

PUDRICIÓN RADICULAR EN MANGO (*Mangifera indica* L.): AISLAMIENTO, HISTOPATOLOGÍA Y SENSIBILIDAD DE *Phymatotrichopsis* A ACEITES ESENCIALES

ROOT ROT IN MANGO (*Mangifera indica* L.): ISOLATION, HISTOPATHOLOGY AND SENSITIVITY OF *Phymatotrichopsis* TO ESSENTIAL OILS

Ximena Amairany Ramírez-Orozco¹, Francisco López-Juan^{2a}, Aida Rubí Cruz-Luna^{2b*} y Alfonso Vásquez-López^{2c*}

¹ Facultad de Biología, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Av. Universidad S/N. Ex-Hacienda 5 Señores, C.P. 68120, Oaxaca, México

^{2a} Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR Unidad Oaxaca. Hornos 1003; Col. Noche Buena; Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México

^{2b} Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR Unidad Oaxaca. Hornos 1003; Col. Noche Buena; Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México
<https://orcid.org/0000-0003-3443-6278>

^{2c} Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR Unidad Oaxaca. Hornos 1003; Col. Noche Buena; Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México
<https://orcid.org/0000-0001-5628-5525>

* Autor para correspondencia: luna_060877@hotmail.com; avasquez@ipn.mx

RESUMEN

Phymatotrichopsis omnivora (Duggar) Hennebert, induce la pudrición texana en árboles de mango, provocando muerte prematura. En San Francisco Ixhuatán, Oaxaca, México, se encontraron árboles de mango, var. Ataulfo, con síntomas de pudrición texana, lo cual representa una amenaza para el cultivo. Por ello, el objetivo del presente estudio fue aislar a *Phymatotrichopsis* de raíces de árboles sintomáticos, evidenciar daños celulares en la raíz y evaluar *in vitro* la sensibilidad del patógeno a aceites esenciales vegetales. En la corteza de las raíces infectadas se encontró micelio recién formado, semi-maduro y cordones miceliales o rizomorfos. El hongo se aisló en medio PDA a partir de micelio recién formado. Los cortes histológicos de tejido radical, teñidos con safranina O-ácida y verde rápido, mostraron separación y fragmentación de las capas celulares de la epidermis, corteza, endodermis y floema; las células sufrieron lisis y colapsaron. En el xilema no se observaron daños. Posteriormente, se evaluó *in vitro* el efecto de cuatro concentraciones de nueve aceites esenciales sobre el crecimiento micelial del hongo. Los aceites de tomillo (*Thymus vulgaris*), clavo (*Syzygium aromaticum*), menta (*Mentha piperita*), ajo (*Allium sativum*) y te limón (*Cymbopogon citratus*) inhibieron en 100% el crecimiento del hongo a partir de 100 µL L⁻¹, cilantro (*Coriandrum sativum*) a partir de 250 µL L⁻¹ y eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) y pitonia (*Lippia alba*) a partir de 1.000 µL L⁻¹. La pudrición texana en árboles de mango es una enfermedad de importancia económica, por lo que es importante explorar alternativas viables y sustentables que coadyuven a la supresión del patógeno.

Palabras clave: Cordones miceliales, esclerocios, *Mangifera indica*, rizomorfos, manejo integrado de cultivos.

ABSTRACT

Phymatotrichopsis omnivora (Duggar) Hennebert causes Texas root rot in mango trees, leading to premature death. In San Francisco Ixhuatán, Oaxaca, Mexico, mango trees cv. Ataulfo were found exhibiting symptoms of Texas root rot, posing a threat to the crop. The objective of this study was to isolate *Phymatotrichopsis* from the roots of symptomatic trees, document cellular damage in the roots, and evaluate the pathogen's *in vitro* sensitivity to plant essential oils. Newly formed, semi-mature mycelium and mycelial cords or rhizomorphs were found in the bark of infected roots. The fungus was isolated on PDA medium from newly formed mycelium. Histological sections of root tissue stained with acid safranin O and fast green showed separation and fragmentation of the epidermal, cortical, endodermal, and phloem cell layers, with cells undergoing lysis and collapsed. No damage was observed in the xylem. Subsequently, the effect of four concentrations of nine essential oils on fungal mycelial growth was evaluated *in vitro*. Essential oils from thyme (*Thymus vulgaris*), clove (*Syzygium aromaticum*), peppermint (*Mentha piperita*), garlic (*Allium sativum*), and lemongrass (*Cymbopogon citratus*) inhibited fungal growth by 100% at concentrations of 100 $\mu\text{L L}^{-1}$ or higher; coriander (*Coriandrum sativum*) achieved 100% inhibition at 250 $\mu\text{L L}^{-1}$ or higher; and eucalyptus (*Eucalyptus citriodora*) and bushy matgrass (*Lippia alba*) achieved 100% inhibition at 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$ or higher. Texas root rot in mango trees is an economically important disease, highlighting the need to explore viable and sustainable alternatives for pathogen suppression.

Keywords: mycelial cords, sclerotia, *Mangifera indica*, rhizomorphs, integrated crop management.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de mango (*Mangifera indica* L.) es de trascendencia estratégica y económica para México; en 2025 se cultivaron 239.500 ha y la producción fue de 2,5 millones de ton. En Oaxaca, se cultivaron 19.392 ha (6° lugar nacional en superficie sembrada) (SIAP, 2025); la principal región productora de mango es el Istmo de Tehuantepec con una superficie que supera las 17.400 ha y un volumen de producción superior a 190 t anuales. En la zona se cultivan principalmente variedades como: Criollas (5.024 ha), Ataulfo (4.689 ha), Oro (4.152 ha) y Tommy Atkins (3.609 ha); las variedades Ataulfo y Tommy Atkins se destinan, en gran parte, al mercado internacional (SIAP, 2025). En 2025, en San Francisco Ixhuatán, Oaxaca, se reportó una superficie sembrada de mango de 913 ha y con una producción de 10.300 t, destacando la superficie sembrada con mango Tommy Atkins (333 ha) y Ataulfo (275 ha) (SIAP, 2025).

Una enfermedad importante, pero poco estudiada en el cultivo de mango, es la pudrición de raíz o pudrición texana, causada por *Phymatotrichopsis*. En EE.UU., se reporta interés a esta enfermedad en el cultivo de algodón (*Gossypium* spp.), alfalfa (*Medicago sativa*), manzana (*Malus domestica*), durazno (*Prunus persica*) y uva (*Vitis vinifera*) (Uppalapati et al., 2010; EFSA, 2019); y en México, en nogal pecanero (*Carya illinoensis*) (Samaniego-Gaxiola et al., 2019; Pérez-Álvarez et al., 2022); pero poco se ha documentado en mango.

Phymatotrichopsis omnivora es un hongo

habitante del suelo, necrotrófico y/o hemibiotrófico, adaptado a suelos con bajo contenido de materia orgánica (1%), pH alcalino (7,5-8,5) y temperatura óptima de 28 °C (Kenerley et al., 1998; Kankanala et al., 2020; Viret y Gindro, 2025); en el suelo se disemina por medio de conidios e hifas vegetativas (Mattupalli et al., 2022); sobrevive como hifas melanizadas y trenzadas, formando cordones miceliales y esclerocios, encontrados a profundidades de 0,5 a 2,6 m. El hongo infecta la raíz de la planta hospedante, destruye las células de la epidermis, corteza y floema, impidiendo el flujo de agua, provocándole muerte prematura (CAB International, 2007; Goldberg, 2005). Los estudios realizados para coadyuvar a la supresión del hongo incluyen evaluaciones de harina de semillas oleaginosas e isotiocianatos (Hu et al., 2011), ácido acético, butírico, fórmico y propiónico (Samaniego-Gaxiola y Balagurusamy, 2013); antagonismo con *Trichoderma* spp. (López et al., 2015) y con bacterias rizosféricas de árboles frutales (Martínez-Escudero et al., 2018). Los estudios sobre el efecto de aceites esenciales contra el patógeno son escasos. Existe evidencia de que el aceite de orégano (*Origanum vulgare*) inhibe el crecimiento micelial de *P. omnivora* (Amini et al., 2016; Valero-Galván et al., 2005); esta evidencia alienta a seguir evaluando aceites esenciales de otras especies vegetales, para mitigar la actividad del patógeno.

