

Control biológico de *Radopholus similis* (Cobb) Thorne mediante inoculaciones combinadas de hongos endofíticos

Biological control of *Radopholus similis* (Cobb) Thorne by combined inoculations of endophytic fungi


Rodríguez Zamora, Markelyn^{1*}

Blandón Díaz, Jorge Ulises²


Martinuz, Alfonso³

^{1,2} Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua

³ Investigador independiente, Nicaragua

¹ markelyn.rodriguez@ci.una.edu.ni 

² ulisesdb@ci.una.edu.ni 

³ alfonsomartinuz@gmail.com 

Recibido/received:01/10/2025 Corregido/revised:23/02/2026 Aceptado/accepted: 14/04/2026

Resumen: El cultivo de plátano en Nicaragua es uno de los rubros de mayor relevancia para el desarrollo del país, se exporta como fruta fresca a países centroamericanos como Honduras, Salvador y Costa Rica. El presente estudio evaluó el efecto de cepas endofíticas de *Fusarium oxysporum*, *Trichoderma* spp, y el hongo nematófago *Purpureocillium lilacinum*, aislada de raíces funcionales de plátano, como alternativa biológica para el manejo de *Radopholus similis*. Se realizó un diseño experimental completamente al azar con 16 tratamientos y cinco repeticiones en donde se realizaron inoculaciones combinadas de hongos endófitos in vitro plantas del cultivar CEMSA ¾ en condiciones semicontroladas. Se cuantificó la Altura de las plántulas (cm), diámetro del pseudotallo (mm), peso fresco foliar (g), total de *Radopholus similis* en 10 g de raíz y el porcentaje de control. Se empleó una transformación Arcoseno, para homogenizar varianza y aplicar análisis de varianza y separación de medias por Tukey (P<0.005). Las inoculaciones *Trichoderma* spp + *Fusarium oxysporum* mostró el menor número total de *Radopholus similis* en raíz. En cuanto al porcentaje de control se redujo en un 15 % con las inoculaciones combinadas de *Trichoderma* spp + *Fusarium oxysporum*. Las inoculaciones *Purpureocillium lilacinum* + *Fusarium oxysporum* promovió la mayor altura y diámetro del pseudotallo. Las inoculaciones combinadas de hongos endófitos representan una solución ecológica frente a los nematocidas sintéticos, mejorando la resiliencia y microbiota de los agroecosistemas.

Palabras clave: Bioinsumos; *Fusarium oxysporum*; *Purpureocillium lilacinum*; *Trichoderma* sp.

* Autor de correspondencia.

Correo: markelyn.rodriguez@ci.una.edu.ni



Abstract: Plantain cultivation in Nicaragua is one of the most important sectors for the country's development, as the crop is exported as fresh fruit to Central American countries such as Honduras, El Salvador, and Costa Rica. The present study evaluated the effect of endophytic strains of *Fusarium oxysporum*, *Trichoderma* spp., and the nematophagous fungus *Purpureocillium lilacinum*, isolated from functional banana roots, as a biological alternative for the management of *Radopholus similis*. A completely randomized design was established with 16 treatments and five replications, in which combined inoculations of endophytic fungi were applied to in vitro plants of the CEMSA ¾ cultivar under semi-controlled conditions. Seedling height (cm), pseudostem diameter (mm), leaf fresh weight (g), total *Radopholus similis* in 10 g of root tissue, and percentage of control were quantified. An arcsine transformation was applied to homogenize variance, followed by analysis of variance and Tukey's mean separation test ($P < 0.005$). The inoculations of *Trichoderma* spp. + *Fusarium oxysporum* resulted in the lowest total number of *Radopholus similis* in root tissue. Regarding control percentage, a 15% reduction in the nematode population was achieved with the combined inoculations of *Trichoderma* spp. + *Fusarium oxysporum*. The inoculations of *Purpureocillium lilacinum* + *Fusarium oxysporum* promoted the greatest seedling height and pseudostem diameter. Combined inoculations of endophytic fungi represent an ecological solution compared to synthetic nematicides, enhancing agroecosystem resilience and microbiota.

Keywords: Biological inputs; *Fusarium oxysporum*; *Paecilomyces* sp; *Trichoderma* sp.

Introducción

El cultivo de plátano constituye un componente esencial en la dieta diaria de las familias nicaragüenses, además de desempeñar un papel significativo en la economía nacional. Esta actividad genera más de 130,000 empleos directos e indirectos y aporta aproximadamente 18.2 millones de dólares al Producto Interno Bruto (PIB). Actualmente, se registran 39,200 manzanas cultivadas, con una producción total estimada en 1,032 millones de unidades de plátano. Los departamentos de Rivas y Chinandega concentran el 93 % de la producción nacional. (Ministerio Agropecuario, 2022).

