esta área:

Agentes de biocontrol: se han investigado diferentes agentes de biocontrol, como bacterias y hongos antagonistas, que pueden inhibir el crecimiento y la propagación de *N. rosae*, estos agentes actúan mediante la producción de metabolitos antimicrobianos, la competencia por nutrientes y espacio, y la inducción de respuestas de defensa en las plantas (Ávila-Hernández et al., 2025). Algunos estudios han demostrado la eficacia de bacterias del género *Bacillus* y hongos del género *Trichoderma* en el control de la enfermedad (Acosta-González et al., 2024).

Extractos de plantas y productos naturales: Se ha investigado el potencial de extractos de plantas

y productos naturales para controlar *N. rosae*, algunas plantas medicinales y extractos de compuestos como aceites esenciales, flavonoides y taninos han mostrado actividad antifúngica contra el hongo, estos compuestos pueden interferir con el crecimiento y desarrollo de *N. rosae* y pueden ser una alternativa interesante a los fungicidas químicos (Tran et al., 2023).

Inducción de resistencia en las plantas: Se ha estudiado la capacidad de inducir resistencia sistémica adquirida en las plantas para combatir la infección por *N. rosae*, la aplicación de sustancias activadoras de defensa, como el ácido salicílico, el ácido jasmónico y el ácido elágico, puede estimular la respuesta de defensa de las plantas y aumentar su resistencia contra el hongo, este enfoque puede ser una estrategia sostenible y de bajo impacto ambiental (Xia et al., 2022).

Uso de microorganismos endófitos: los microorganismos endófitos que residen en los tejidos de las plantas han demostrado tener potencial para controlar enfermedades causadas por hongos fitopatógenos, algunos estudios han identificado microorganismos endófitos en plantas que muestran actividad inhibidora contra *N. rosae*, estos microorganismos pueden colonizar los tejidos de las plantas y competir con el hongo, reduciendo su establecimiento y crecimiento (Kahraman et al., 2021).

Mejoramiento genético de las plantas: el desarrollo de variedades de plantas resistentes o tolerantes a *N. rosae* a través del mejoramiento genético es otro enfoque en investigación. La identificación de genes implicados en la resistencia a la enfermedad y su introducción en variedades comerciales puede ayudar a reducir la susceptibilidad de los cultivos al hongo (Alam et al., 2024).

Tabla I. *Neopestalotopsis rosae* en el mundo y sus hospederos.

Hospedero	Ubicación geográfica	Referencia
Fresa	Estados Unidos	Baggio et al., 2021
Fresa	México	Revollar, 2020
Fresa	Taiwán	Wu, 2021
Fresa	China	Sun, 2021
Fresa	Egipto	Essa et al., 2018
Aguacate	Italia	Fiorenza et al., 2022
Arándano	Perú	Rodríguez-Gálvez et al., 2020
Cítricos	China	Ma et al., 2023
Palma camedor	México	Sarmiento-Chacón et al., 2023
Fresa	Turquía	Erdurmuş et al., 2023
Eucalipto	Brasil	Santos et al., 2020

Comentarios finales

De acuerdo con el análisis de la información obtenida a la fecha de la redacción de esta revisión se examinó a fondo el hongo fitopatógeno *Neopestalotopsis rosae*, se da a conocer que esta especie es altamente patogénica así mismo, mencionar que cuenta con una alta gama de hospederos. La identificación morfológica de *Neopestalotopsis* se complementó con la identificación molecular, estudios realizados han utilizado la región del espaciador transcrita interna (ITS), la β-tubulina (TUB) y el factor de elongación de la traducción I-alfa (TEF-Iα) se agruparon con la cepa extipo de *N. rosae* en el árbol filogenético multilocus (ITS + TUB + TEF-Iα). Además, se exploró la distribución geográfica del hongo y reportes a lo largo del tiempo, destacando su presencia en diversas regiones y su impacto económico significativo en los cultivos.