El objetivo del presente estudio fue aislar a *Phymatotrichopsis* de raíces de árboles de mango var. Ataulfo con síntomas de pudrición texana encontrados en San Francisco Ixhuatán, Oaxaca;

evidenciar daños celulares en la raíz y evaluar *in vitro* la sensibilidad del hongo a aceites esenciales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en San Francisco Ixhuatán (16°21' N, 94°28' O, altitud 0-300 msnm), que pertenece al distrito de Juchitán de Zaragoza, ubicado en la región del Istmo de Tehuantepec en el estado de Oaxaca, México. Cuenta con un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y principios de otoño; la temperatura promedio anual oscila entre 26 y 30 °C. Destaca su cercanía con la Laguna Superior y el Océano Pacífico (INEGI, 2022). En 2025, en la localidad se reportó una superficie sembrada de mango de 913 ha con una producción de 10.300 t. Destacó la superficie sembrada con mango Tommy Atkins (333 ha) y Ataulfo (275 ha) (SIAP, 2025).

Recolecta de muestras biológicas

Las muestras fueron recolectadas en San Francisco Ixhuatán de árboles de mango, var. Ataulfo de entre 8-12 años con síntomas de pudrición texana. En un huerto comercial de 60 ha, mediante un muestreo dirigido, se seleccionaron 10 árboles sintomáticos; de cada uno se tomaron muestras de raíces secundarias con pudrición cortical y presencia de micelio en tres etapas de desarrollo: micelio joven, semi-maduro y maduro. Las muestras se colocaron en bolsas de papel para su traslado al laboratorio de Fitopatología del CIIDIR-Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional. Las muestras se procesaron 24 h después de su colecta. En el laboratorio, se sembraron muestras de los tres tipos de micelio en medio de cultivo papa-dextrosa-agar (PDA, Bioxon®, México) con Cloranfenicol + Ampicilina (100 mg L⁻¹). Previo a la siembra, el micelio se desinfectó con NaOCl a 1% durante 1 min y etanol a 70% por 1 min y se enjuagó con agua destilada estéril (Senanayake et al., 2020). Las colonias fúngicas resultantes se purificaron mediante corte de punta de hifa y se cultivaron en PDA a 22 °C en oscuridad constante durante 30 días. Finalmente, se preservaron en tubos de ensayo con PDA inclinado y aceite mineral estéril (Scruggs y Quezada-Ocampo, 2016).

Caracterización morfológica

La caracterización morfológica del hongo se realizó a partir de una colonia pura cultivada en PDA, incubada en oscuridad a 22 °C por 30 días. Se registró el color del micelio, velocidad de crecimiento radial, presencia de estructuras cruciformes en hifas, presencia o ausencia de conidios y formación de cordones miceliales

(Uppalapati et al., 2010). Las características microscópicas del micelio se observaron con un microscopio electrónico de barrido (MEB) modelo JSM- IT300LV (JEOL).

Caracterización molecular

El ADN de *Phymatotrichopsis* sp. se extrajo con la técnica de Ahrens y Seemüller (1992). El micelio se maceró durante 40 s en 300 µL de solución amortiguadora (SDS) y se incubó a 65 °C en baño María por 1 h; cada 10 min se agitó con un vortex; posteriormente se agregó 1 mL de una mezcla de fenol/cloroformo/alcohol isoamílico (25:24:1), nuevamente se mezcló con el vortex y se centrifugó por 5 min a 12.000 rpm; el sobrenadante se transfirió a un tubo eppendorf de 5,0 mL y se adicionaron 300 µL de cloroformo; se mezcló por 30 s con el vortex y centrifugó a 12.000 rpm por 15 min; el sobrenadante fue transferido a un tubo eppendorf de 5,0 mL y se adicionaron 200 µL de isopropanol frío; se homogeneizó por inversión y el ADN se dejó precipitar durante 12 h; posteriormente se centrifugó a 12.000 rpm por 15 min, el sobrenadante se decantó y el pellet se dejó secar a temperatura ambiente por 30 min, finalmente se resuspendió en 500 µL de agua destilada estéril. La integridad y calidad del ADN se verificó por electroforesis en un gel de agarosa al 1,2% teñido con 1 µL de bromuro de etidio observado bajo luz ultravioleta.

La amplificación de las regiones ITS1 e ITS2 de los genes ribosomales (rRNA) se efectuó por PCR convencional usando los iniciadores ITS4 (TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC) e ITS5 (GGA AGT AAA AGT CGT AAC AAG G) (White et al., 1990). Para la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR) se elaboró una mezcla con un volumen final de 50 µL (3 µL de ADN, 29,9 µL de agua ultrapura estéril, 1,8 µL de cada primer: ITS4 e ITS5, 5 µL de 10x tampón de PCR, 3,2 µL de MgCh, 0,3 µL de Platinum Taq ADN polimerasa de alta fidelidad (Invitrogen™) y 5 µL dNTP (Invitrogen™). Se empleó un termociclador con las condiciones de la PCR; para ITS fueron: 95°C por 4 min; 35 ciclos de 95°C por 30 s; 52°C por 30 s; 72°C por 45 s y 72°C por 10 min. La amplificación de las regiones ITS se evidenció en gel de agarosa a 1,2% teñido con 1 µL de bromuro de etidio y se observó bajo luz ultravioleta. El producto amplificado se purificó con el kit Wizard (Promega®). La purificación y secuenciación la realizó MacroGen Inc. Seul, Corea. Las secuencias obtenidas se ensamblaron y editaron con el software Lasergene® (v5, DNASTAR Inc.). Para la identificación taxonómica a nivel de especie, las secuencias consenso se compararon con las secuencias depositadas en la base de datos de nucleótidos del National Center

for Biotechnology Information (NCBI; www.ncbi.nlm.nih.gov/), utilizando la herramienta BLASTn (Basic Local Alignment Search Tool), considerando el porcentaje de identidad de secuencia y el valor E (E-value).