Sin embargo, la seguridad que el cultivo proporciona a los pequeños, medianos y grandes productores, se ha visto amenazada por un conjunto de plagas y enfermedades que afectan a la planta y sus frutos (Castillo-Arévalo y Machado, 2021), entre los cuales se encuentra los nematodos fitoparásitos un enemigo silencioso que infectan a las plantas reduciendo la capacidad de absorción de agua y nutrientes lo que provoca una floración tardía y menor cantidad de frutos (Abd-Elrahman *et al.*, 2024). Siendo los generos de mayor importancia asociado al cultivo de plátano *Radopholus similis* (nematodo excavador), *Helicotylenchus* sp. (nematodo espiral), *Pratylenchus* sp. (nematodo de la lesión radicular) y *Meloidogyne* sp. (nematodo de la agalla) (Sousa *et al.*, 2024).

Radopholus similis es un nematodo endoparásito migratorio obligado que representa la principal amenaza fitosanitaria para los cultivos de banano y plátano a nivel mundial, debido a su alto impacto económico (Fatma *et al.*, 2025) Este nematodo afecta el cultivo en todas las etapas de su desarrollo. Durante el proceso de alimentación, invade el sistema radicular, provocando necrosis en las raíces, lo que compromete tanto el anclaje de la planta como la absorción de agua y nutrientes esenciales (Rocha

et al., 2020). Esta alteración fisiológica reduce significativamente la capacidad de la planta para nutrirse adecuadamente, afectando su crecimiento y el llenado de los frutos (Tazuba *et al.*, 2025).

Uno de los principales desafíos que enfrentan los productores es el uso indiscriminado de nematicidas, así como las restricciones cada vez más estrictas sobre los nematicidas sintéticos. Aunque estos productos se emplean con el objetivo de reducir las poblaciones de nematodos fitoparásitos, su aplicación ha sido ampliamente cuestionada debido a su elevada toxicidad ambiental y los efectos adversos que pueden generar en la salud humana (Abd-Elgawad & Askary, 2020). En este contexto, el uso de agentes de control biológico se presenta como una estrategia de manejo sostenible, ofreciendo alternativas eficaces y menos perjudiciales para el medio ambiente y la salud pública.

En la búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo de nematodos, una de las estrategias más prometedoras consiste en la utilización de hongos endofíticos. Esta práctica no solo reduce la dependencia de nematicidas de efecto fumigante y no fumigante, sino que además favorece la sostenibilidad de monocultivos estratégicos como el plátano. Dicho cultivo reviste especial importancia en Nicaragua, ya que contribuye de manera significativa a la soberanía y seguridad alimentaria de pequeños y medianos productores. Los endófitos se destacan como microorganismos simbióticos que colonizan los tejidos vegetales y generan múltiples beneficios, entre los cuales se incluye la inducción de resistencia sistémica frente a condiciones de estrés biótico y abiótico (Kumar & Dara, 2021).

En respuesta a estas limitaciones, estudios han explorado alternativas biológicas basadas en consorcios microbianos, particularmente hongos y bacterias endofíticos, que han mostrado potencial en la reducción de poblaciones de nematodos mediante la producción de metabolitos secundarios y la competencia por nichos ecológicos (Varkey *et al.*, 2018). Estudios recientes destacan que estos consorcios no solo contribuyen al control biológico de especies como *Radopholus similis*, sino que también favorecen la sostenibilidad de sistemas agrícolas intensivos, como el monocultivo de plátano, de gran relevancia para la seguridad y soberanía alimentaria en países como Nicaragua (Rodríguez-Zamora *et al.*, 2025).

El uso de hongos endofíticos para el control de *Radopholus similis* está bien documentado a nivel internacional, este constituye uno de los primeros estudios en Nicaragua. La utilización de hongos en inoculaciones combinadas constituye una estrategia de manejo de nematodos fitoparásitos, al ofrecer alternativas sostenibles y eficaces frente a métodos convencionales. Este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de hongos endofíticos nativos en inoculaciones combinadas sobre el manejo de *Radopholus similis* y la promoción de crecimiento en vitroplantas del cultivar CEMSA 3/4.