El artículo también abordó las estrategias de manejo y control, incluyendo medidas culturales, el uso de fungicidas y enfoques biológicos, resaltando la necesidad de un enfoque integrado y sostenible para enfrentar esta patología y reducir sus efectos negativos en los cultivos.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT), quien brindó su apoyo a la becaria de doctorado María Magdalena Cervantes Zúñiga. **Contribución del autor:** Cervantes-Zúñiga, escritura del borrador original, conceptualización; Castro-del Ángel, conceptualización, revisión y edición; Hernández-Juárez, conceptualización; Gallegos-Morales, conceptualización; Delgado-Ortiz, conceptualización.

Referencias

- Acosta-González, U., Leyva-Mir, S. G., Silva-Rojas, H. V. & Rebollar-Alviter, A. (2024). Preventive and curative effects of treatments to manage strawberry root and crown rot caused by *Neopestalotopsis rosae*. *Plant Diseases*, 108(5), 1278–1288.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-05-23-0958-RE>
- Addison, T., Farms, H. A., Archambault, M., Arthurs, O. S., Bael, B. M., Farms, K. & Samtani, J. (2023). Pest Management Strategic

- Plan for Strawberry in North Carolina, Virginia, South Carolina, Georgia, and Florida Source. In *Workshop Date* 11(08). https://ipmdata.ipmcenters.org/source_report_pdf.cfm?sourceid=2489
- Alam, E., Moyer, C., Verma, S., Peres, N. A. & Whitaker, V. M. (2024). Exploring the genetic basis of resistance to *Neopestalotiopsis* species in strawberry. *The Plant Genome*, 17(2), e20477. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20477>
- Álvarez, A. D. G., Jiménez, D. C., Diaz, D. A. N., Lunar, J. M. R., Flores, J. U. A., Martínez, M. I. C. & Juárez, M. D. R. A. (2024). En busca de una producción inocua de fresa con el control ecoamigable de *Neopestalotiopsis rosae*. *Jóvenes en la Ciencia*, 28, 1-15. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4308>
- Aslam, S., Tahir, A., Aslam, M. F., Alam, M. W., Shedayi, A. A. & Sadia, S. (2017). Recent advances in molecular techniques for the identification of phytopathogenic fungi—a mini review. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 493-504. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1397205>
- Ávila-Hernández, J. G., León-Ramírez, C. G., Abraham-Juárez, M. D. R., Tlapal-Bolaños, B., Olalde-Portugal, V., Délano-Frier, J., Martínez-Antonio, A. & Aguilar-Zárate, P. (2025). *Neopestalotiopsis* spp.: A threat to strawberry production and management. *Horticulturae*, 11(3), 288. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030288>
- Ayoubi, N. & Soleimani, M. J. (2016). Strawberry fruit rot caused by *Neopestalotiopsis iranensis* sp. nov., and *N. mesopotamica*. *Current Microbiology*, 72, 329-336. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0955-y>
- Baggio, J. S., Forcelini, B. B., Wang, N. Y., Ruschel, R. G., Mertely, J. C. & Peres, N. A. (2021). Outbreak of leaf spot and fruit rot in florida strawberry caused by *Neopestalotiopsis* spp. *Plant Disease*, 105(2), 305-315.
- <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1290-RE>
- Blagojević, J., Aleksić, G., Vučurović, I., Starović, M., & Ristić, D. (2024). Exploring the phylogenetic diversity of Botryosphaeriaceae and *Diaporthe* species causing dieback and shoot blight of blueberry in Serbia. *Phytopathology*, 114(6), 1333-1345. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-23-0133-R>
- Chandana, R., Poonacha, T. T., Chethan, D., Karan, R., Kruthika, R., Khan, F., Ashwini, K. S., Bevanur, A., Vani, Y., Venkata, R. G., & Palanna, K. B. (2024). *Neopestalotiopsis rosae*, a novel pathogen causing leaf blight and crown rot of strawberries in India. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 133, 102377. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102377>
- Chen, L., Li, H., Jiao, W., Tao, M., Lv, C., Zhao, M. & Wang, M. (2021). Genetic variation and demographic history analysis of *Pestalotiopsis*, *Pseudopestalotiopsis*, and *Neopestalotiopsis* fungi associated with tea (*Camellia sinensis*) inferred from the internal transcribed spacer region of the nuclear ribosomal DNA. *Plant Pathology*, 70(3), 699-711. <https://doi.org/10.1111/ppa.13315>
- Darapanit, A., Boonyuen, N., Leesutthiphonchai, W., Nuankaew, S. & Piasai, O. (2021). Identification, pathogenicity and effects of plant extracts on *Neopestalotiopsis* and *Pseudopestalotiopsis* causing fruit diseases. *Scientific Reports*, 11(1), 22606. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02113-5>
- Del Prado-Vera, I. C., Franco-Navarro, F., & Godinez-Vidal, D. (2018). Plant parasitic nematodes and management strategies of major crops in Mexico. In *Plant Parasitic Nematodes in Sustainable Agriculture of North America*. Springer. Vol. 1-Canada, Mexico and Western USA, 31-68.
- EFSA Panel on Plant Health (PLH), Bragard, C., Baptista, P., Chatzivassiliou, E., Di Serio, F., Gonthier, P. & Reignault, P. L. (2023). Pest categorization of *Pestalotiopsis microspora*.