Histopatología

Para realizar la histopatología se siguió la metodología con modificaciones de Yeung et al. (2020); se tomaron las raíces con pudrición cortical con presencia de cordones miceliales y se colocaron en solución fijadora FAA (etanol absoluto 50%, ácido acético glacial 5%, formaldehído 10%, agua destilada 35%) durante 48 h. Después se cortaron segmentos de raíces de 1 cm de longitud se deshidrataron con alcohol etílico a concentraciones gradualmente ascendente (50, 70, 96 y 100%) (4 h en cada alcohol) y se infiltraron con etanol absoluto + xileno (1:1); luego tres veces en xileno y dos veces en parafina (Paraplast® marca SIGMA) (3 h/inmersión). Las muestras se colocaron en cubos de papel (2 cm³), se agregó parafina líquida a 60 °C y se dejó solidificar durante 24 h a temperatura ambiente. Posteriormente se realizaron cortes histológicos de 10 µm de espesor con un micrótopo de desplazamiento modelo Spencer 820. Los cortes se colocaron en baño de flotación con 3,0 g de grenetina a 68 °C por 30 s y se montaron en portaobjetos. Los cortes fueron teñidos de acuerdo con la técnica de Johansen (1940) y Curtis (1986) de tinción diferencial safranina O ácida-verde rápido; el excedente de parafina se eliminó de los cortes con tres lavados con xileno (3 min por lavado); enseguida se hidrataron con alcohol etílico a concentraciones gradualmente descendente (100, 96, 70 y 50%) (3 min por concentración). Posteriormente, los cortes se mantuvieron en safranina O ácida a 1% durante 30 min; se deshidrataron con alcohol etílico (50, 70 y 96%) por 3 min en cada concentración y se tiñeron con verde rápido (Técnica Química®, México) al 1% por 30 s; el exceso del colorante se eliminó con agua destilada; en seguida se volvieron a deshidratar con alcohol etílico (96 y 100%) (por 3 min); finalmente el tejido teñido se lavó tres veces consecutivas con xileno (3 min por lavado). Finalmente, los cortes se cubrieron con un cubreobjetos y se agregó bálsamo de Canadá; se dejaron secar durante 24 h. Los cortes se examinaron con un microscopio compuesto Carl Zeiss con cámara integrada y se registraron los cambios anatómicos.

Sensibilidad de *Phymatotrichopsis* a aceites esenciales vegetales

En este estudio se evaluaron aceites esenciales de orégano (*Origanum vulgare*), cilantro

(*Coriandrum sativum*), eucalipto (*Eucalyptus citriodora*), pitona (*Lippia alba*), tomillo (*Thymus vulgaris*), clavo (*Syzygium aromaticum*), menta (*Mentha piperita*), ajo (*Allium sativum*) y te limón (*Cymbopogon citratus*). La obtención de los aceites esenciales se realizó mediante la técnica de hidrodestilación asistida por microondas, siguiendo la metodología de Drinić et al. (2020) modificada. En un matraz tipo bola (2,0 L), adaptado a un horno de microondas, se colocaron 200 g de tejido vegetal fresco y 1.0 L de agua destilada. La extracción para todas las especies se realizó hasta agotar el contenido de aceite esencial, durante un tiempo total de 30 min, con periodos de trabajo de 2 min y periodos de descanso de 1 min. El producto de la destilación fue una emulsión de agua con aceite que fue separada con una trampa cleverger. El aceite se deshidrató con 0,5 g de Na₂SO₄, se agitó durante 15 min, se filtró y se almacenó a 4 °C.

La inhibición de crecimiento micelial *in vitro* de *P. omnívora* se realizó con los nueve aceites esenciales y cuatro concentraciones (100, 250, 500 y 1000 µL L⁻¹) con diez repeticiones por tratamiento. El experimento se realizó por la técnica de agar envenenado (Amini et al., 2012). En medio de cultivo PDA, cuando alcanzó una temperatura de 30 °C se le agregó la dosis correspondiente del aceite y se le adicionó polisorbato 20 a razón de 0,1%. El tratamiento testigo fue PDA + polisorbato 20 sin AE. El medio de cultivo se vació en cajas de Petri de 8,0 cm de diámetro y se dejó solidificar durante 24 h; posteriormente se transfirió un disco (Ø = 0,5 cm) de PDA con micelio activo del hongo y se incubó a 22±2 °C con fotoperiodo de 12 h. Cada 24 h se registró el crecimiento radial del micelio durante 15 días. Se establecieron 40 tratamientos resultantes de la interacción de cuatro concentraciones (100, 250, 500 y 1000 µL L⁻¹) de 10 elementos evaluados (9 aceites esenciales y azufre elemental); se incluyó un control negativo (PDA sin aceite). Cada tratamiento tuvo diez repeticiones. Los datos resultantes se sometieron a un diseño completamente al azar y se analizaron mediante ANOVA y comparación de medias (Tukey α=0,05) con el programa estadístico SAS 9.0. La inhibición (%) del crecimiento radial del micelio se estimó con la siguiente fórmula:

$$I (\%) = \left(1 - \frac{Dt}{Dc}\right) \times 100$$

I: Inhibición del crecimiento micelial (%). Dt: diámetro del micelio en la caja de Petri del control negativo (0 µL L⁻¹). Dc: diámetro del micelio en la caja de Petri del tratamiento (100, 250, 500 y 1000 µL L⁻¹).

RESULTADOS

Síntomas en árboles de mango *var. Ataulfo* en San Francisco Ixhuatán, Oaxaca.

En la huerta de estudio, los árboles sintomáticos exhibieron hojas con ligero amarillamiento y signos de deshidratación; posteriormente se tornaron de color café-cobrizo con textura quebradiza, márgenes deformes y permanecieron adheridas a las ramas. Los frutos mostraron deshidratación, madurez prematura y permanecieron en el árbol. Los árboles con síntomas avanzados murieron prematuramente (Fig. 1A). La corteza del tallo y ramas tuvo consistencia seca, corchosa y de fácil desprendimiento. Sobre la corteza de las raíces

se encontró micelio diferenciado por su fase de desarrollo: micelio joven o recién formado color blanco de forma radial, consistencia algodonosa, hifas individuales, separadas y de fácil desprendimiento de la corteza. Micelio semimaduro color amarillo-claro, congregándose en rizomorfos de consistencia suave, hifas fácilmente separables. Micelio maduro color café oscuro trenzado en cordones miceliales compactos, duros y adheridos fuertemente a la raíz (Figs. 1B y 1C).

Hongo aislado *in vitro*

En medio de cultivo PDA con antibióticos hubo desarrollo de colonias fúngicas a partir del

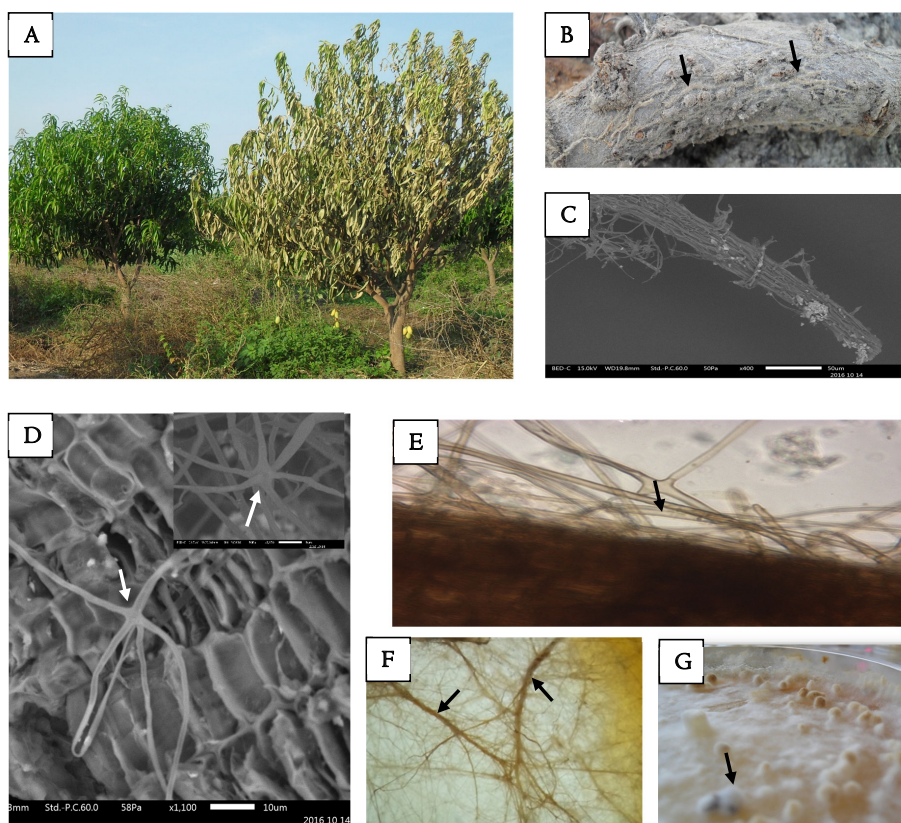


Fig. 1. Pudrición texana en mango *var. Ataulfo*. A) Árbol sintomático exhibiendo hojas de color café bronceado, marchitas, textura quebradiza, márgenes deformes, adheridas a las ramas. Frutos con madurez prematura, deshidratados y adheridos al árbol. Al fondo de la imagen se observa un árbol asintomático. B) Cordones miceliales en la raíz. C) Cordón micelial visto en el MEB (400x). D y E) Estructuras cruciformes hifales vistas en el MEB y en medio de cultivo PDA. F) Cordones miceliales formados en PDA (50 días). G) Esclerocios en PDA (50 días).