Material y Métodos

El estudio se llevó a cabo en un invernadero de 300 m² ubicado en la Universidad Nacional Agraria, en el km 12 ½ de la carretera norte, Managua, Nicaragua en las coordenadas 12°08'52" latitud Norte y 86°09'41" longitud Oeste. Los hongos fueron tres aislados de *Trichoderma* sp., tres de *Fusarium oxysporum* y un aislado de *Purpureocillium lilacinum* colectados de raíces funcionales de plantaciones comerciales en los departamentos de Rivas y Chinandega. Estos aislados mostraron

antagonismo con *Radopholus similis*, razón por lo cual fueron seleccionados para su uso en inoculaciones combinadas (Tabla 1), en vitroplantas del cultivar CEMSA ¾.

Diseño experimental. Se estableció un arreglo unifactorial en diseño completo al azar (DCA) con 16 tratamientos y cinco repeticiones, para un total de 80 unidades experimentales; cada unidad experimental estuvo representada por una planta. Por cada tratamiento se utilizaron cinco plantas establecidas en macetas de 11 cm de diámetro y 9.7 cm de altura, con un volumen de suelo de 754 gramos.

Inoculación de los hongos endofíticos. Los aislados se cultivaron por separado en placas de agar patata dextrosa (PDA) por un periodo de siete días a temperatura ambiente 28 °C. Luego el micelio y conidios se separaron del medio de cultivo agregando 10 ml de agua destilada estéril, raspando suavemente la superficie con un asa bacteriológica de plástico estéril (Molina-Montenegro *et al.*, 2023). Las concentraciones celulares (UFC), se estimaron mediante un hemacitómetro de Neubauer (Thomas Scientific, Philadelphia, PA) y fue ajustada con agua estéril a 1×10^7 esporas g^{-1} de suelo. (Gattoni *et al.*, 2023). Para las inoculaciones duales y combinadas se añadió 50:50 de cada suspensión individual, según cada tratamiento (Tabla 1).

Tabla 1

Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Descripción
T1	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)
T2	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)
T3	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)
T4	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>
T5	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)
T6	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)
T7	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)
T8	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>
T9	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)
T10	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)
T11	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)
T12	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>
T13	Agua con solución de nematodos
T14	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)
T15	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)
T16	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)

Evaluar el número total de Radopholus similis en 10 gramos de raíces. se realizaron 15 inoculaciones duales y un Testigo (Tabla 1) a la cual se le aplico solamente la solución de nematodos. Los inóculos de nematodos se obtuvieron de una población de *Radopholus similis* previamente de la cría de un cultivo monoxénico de *Radopholus similis* que crecieron en tres discos de zanahoria (*Daucus carota*

L.) (Oduori *et al.*, 2021). Dos semanas después, cada plántula fue inoculada con una población mixta de 500 nematodos juveniles, hembras y machos, realizando tres orificios a una profundidad entre 2 cm y 3 cm alrededor de la base del pseudotallo.

Para registrar el número de nematodos en el sistema radicular tratado en los 10 gramos de raíz, se contabilizaron el total de nematodos en una alícuota de 1 ml de la solución de nematodos extraído por el método de maceración y tamizado, usando una cámara de conteo de nematodos mediante microscopía de luz.

Efecto biocontrol de Radopholus similis. A las ocho semanas después de la inoculación de los nematodos se determinó el porcentaje de control, siguiendo la metodología descrita por (Rodríguez-Zamora *et al.*, 2025). La cuantificación de *Radopholus similis* se estimó sobre la base del número total de nematodos en 10 g de raíces por planta. La eficacia de control biológico fue evaluada mediante la ecuación 1 de Chaves *et al.*, (2009).

$$\%BC = \frac{\text{Número de nematodos en el sistema radicular tratado}}{\text{Número de nematodos del control con solo nematodos}} \times 100 \quad (1)$$

Variables evaluadas. Altura planta (cm). Se midió con una regla desde la base del pseudotallo al traslape de la hoja 1 y 2, Diámetro del pseudotallo (mm). Se cuantificó con la ayuda de un vernier digital a dos centímetros de la base del pseudotallo. Peso fresco raíz (g). En cada planta se separó con un bisturí las raíces del pseudotallo, para registrar su peso con una balanza digital Ohaus de 0.01 g a 4 000 g. Peso fresco foliar (g). Se separaron las hojas y se pesaron con la misma balanza digital que se usó para determinar el peso fresco de raíz. Peso fresco total. Se registro el peso total de la planta (hoja, pseudotallo y raíz) con la misma balanza digital que se usó para determinar el peso fresco de raíz.

Análisis de datos: Para comprobar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se empleó transformación con la función arcoseno para el porcentaje de control, luego se realizó un análisis de varianza (ANDEVA). Al encontrar diferencias estadísticas, se compararon las medias a través de la prueba de diferencias mínimas de Tukey con un margen de error del 5 %, empleando el software InfoStat/ versión Profesional 2024 (InfoStat Group, FCA., AR).