- EFSA Journal, 21(12), e8493.
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8493>
- Erdurmuş, D., Palacioğlu, G., Erdurmuş, G. & Bayraktar, H. (2023). First report of *Neopestalotiopsis rosae* causing leaf spot and crown rot of strawberry in Turkey. *Journal of Plant Pathology*, 105(1), 315. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01218-8>
- Essa, T. A., Kamel, S. M., Ismail, A. M., & El-Ganainy, S. (2018). Characterization and chemical control of *Neopestalotiopsis rosae* the causal agent of strawberry root and crown rot in Egypt. *Egyptian Journal of Phytopathology*, 46(1), 1-19. <https://doi.org/10.21608/ejp.2018.87411>
- Fiorenza, A., Gusella, G., Aiello, D., Polizzi, G., & Voglmayr, H. (2022). *Neopestalotiopsis siciliana* sp. nov. and *N. rosae* causing stem lesion and dieback on avocado plants in Italy. *Journal of Fungi*, 8(6), 562. <https://doi.org/10.3390/jof8060562>
- Freeman, W. M., Robertson, D. J., & Vrana, K. E. (2000). Fundamentals of DNA hybridization arrays for gene expression analysis. *Biotechniques*, 29(5), I042-I055.
- Ghimire, S., Neupane, S. & Tharu, R. K. (2023). Comparative study on the seed health of five commonly cultivated wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) in Nepal. *AgroEnvironmental Sustainability*, 1(1), 3-II. <https://doi.org/10.59983/s2023010102>
- González, A. A. D., Jiménez D. C., Nuñez, D. D. A., Rodríguez L. J.M., Armendariz, F. J. U., Canchola, M. M. I. and Abraham, J.M. R. (2024). En busca de una producción inocua de fresa con el control ecoamigable de *Neopestalotiopsis rosae*. *Jóvenes en la Ciencia*, 28, 1-15. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4308>
- González-Garza, R. (2017). Evolución de técnicas de diagnóstico de virus fitopatógenos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 35(3), 591-610. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-1>
- Hadi I. M. Z., Mohamad M. M., Noran, A. S., Ahmad Z. A. M., Maiden, N. A., Atan, S., & Mohd A. M. N. (2024). Unravelling fungal diversity in *Pestalotiopsis* leaf fall disease symptomatic leaves of *Hevea brasiliensis* in Malaysia. *Journal of Rubber Research*, 27(3), 501-515. <https://doi.org/10.1007/s42464-024-00266-2>
- Hidrobo-Chavez, J., Ramírez-Villacís, D. X., Barriga-Medina, N., Herrera, K. & León-Reyes, A. (2022). First report of *Neopestalotiopsis mesopotamica* causing root and crown rot on strawberry in Ecuador. *Plant Disease*, 106(3), 1066. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-21-1278-PDN>
- Huber, D. M. & Graham, R. D. (1999). The role of nutrition in crop resistance and tolerance to diseases. In *Mineral Nutrition of Crops* (pp. 169-204). CRC Press. eBook
- Jennings, C., Simmons, T., Parajuli, M., Liyanage, K. H. E. & Baysal-Gurel, F. (2024). Effect of fungicides and application intervals for the control of black spot of roses. *HortScience*, 59(5), 673-677. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI1773-024>
- Kahraman, T., Elif K. S., Liman, R., Hakkl C. I., Açıkbash, Y., Konuk, M. & Uysal A. G. (2021). Synthesis, Characterization, and optimization of green silver nanoparticles using *Neopestalotiopsis clavispora* and evaluation of its antibacterial, antibiofilm, and genotoxic effects. *The Eurobiotech Journal*, 5(3), 109-122. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2021-0020>
- Kaur, H., Gelain, J., Marin, M. V., Peres, N. A., & Schnabel, G. (2023). Development of a molecular tool for identification of a new *Neopestalotiopsis* sp. associated with disease outbreaks on strawberry. *Plant Disease*, 107(5), 1544-1549. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-22-2117-RE>
- Kumar, V., & Prasher, I. B. (2022). Seasonal variation and tissues specificity of endophytic fungi of *Dillenia indica* L. and their extracellular enzymatic activity. *Archives of Microbiology*, 204(6), 341. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02933-7>