Fig. 1. Texas rot in mango *cv. Ataulfo*. A) Symptomatic tree showing bronze-brown colored, wilted leaves, brittle texture, deformed margins, attached to branches. Fruits with premature ripening, dehydrated, and attached to the tree. In the background, an asymptomatic tree is observed. B) Mycelial cords on the root. C) Mycelial cord seen under SEM (400x). D and E) Hyphal cruciform structures seen under SEM and on PDA culture medium. F) Mycelial cords formed on PDA (50 days). G) Sclerotia on PDA (50 days).

micelio joven; del micelio semimaduro y maduro no hubo crecimiento. El hongo desarrolló micelio a los 30 días de color café-claro, aéreo, hifas aciculares con ramificación cruciforme sin producción de conidios (Figs. 1D y 1E). Dentro de la caja de Petri, en los sitios donde se removió el medio de cultivo, el hongo formó estructuras similares a rizomorfos de consistencia suave (Fig. 1F).

La tasa de crecimiento radial del micelio promedio fue de 0,8 cm/24 h. Después de 50 días el hongo formó esclerocios de color café-oscuro de 1,1 cm de longitud x 0,4 cm de ancho (Fig. 1G). De acuerdo con sus características culturales y morfológicas, el hongo se identificó como *Phymatotrichopsis* sp. (Uppalapati et al., 2010). El análisis molecular confirmó a *P. omnivora*, cuya secuencia genética de este hongo tuvo una identidad de 98% depositado en el banco de genes (NCBI) con número de acceso EF442000.

Histopatología

En un corte transversal de una raíz secundaria asintomática se observó que las capas celulares de la epidermis, corteza, endodermis, xilema y floema estuvieron unidas; no se observó desprendimiento entre ellas, ni fragmentación o algún daño estructural a nivel de tejido o celular.

El tejido epidérmico se integró por células rectangulares, compactas y organizadas; en este tejido se observó indicios de formación de pelos absorbentes. La corteza se observó como un tejido grueso constituido por células rectangulares, íntegras y sin fragmentación. En las células del floema y xilema no se observaron daños estructurales. Las células de los tejidos descritos no sufrieron lisis (Fig. 2A). En un corte transversal de una raíz secundaria sintomática se apreció que el tejido de la epidermis, corteza, endodermis y floema se separaron entre sí y se fragmentaron; las células sufrieron lisis y colapsaron. Fue evidente la desorganización celular. Las células del xilema aparentemente no sufrieron daños, se observaron íntegras, sin lisis ni desorganización (Fig. 2B).

Sensibilidad de *Phymatotrichopsis* a aceites esenciales vegetales

El análisis de varianza mostró que sí hubo diferencias significativas ($P = 0,05$) entre los tratamientos evaluados para la inhibición del crecimiento promedio del micelio de *P. omnivora*. Los aceites de *T. vulgaris*, *S. aromaticum*, *M. piperita*, *A. sativum* y *C. citratus* inhibieron en 100% el crecimiento del micelio del hongo a partir de 100 $\mu\text{L L}^{-1}$; *C. sativum* a partir de 250 $\mu\text{L L}^{-1}$ y *E. citriodora* y *L. alba* a partir de 1.000 $\mu\text{L L}^{-1}$. Por

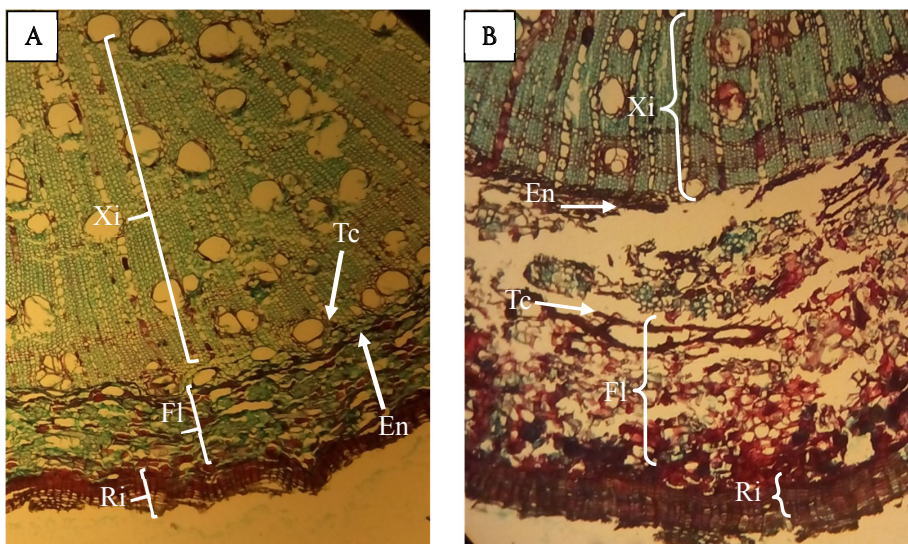


Fig. 2. Cortes transversales de raíz sana y enferma de mango cv. Ataulfo. A) Raíz sana, Tc) Tubos cribosos, Xi) Xilema, Fl) Floema, Ri) Peridermis En) Endodermis. B) Raíz enferma mostrando desprendimiento de corteza, daño en la región de floema, fragmentación y lignificación de las paredes celulares.

Fig. 2. Cross-sections of healthy and diseased roots of mango cv. Ataulfo . A) Healthy root; Tc) sieve tubes; Xi) xylem; Fl) phloem; Ri) periderm; En) endodermis. B) Diseased root showing bark detachment, damage to the phloem region, cell fragmentation, and cell wall lignification.

su parte, los aceites de *L. alba*, *E. citriodora* y *O. vulgare* inhibieron el crecimiento micelial en 90,5, 94,2 y 95,4%, respectivamente; los dos primeros a 500 $\mu\text{L L}^{-1}$ y el tercero a 1.000 $\mu\text{L L}^{-1}$ (Fig. 3). Entre todos estos tratamientos mencionados no hubo diferencias significativas, pero sí se diferenciaron del control positivo (azufre elemental) y negativo (PDA sin aceite) (Tabla 1). En el resto de los tratamientos la inhibición micelial estuvo en un intervalo de 20,2 a 83,7%.

DISCUSIÓN

Phymatotrichopsis omnivora es el agente causal de la enfermedad “pudrición radicular o pudrición texana” de más de 2.000 especies de dicotiledóneas, incluidas 107 especies de importancia económica en la agricultura (Olsen 2015; Kankanala et al., 2020). De acuerdo con Walla y Janne (1982) y Hu (2020), las plantas infectadas inicialmente presentan un ligero amarillamiento o bronceado de las hojas, luego se marchitan y permanecen firmemente adheridas a la planta. En las raíces se observa pudrición de la corteza con formación de cordones miceliales; las plantas mueren prematuramente. Estos síntomas

se observaron en **árboles de mango var. Ataulfo** de 8-12 **años de edad** en San Francisco Ixhuatán, Oaxaca.