- Landeros G. E. C., Hernández Pérez, A., Cerna Chávez, E. & Ochoa Fuentes, Y. M. (2024). Diversidad de hongos Asociados al Cultivo del Arándano en Michoacán, México. *Scientia Fungorum*, 55, e1449-e1449. <https://doi.org/10.33885/sf.2024.55.1449>
- Liang, J., Guo, F., Cao, S., Zhao, K., Zhao, K., Wang, H., Shao, X., Wei, Y., Zhang, C., Zheng, Y. & Xu, F. (2022). γ -aminobutyric Acid (GABA) alleviated oxidative damage and programmed cell death in fresh-cut pumpkins. *Plant Physiology and Biochemistry*, 180, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.03.029>
- Ma, X., Qin, Y., Xiang, Y., He, L., Song, F., Wang, Z., Jiang, Y., & Wu, L. (2023). First report of *Neopestalotiopsis rosae* causing leaf blight on shatangju in southern China. *Plant Disease*, 107(8), 2535. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-22-2066-PDN>
- Muslimin, N. S., Yusof, F. Z. M., Kassim, N. Q. B. & Khalil, K. A. (2022). Molecular identification of fungi associated with plant rot disease of soursop (*Annona Muricata*) in Seri Menanti, Negeri Sembilan. *Malaysian Journal of Biochemistry & Molecular Biology*, 25(3), 18-26.
- Rebollar-Alviter, A., Silva-Rojas, H. V., Fuentes-Aragón, D., Acosta-González, U., Martínez-Ruiz, M. & Parra-Robles, B. E. (2020). An emerging strawberry fungal disease associated with root rot, crown rot and leaf spot caused by *Neopestalotiopsis rosae* in Mexico. *Plant Disease*, 104(8), 2054-2059. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-19-2493-SC>
- Rodríguez-Gálvez, E., Hilário, S., Lopes, A. & Alves, A. (2020). Diversity and pathogenicity of *Lasiodiplodia* and *Neopestalotiopsis* species associated with stem blight and dieback of blueberry plants in Peru. *European Journal of Plant Pathology*, 157(1), 89-102. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01983-1>
- Santos, G. S., Mafia, R. G., Aguiar, A. M., Zarpelon, T. G., Damacena, M. B., Barros, A. F. & Ferreira, M. A. (2020). Stem rot of eucalyptus cuttings caused by *Neopestalotiopsis* spp. in Brazil. *Journal of Phytopathology*, 168(6), 311-321. <https://doi.org/10.1111/jph.12894>
- Sarmiento-Chacón, M., Hernández-García, V., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. A., & Ríos-Velasco, C. (2023). *Neopestalotiopsis* sp. and *Colletotrichum karstii*, causal agents of leaf spots on camedor palm (*Chamaedorea quezalteca*) in Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(2), 165-181. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2302-7>
- Schierling, T. E., Voegeli, R. T. & El-Hasan, A. (2024). First report on the emergence of *Neopestalotiopsis rosae* as a severe economic threat to strawberry production in Germany. *Microorganisms*, 13(1), 6. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010006>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica) Consultado 12/12/2025. (2022). *Monitor fitosanitario*. from: <https://dj.senasica.gob.mx/AnalisisSanitario/Secciones/5>
- Sharifnabi, B., & Nourbakhsh, M. (2024). Morphological and molecular characterization of a novel *Neopestalotiopsis clavispora*, causing rose stem canker in Iran. *Mycologia Iranica*, 11(1), 101-109. <https://doi.org/10.22092/mi.2024.367808.1294>
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Consultado 12/12/2025. *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Sinuhaji, B., Wong, G., Serly, P., Setiawan, R. F. & Virnanda, P. (2024). Empowering farmers through assistance in producing alternative photosynthetic bacteria (PSB) fertilizers for corn crops in Sigi District. *Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment*