En el cultivo de mango poco se ha documentado sobre la enfermedad y su presencia es preocupante ya que induce la muerte prematura de los árboles, lo que se traduce en **pérdidas económicas importantes**. En EE.UU. se ha puesto interés a la enfermedad en el cultivo de algodón (*Gossypium* spp.), alfalfa (*M. sativa*), manzana (*M. domestica*), durazno (*P. persica*) y uva (*V. vinifera*) (Uppalapati et al., 2010; EFSA, 2019). En México, los estudios científicos relacionados a la pudrición texana son escasos; los estudios pioneros se han realizado en el cultivo de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) (Samaniego-Gaxiola et al., 2019; Pérez-Álvarez et al., 2022); sin embargo, en otras especies vegetales, también de importancia económica, tal es el caso del mango, la enfermedad poco se ha estudiado a pesar de que México es uno de los principales exportadores de mango. En el estado de Oaxaca, la enfermedad está presente y puede diseminarse a otros hospedantes a diferentes regiones tropicales de país y comprometer las plantaciones y la productividad de los árboles de mango.

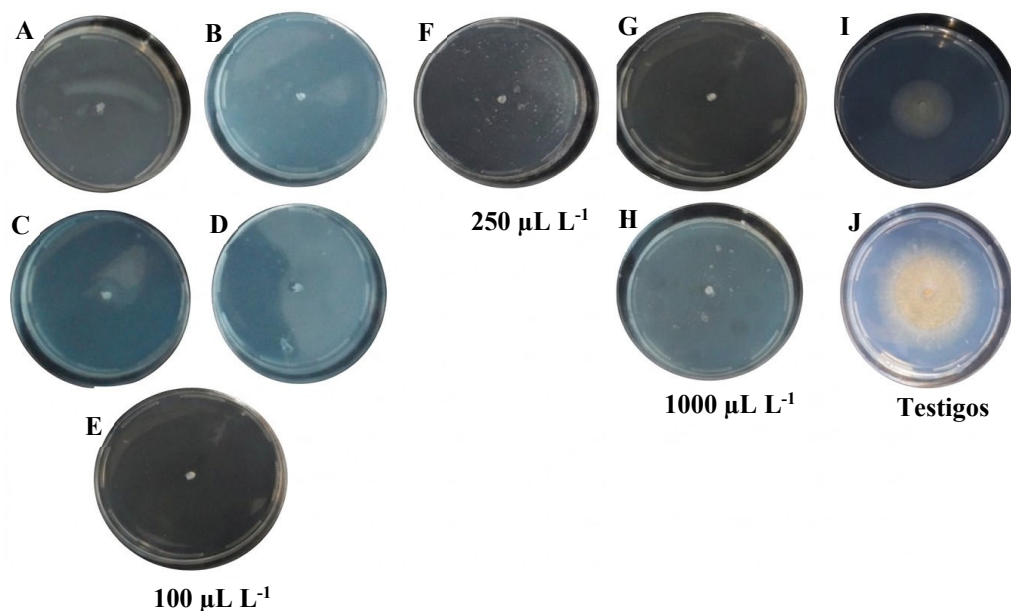


Fig. 3. Efecto de aceites esenciales sobre la inhibición del crecimiento del micelio de *P. omnivora* bajo la técnica de agar envenenado. (A) Ajo; (B) Té limón; (C) Clavo; (D) Tomillo; (E) Menta; (F) Cilantro; (G) Pitonia; (H) Eucalipto; (I) Azufre elemental (testigo positivo); (J) testigo negativo.

Fig. 3. Effect of essential oils on the inhibition of mycelial growth of *P. omnivora* using the poisoned agar technique. (A) Garlic; (B) Lemongrass; (C) Clove; (D) Thyme; (E) Peppermint; (F) Coriander; (G) Bushy matgrass; (H) Eucalyptus; (I) Elemental sulfur (positive control); (J) Negative control.

Tabla 1. Inhibición (%) y desviación estándar del crecimiento micelial de *Phymatotrichopsis omnivora* tratado con aceites esenciales vegetales y azufre elemental.**Table 1. Inhibition (%) and standard deviation of the mycelial growth of *Phymatotrichopsis omnivora* treated with plant essential oils and elemental sulfur.**

Aceite	Concentración, $\mu\text{L L}^{-1}$				
	0	100	250	500	1000
<i>Origanum vulgare</i>	-	20,2 $\pm$ 9,2ij	41,5 $\pm$ 16,1ghi	83,7 $\pm$ 19,8bcd	95,4 $\pm$ 8,0ab
<i>Coriandrum sativum</i>	-	79,1 $\pm$ 33,7abcde	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a
<i>Eucalyptus citriodora</i>	-	69,5 $\pm$ 31,4bcdef	62,4 $\pm$ 28,4def	94,2 $\pm$ 18,3ab	100 $\pm$ 0,0a
<i>Lippia alba</i>	-	29 $\pm$ 21,8hi	49,5 $\pm$ 27,6fgh	90,5 $\pm$ 16,8ab	100 $\pm$ 0,0a
<i>Thymus vulgaris</i>	-	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a
<i>Syzygium aromaticum</i>	-	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a
<i>Mentha piperita</i>	-	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a
<i>Allium sativum</i>	-	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a
<i>Cymbopogon citratus</i>	-	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a	100 $\pm$ 0,0a
Azufre elemental	-	57,6 $\pm$ 7,0efg	61,5 $\pm$ 5,6defg	66,1 $\pm$ 4,5cdefg	71,3 $\pm$ 2,8cdef
Testigo negativo	0,0	-	-	-	-

Números seguidos de letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$).

P. omnivora es un habitante natural del suelo que requiere condiciones muy específicas para su desarrollo. La formación de tapetes de micelio, producción de conidios y hasta la formación de rizomorfos requiere de pH alcalino, suelos arenosos con poca materia orgánica, **señalización química radical de los hospedantes, etc. (Streets, 1937) y cada estructura fúngica cumple con funciones específicas; por ejemplo**, en este estudio, se observó que ni el micelio semimaduro –caracterizado por una pigmentación café clara y fácil disgregación hifal, sin esclerotización – ni el micelio maduro –definido por cordones miceliales o rizomorfos café oscuro, compactos y fuertemente esclerosados– mostraron capacidad de desarrollo en el medio de cultivo sintético. Este comportamiento se explica por la especialización morfológica de las hebras miceliales de *Phymatotrichopsis omnivora*. Estas no son simplemente un conjunto de hifas agrupadas, sino estructuras pseudoparenquimáticas complejas y altamente diferenciadas que pierden su totipotencia vegetativa (Streets, 1937) y eventualmente forman esclerocios hipogeos de larga viabilidad (King et al., 1931). Además, están compuestas por hifas centrales de gran diámetro, cuya función principal es conectar las estructuras reproductivas con fuentes de nutrientes y agua, así como propagar el inóculo en el suelo (Marek et al., 2009). Asimismo, la activación de los cordones miceliales está en función de factores como la señalización química que emiten las raíces de los hospedantes susceptibles. Sin los exudados radiculares –ricos en carbohidratos,

aminoácidos y flavonoides– que actúan como señales quimiotácticas, no se activa la expresión genética requerida para que el hongo organice su micelio y desencadene el proceso de infección radicular (Gunasekaran, 1973; Uppalapati et al., 2010).