- (AJARCDE), 8(2), 203-207.
<https://doi.org/10.29165/ajarcde.v8i2.423>
- Sun, Q., Harishchandra, D., Jia, J., Zuo, Q., Zhang, G., Wang, Q., Yan, J., Zhang, W. & Li, X. (2021). Role of *Neopestalotiopsis rosae* in causing root rot of strawberry in Beijing, China. *Crop Protection*, 147, 105710.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105710>
- Tiku, A. R. (2018). Antimicrobial compounds and their role in plant defense. In *Molecular Aspects of Plant-Pathogen Interaction*. 283-307. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-7371-7_13
- Tran, T. N. M., Vu, N. B. D., & Nguyen, M. H. (2023). Antifungal activity of essential oil-encapsulated lipid nanoemulsions against *Neopestalotiopsis rosae* causing leaf spot on strawberry. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 130(4), 823-832.
<https://doi.org/10.1007/s41348-023-00760-6>
- Wang, J., Song, L., Gong, X., Xu, J., & Li, M. (2020). Functions of jasmonic acid in plant regulation and response to abiotic stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1446.
<https://doi.org/10.3390/ijms21041446>
- Wu, H. Y., Tsai, C. Y., Wu, Y. M., Ariyawansa, H. A., Chung, C. L. & Chung, P. C. (2021). First report of *Neopestalotiopsis rosae* causing leaf blight and crown rot on strawberry in Taiwan. *Plant Disease*, 105(2), 487-487.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-05-20-1045-PDN>
- Xia, Y., Liu, J., Chen, C., Mo, X., Tan, Q., He, Y., Wang, Z., Yin, J. & Zhou, G. (2022). The multifunctions and future prospects of endophytes and their metabolites in plant disease management. *Microorganisms*, 10(5), 1072.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10051072>
- Xu, J., Zhang, N., Wang, K., Xian, Q., Dong, J., & Chen, X. (2022). Exploring new strategies in diseases resistance of horticultural crops. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1021350.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1021350>
- Xu-X., Chen, Y., Li, B., Zhang, Z., Qin, G., Chen, T., & Tian, S. (2022). Molecular mechanisms underlying multi-level defense responses of horticultural crops to fungal pathogens. *Horticulture Research*, 9, uhac066.
<https://doi.org/10.1093/hr/uhac066>