Se han sugerido diversas alternativas para el manejo del hongo; se incluyen prácticas culturales, control biológico, control químico y alternativas con productos naturales. Estos últimos han sido los menos estudiados; poco se ha documentado sobre el efecto de aceites esenciales contra *Phymatotrichopsis*; al respecto, Valero-Galván et al. (2005) evaluaron aceites esenciales de orégano (*Origanum vulgare*) a concentraciones de 0, 100, 150, 200, 250, 500 ppm y encontraron que el aceite, a partir de una dosis de 150 ppm, inhibió completamente el desarrollo del hongo. En nuestro estudio, el aceite esencial de *O. vulgare* inhibió el crecimiento micelial del hongo en 95,4% a una dosis de 1.000 ppm. Sin embargo, se encontró que los aceites de *T. vulgaris*, *S. aromaticum*, *M. piperita*, *A. sativum* y *C. citratus* inhibieron en 100% el crecimiento del micelio del hongo a partir de 100 $\mu\text{L L}^{-1}$; *C. sativum* a partir de 250 $\mu\text{L L}^{-1}$ y *E. citriodora* y *L. alba* a partir de 1.000 $\mu\text{L L}^{-1}$. Se ha demostrado que el hongo es sensible a harinas e isotiocianatos (alilo, butilo, fenilo y bencilo) derivados de semillas de oleaginosas como mostaza (*Brassica juncea*), lino (*Linum usitatissimu*), sésamo (*Camelia sativa*), piñon (*Jatropha curcas*) y álamo de florida (*Triadica sebifera*); éstos inhibieron el desarrollo hifal del hongo y la germinación de esclerocios

(Hu et al., 2011).

Los aceites esenciales de diversas especies vegetales como eneldo (*Anethum graveolens*), geranio (*Pelargonium graveolens*), cilantro (*Coriandrum sativum*), albahaca (*Ocimum basilicum*), tomillo (*Thymus vulgaris*), mejorana (*Majorana hortensis*), menta (*Mentha piperita*) y comino (*Cuminum cyminum*) han mostrado actividad antifúngica contra hongos con origen en el suelo como *Fusarium* spp., *Sclerotinia sclerotiorum*, *Sclerotium rolfsii*, *Rhizoctonia solani*, *Macrophomina phaseolina*, *Pythium* sp., etc. (Saroj et al., 2019; El-Sherbieny et al., 2002; Queiroz et al., 2020; Fonseca-Guerra et al., 2025), pero no se han evaluado contra *Phymatotrichopsis*, a excepción de *O. vulgare* (Valero-Galván et al., 2005). La actividad fungicida o fungistática de los aceites esenciales vegetales se debe a la presencia de compuestos volátiles como linalol, borneol, timol y carvacrol en *T. vulgaris* (Zhang et al., 2024); citral en *C. citratus* (Khasanah et al., 2025); limoneno en *O. vulgare* (Prakasam et al., 2025), linalool y geraniol en *C. sativum* y *L. alba* (Nadeem et al., 2013; Saroj et al., 2019); entre muchos otros. Los mecanismos de acción de los compuestos activos de los aceites esenciales no se comprenden completamente, pero se ha observado que los aceites dañan la pared y membrana celular de las hifas y esporas, así como organelos celulares. El efecto antifúngico de los aceites esenciales también podría explicarse por la alteración de la morfogénesis por efecto de enzimas responsables de la síntesis de la pared celular, lo que provoca cambios en la integridad de las hifas, la alteración de la membrana plasmática y la destrucción mitocondrial (Rasooli et al., 2006; Soyulu et al., 2006).

A pesar de los promisorios resultados *in vitro* obtenidos en este estudio, la traducción de la bioactividad de los aceites esenciales a la escala de huerto comercial enfrenta limitaciones fisicoquímicas críticas. Compuestos como los terpenos y fenilpropanoides bioactivos (entre ellos el carvacrol, el timol, el citral, el eugenol y el cinamaldehído) presentan alta volatilidad y degradación (Li et al., 2022), además de una marcada adsorción en la materia orgánica del suelo, lo que dificulta su penetración hacia los estratos profundos (0.5–2.6 m) donde se ubican las estructuras de supervivencia y cordones miceliales de *P. omnivora*. Para superar estas barreras, la proyección práctica de estas moléculas requiere el desarrollo de tecnologías modernas capaces de superar las limitaciones de los métodos convencionales. Las nanoformulaciones de aceites esenciales es una tecnología promisoría para mejorar la estabilidad, la biodisponibilidad y la liberación

controlada de los aceites esenciales, al tiempo que reducen su volatilidad y degradación. Las nanoformulaciones para el empleo efectivo de los aceites esenciales incluyen las nanoemulsiones, nanotransportadores lipídicos, sistemas de liberación mesoporosos y plataformas de encapsulación con biopolímeros biocompatibles (ej. quitosano o alginato) (Pratama et al., 2025). Asimismo, su aplicación técnica en campo debe contemplar esquemas de quimiorrigación por goteo subterráneo o inyección profunda al perfil del suelo, garantizando que las concentraciones inhibitorias alcanzadas *in vitro* puedan ser distribuidas de manera homogénea en la zona radicular afectada; por ejemplo, para el suministro de nanoformulaciones se pueden adaptar técnicas modernas como son los inyectores de fertirrigación, tanque de suministro de productos químicos, venturi, bombas de pistón, inyector de motor de pistón hidráulico (energía hidráulica), bombas de diafragma y bombas dosificadoras eléctricas (Kang et al., 2026; Taha, 2022).

Por otra parte, no se encontraron estudios específicos que consignen los daños a nivel celular inducidos por el hongo en raíces de mango. En este contexto, se pueden citar los estudios realizados por Watkins (1938), quien realizó estudios histológicos de raíces de nogal pecanero infectadas por *Phymatotrichum omnivorum*, observando que las paredes de las células de la epidermis sufrieron lisis y modificaron su estructura, color y grosor, presumiblemente debido a la acción química de las secreciones fúngicas. En el floema y el cambium hubo extenso colapso celular; en el xilema el hongo se dispersó entre punteaduras, pero las paredes lignificadas resistieron la invasión fúngica. Por su parte, Brinkerhoff y Streets (1946) indicaron que el hongo puede penetrar por lenticelas, punto de emergencia de raíces laterales y heridas en la peridermis. Iniciada la infección, las hifas se propagaron intracelularmente en el floema, cambium, punteaduras del xilema y parénquima xilemático; hubo invasión en traqueidas y vasos. En las zonas de infección hubo acumulación de gomas (suberina o sustancias similares), y el almidón, que se almacena en abundancia en las raíces de nuez pecana recién infectadas, desapareció rápidamente en las células invadidas por el hongo. Goldberg (2005) menciona que el hongo destruye las células de la epidermis, corteza y floema de la raíz de las plantas infectadas, lo que impide el flujo de agua provocando su muerte prematura. Los daños celulares antes descritos también pudieron observarse en las raíces de mango var. Aaulfo, infectadas por *P. omnivora* en Oaxaca.

CONCLUSIONES

El hongo *Phymatotrichopsis omnivora* infecta los árboles de mango var. Ataulfo y causa la pudrición de la raíz de texas en San Francisco Ixhuatán, Oaxaca. Las raíces infectadas exhibieron pudrición de la corteza internamente; el tejido de la epidermis, corteza, endodermis y floema se separaron entre sí; las células sufrieron lisis y colapso. Las células del xilema aparentemente no sufrieron daños. Estas modificaciones anatómicas de la raíz provocan que los árboles mueran prematuramente. Los aceites evaluados ejercieron efecto antifúngico sobre el crecimiento micelial de *P. omnivora*. Los aceites de *T. vulgaris*, *S. aromaticum*, *M. piperita*, *A. sativum*, *C. citratus*, *C. sativum*, *E. citriodora* y *L. alba* fueron los más efectivos para inhibir el crecimiento del micelio de *P. omnivora* en condiciones *in vitro*.

Contribución de autores

Redacción y revisión bibliográfica: Ximena Amairany Ramírez Orozco; participación en trabajo de campo, metodología y redacción del borrador original: Francisco López Juan; revisión, edición y análisis: Aida Rubí Cruz Luna; supervisión, revisión y aprobación de la versión final del artículo: Alfonso Vásquez López.

Declaración sobre el uso de la IA generativa

Se utilizó la herramienta de inteligencia artificial Gemini (Google), exclusivamente con el propósito de mejorar la claridad, la fluidez del lenguaje y la precisión gramatical de este manuscrito, así como para optimizar la estructura de algunas oraciones. El contenido científico, la revisión bibliográfica, la estructura conceptual y las conclusiones fueron desarrollados íntegramente por los autores, sin que la herramienta sustituyera el pensamiento crítico ni la autoría original del trabajo.

LITERATURA CITADA

- Ahrens, U. and E. Seemüller. 1992. Detection de DNA of plant pathogenic mycoplasma-like organisms by polymerase chain reaction that amplifies a sequence of the 16S rRNA gene. *Phytopathology* 82:828-832.
- Amini, M., N. Safaie, M.J. Salmani, and M. Shams-Bakhsh. 2012. Antifungal activity of three medicinal plant essential oils against some *Phytopathogenic fungi*. *Trakia J. Sci.* 10:1-8.
- Amini, J., V. Farhang, T. Javadi, and J. Nazemi. 2016. Antifungal effect of plant essential oils on controlling *Phytophthora* species. *Plant Pathol. J.* 32(1):16-24. doi: 10.5423/PPJ.OA.05.2015.0091
- Bhuiyan, M. N. I., M.S. Rahman, and M.M. Rahman. 2027. Toward autonomous food preservation through essential oil-based nanoformulations coupled with AI and foodomics for real-time safety and shelf-life prediction. *Food Control* 191:112455. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2026.112455>
- Brinkerhoff, L.A., and R.B. Streets. 1946. Pathogenicity and pathological histology of *Phymatotrichum omnivorum* (the fungus causing cotton or texas root rot) in a woody perennial - the pecan. Technical Bulletin No. 111. College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ). Link to Item <http://hdl.handle.net/10150/190670>
- CAB International. 2007. *Phymatotrichopsis omnivora* (cotton root rot). Crop Protection Compendium. CABI, Wallingford, UK. <https://www.cabi.org/cpc/datasheet/40311>
- Curtis, P.J. 1986. *Microtécnica Vegetal*. Trillas. p106. México.
- Drinić, Z., D. Pljevljakušić, J. Živković, D. Bigović and K. Šavikin. 2020. Microwave-assisted extraction of *O. vulgare* L. spp. *hirtum* essential oil: Comparison with conventional hydro-distillation. *Food and Bioprocess Technology* 120: 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.011>.
- El-Sherbiny, S.N., W.H. Zakey, and S.M. Abdel Ghafor. 2002. Antifungal action of some essential oils against fungi causing cotton seedling damping-off disease. *Annals of Agricultural Science* 47(3):1009-1020.
- Escudero, L. E. M., Castillo, A. M., Leal, R. P., Rodríguez, A. O. y Pérez, E. V. 2016. Estado del arte *Phymatotrichopsis omnivora* (SHEAR) duggar, revisión y actualidad. *Revista Biológica Agropecuaria Tuxpan* 4(1): 103-114. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v4i1.39>
- European Food Safety Authority. EFSA. 2019. Pest categorisation of *Phymatotrichopsis omnivora*. *EFSA Journal* 17(3): pp e05619, 33. <https://doi.org/10.2903/j.efsa>
- Fonseca-Guerra, I.R., A.M.V. Posada., M.E.B. Rozo., and M.E.B. Pineda. 2025. Essential oils of thyme (*Thymus vulgaris*) and oregano (*Origanum vulgare*) as an alternative for the control of pesticide-resistant *Fusarium* spp. in quinoa seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 105: 2236-2245. <https://doi-org.bibliotecapn.idm.oclc.org/10.1002/jsfa.13993>
- Goldberg, N. 2005. *Phymatotrichum* root rot. State University 229. p 1-4. New Mexico.

- Gunasekaran, M. 1973. Physiological studies on *Phymatotrichum omnivorum* IV. Effect of pH and the interaction of temperature, minerals and carbon source on growth *in vitro*. Mycopathologia et mycologia applicata 50(4):313-321. <https://doi.org/10.1007/BF02050031>
- Hu, J. 2020. Symptom identification of pecan *Phymatotrichopsis* root rot (PRR). The University of Arizona. Link to Item <http://hdl.handle.net/10150/669924>
- Hu, P., A.S. Wang., A.S. Engledow., E.B. Hollister., K. L. Rothlisberger., J. E. Matocha., D. A. Zuberer., T. L. Provin., F. M. Hons., and T.J. Gentry. 2011. Inhibition of the germination and growth of *Phymatotrichopsis omnivora* (cotton root rot) by oilseed meals and isothiocyanates. Applied Soil Ecology 49:68–75. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.06.014>
- Johansen, D.A. 1940. Plant Microtechnique. McGraw-Hill Publishing Company, Ltd. 523 p. 19411601161. London.
- Kang, S., J. Ouyang, Y. Li., and H. Yan. 2026. Enhancing piston-type fertilizer injection pump performance through check valve optimization. Agricultural Water Management 331: 110416. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110416>
- Kankanala, P., P. Jones., R. S. Nandety., D.A. Jacobson., and K.S. Mysore. 2020. Plasticity of *Phymatotrichopsis omnivora* infection strategies is dependent on host and nonhost plant responses. Plant Cell Environment 43: 1084-1101. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-21-0014-A>
- Kenerley, C.M., T.L. White., M.J. Jeger., and T.J. Gerik. 1998. Sclerotial formation and strand growth of *Phymatotrichopsis omnivora* in minirhizotrons planted with cotton at different soil water potentials. Plant Pathology 47: 259–266. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1998.00241.x>
- Khasanah, L.U., S. Ariviani., E. Purwanto., and D. Praseptianga. 2025. Chemical composition and citral content of essential oil of lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) leaf waste prepared with various production methods. Journal of Agriculture and Food Research 19:101570. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101570>
- King, C.J., H.F. Loomis., and C. Hope. 1931. Studies on sclerotia and mycelial strands of the cotton root-rot fungus. Journal of Agricultural Research 42: 827– 840.
- Li, Y.X., F. Erhunmwunsee., M. Liu., K. Yang., W. Zheng., and J. Tian. 2022. Antimicrobial mechanisms of spice essential oils and application in food industry. Food Chemistry 382, Article 132312. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132312>
- López-Valenzuela, B.E., A.D. Armenta-Bojórquez., S. Hernández-Verdugo., M.A. Apodaca-Sánchez., J.A. Samaniego-Gaxiola., K.Y. Leyva-Madrigal., and A. Valdez-Ortiz. 2015. Selección *in vitro* e identificación de aislados de *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. nativos para el control de *Phymatotrichopsis omnivora*. Revista Información Técnica Económica Agraria,111(4): 310-325. <http://dx.doi.org/10.12706/itea.2015.020>
- Marek, S.M., K. Hansen., M. Romanish., and R.G. Thorn. 2009. Molecular systematics of the cotton root rot pathogen, *Phymatotrichopsis omnivora*. Persoonia 22:63-74. <https://doi.org/10.3767/003158509X430930>
- Martínez-Escudero, L.E., A. Melgoza-Castillo., R. Pérez-Leal., y E. Villalobos-Pérez. 2018. Actividad inhibitoria de bacterias aisladas de la rizósfera de árboles frutales, en contra de *Phymatotrichopsis omnivora in vitro*. Acta Universitaria 28(5):66-71. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1606>
- Mattupalli, C., F. Proaño-Cuenca., J.B. Shiller., T. Watkins., K. Hansen., C.D. Garzon., S.M. Marek., and C.A. Young. 2022. Genetic diversity of *Phymatotrichopsis omnivora* based on mating type and microsatellite markers reveals heterothallic mating system. Plant Disease 106(8): 2105-2116. <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-22-0013-RE>
- Nadeem, M., M.A. Faqir., I.K. Muhammad., S. Tehseen., A. El-Ghorab., and I.S. Javed. 2013. Nutritional and medicinal aspects of coriander (*Coriandrum sativum* L.): A Review. British Food Journal 115(5):743–755. <https://doi.org/10.1108/00070701311331526>
- Olsen, M. 2015. Cotton (Texas) root rot. University of Arizona Cooperative Extension Service and Agricultural Experiment Station. Bulletin AZ1150. <http://hdl.handle.net/10150/346609>
- Pratama, B. P., B. W. Harsanto, M. A. Razi, B. W. K. Wardhani, A. T. Khalisa, A. R. Khairullah, S. Yuliani, B. Triwiyono, L. Leliana, U. F. Handayani, Y. L. Dewi, R. G. Sativa, N. Harimurti, and I. Agustinisari. 2025. Encapsulated Plant Extracts as Potential Clean-Label Alternatives to Synthetic Preservatives in Carbohydrate-Based Foods: Mechanisms, Efficacy, and Industrial Prospects. Trends in Sciences, 23(1): 11801. <https://doi.org/10.48048/tis.2026.11801>

- Pérez-Álvarez, S., E.F. Hector-Ardisana., M. Díaz-García., E. Sánchez., and E. García-Ramírez. 2022. *Phymatotrichopsis* root rot and its biological control in the pecan tree in Mexico. *Notulae Scientia Biologicae* 14(4): 11364. <https://doi.org/10.55779/nsb14411364>
- Prakasam, V., A.K. Savani., and P. Sukesh. 2025. Unveiling the potential antifungal role of essential oils in the management of *Rhizoctonia solani* causing sheath blight of rice. *European Journal of Plant Pathology* 171: 245–256. <https://doi-org.bibliotecaipn.idm.oclc.org/10.1007/s10658-024-02856-7>
- Queiroz, T.N., L.C. Pascuali., A.C. do Prado Silva., A.G. Porto., and J.W. Pires Carvalho. 2020. Extratos e óleos essenciais como alternativa no controle de *Sclerotinia sclerotiorum* e *Sclerotium rolfsii* isolados de soja (*Glycine max* L.). *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 13(2):737-753. DOI:10.17765/2176-9168.2020v13n2p737-753
- Rasooli, I., M.B. Rezaei., and A. Allameh. 2006. Growth inhibition and morphological alterations of *Aspergillus niger* by essential oils from *Thymus eriocalyx* and *Thymus x-porlock*. *Food Control* 17: 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.12.002>
- Samaniego-Gaxiola, J.A., and N. Balagurusamy. 2013. Survival of soil-borne fungus *Phymatotrichopsis omnivora* after exposure to volatile fatty acids. *Journal of General Plant Pathology* 79:105–109. <https://doi-org.bibliotecaipn.idm.oclc.org/10.1007/s10327-013-0436-8>
- Samaniego-Gaxiola, J.A., A. Pedroza-Sandoval., Y. Chew-Madinaveitia., and A. Gaytán-Mascorro. 2019. Desinfestación reductiva, suelo desecado y *Trichoderma harzianum* para controlar *Phymatotrichopsis omnivora* en vivero de nogal pecanero. *Revista Mexicana de Fitopatología* 37(2): 287–303. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1808-7>
- Saroj, A., C.S. Chanotiya., R. Maurya., V.S. Pragadheesh., A. Yadav., and A. Samad. 2019. Antifungal action of *Lippia alba* essential oil in *Rhizoctonia solani* disease management. *SN Applied Sciences* 1:1144. <https://doi-org.bibliotecaipn.idm.oclc.org/10.1007/s42452-019-1207-8>
- Senanayake, I. C., Rathnayaka, A. R., Marasinghe, D. S., Calabon, M. S., Gentekaki, E., Lee, H. B., ... & Xiang, M. M. 2020. Morphological approaches in studying fungi: Collection, examination, isolation, sporulation and preservation. *Mycosphere* 11(1): 2678-2754. doi 10.5943/mycosphere/11/1/20
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2023. Anuario estadístico de la producción agrícola 2023 en México. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Soylu, E.M., S. Soyly., and S. Kurt. 2006. Antimicrobial activities of the essential oils of various plants against tomato late blight disease agent *Phytophthora infestans*. *Mycopathologia* 161:119–128. <https://doi.org/10.1007/s11046-005-0206-z>
- Streets, R.B. 1937. *Phymatotrichum* (cotton or Texas) root rot in Arizona." University of Arizona Agricultural Experiment Station Technical Bulletin, 71: 368–410.
- Scruggs, A.C., and L.M. Quesada Ocampo. 2016. Cultural, chemical, and alternative control strategies for *Rhizopus* soft rot of sweetpotato. *Plant Disease* 100:1532–1540. <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-16-0051-RE>
- Taha, A.M. 2022. Selecting an Injector for Fertilizer/Chemical Injection. In: *Fertigation: A Pathway to Sustainable Food Production. Basics and Applications*. Springer Briefs in Environmental Science. pp 13–24. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05596-6_2
- Uppalapati, S.R., C.A. Young., S.M. Marek., and K.S. Mysore. 2010. *Phymatotrichum* (cotton) root rot caused by *Phymatotrichopsis omnivora*: retrospects and prospects. *Molecular Plant Pathology* 11(3): 25–34. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00616.x>
- Valero-Galván, J.V., L.N. Muñoz., B.E. Rivera-Chavira., Q. Rascón-Cruz., R. Silva-Vázquez. y V.G. Nevárez-Morillón. 2005. Aislamiento y control de cepas de hongos asociados a la pudrición texana por medio de aceites esenciales de orégano mexicano. In: *Proceedings of the XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*. https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_II/CII-02.pdf
- Viret, O. and K. Gindro. 2025. Root Diseases. In: *Science of Fungi in Grapevine*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. pp. 364–365. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-68663-4>
- Walla, W.J. and E. Janne. 1982. Controlling cotton root rot on ornamental plants. College Station, Texas, Texas Agricultural Extension Service, TAEX L-2056.
- Watkins, G.M. 1938. Histology of *Phymatotrichum* root rot of field grown cotton. *Phytopathology* 28(3):195–202.
- White, T.J., T. Bruns., S. Lee., and J. Taylor. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: *PCR Protocols: A guide to methods and applications*. Academic Press, San Diego, CA. 315–322 pp.

Yeung, E. C. T., Stasolla, C., Sumner, M. J., and Huang, L. Q. (Eds.). 2020. Plant microtechnique and microscopy: A Laboratory Manual. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49332-5>

Zhang, Q., Y. Cao., X. Fu., T. Yan., D. Luo., L. Yang., F. Chen., and J. Zhao. 2024. A novel strategy for obtaining essential oil and flavonoids from *Thymus vulgaris* L. using polyethylene glycol-ultrasonic pretreatment followed by microwave hydrodistillation and extraction. Industrial Crops & Products 222(4):119916. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119916>