Resultados y discusión

Efecto de aplicaciones combinadas de *Trichoderma* sp, *Purpureocillium lilacinum* y *Fusarium oxysporum* sobre la densidad de *Radopholus similis* en 10 gramos de raíces. El análisis de varianza reveló diferencias en la cantidad de nematodos presentes en 10 gramos de raíz ($p = 0.001$). La combinación *Trichoderma* sp (AT1) + *Fusarium oxysporum* (AF2) mostro una reducción de la población de *Radopholus similis*, con un promedio de 24 individuos (Figura 1). Lo que confirma el efecto nematocida de estos aislados al ser inoculado de manera combinada.

Por otro lado, las combinaciones *Trichoderma* sp (AT3) + *Purpureocillium lilacinum* y *Trichoderma* sp (AT3) + *Fusarium oxysporum* (AF3) registraron las mayores densidades con 44 individuos (Figura

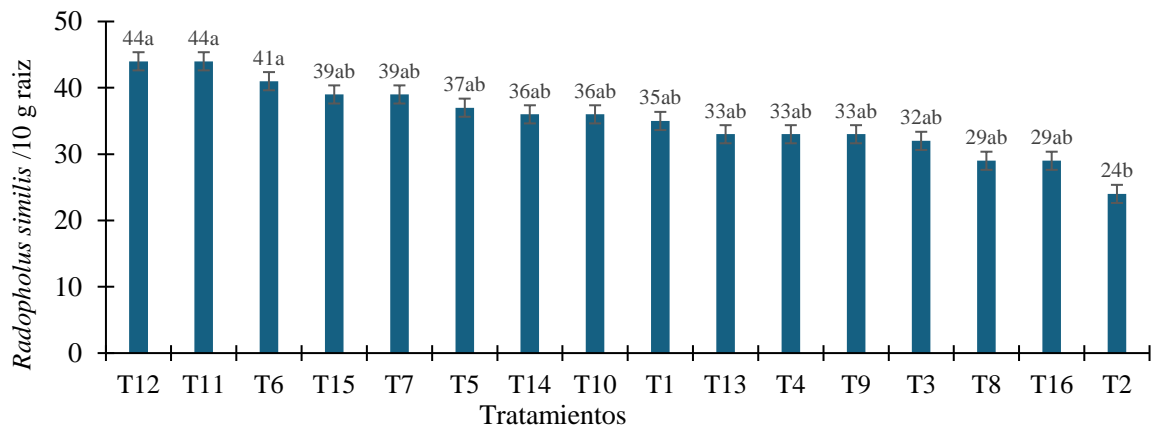
1). Lo que indica, que aplicando estas combinaciones no reducen las poblaciones de nematodos en el sistema radicular. Posiblemente estos aislado presentaron incompatibilidad entre sí, lo cual redujo el efecto nematocida; información similar fue publicada por (Gallegos-Morales *et al.*, 2022). al combinar especies de *Trichoderma* observaron interacciones incompatibles como la reducción de eficacia en el control de nematodos.

Los tratamientos más efectivos en la disminución de las poblaciones de nematodos corresponden aquellos con combinaciones de *Trichoderma* sp (AT2) + *Purpureocillium lilacinum* y *Trichoderma* sp (AT1) + *Fusarium oxysporum* (AF2), en especial el aislado *Trichoderma* sp (AT2) y (AT1). Lo que sugiere, *Trichoderma* en combinación con otros microorganismos benéficos genera efectos sinérgicos que favorecen el control biológico de nematodos con una mayor colonización de las raíces, lo que contribuye al fortalecimiento del sistema radicular y a una mejor respuesta fisiológica de las plantas.

Estos hallazgos son referidos por Yang *et al.*, (2022) y respaldan la hipótesis de que el uso combinado de *Trichoderma* spp. mejora el control de nematodos fitoparásitos mediante mecanismos de antagonismo, competencia por espacio y nutrientes, así como la inducción de resistencia sistémica en las plantas hospedantes (Rodríguez-Zamora *et al.*, 2026).

Figura 1

Efecto de aplicaciones combinadas de Trichoderma sp, Purpureocillium lilacinum y Fusarium oxysporum sobre la densidad de Radopholus similis en plántulas in vitro del cultivar CEMSA 3/4 con seis semanas después de la inoculación



Nota. Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza

Control biológico de Radopholus Similis

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas ($p=0.001$) en el control biológico de *Radopholus similis*, las inoculaciones *Trichoderma* sp (AT1) + *Fusarium oxysporum* (AF2), al igual que *Trichoderma* sp (AT2) + *Purpureocillium lilacinum*, y *Trichoderma* sp (AT2) + *Fusarium*

oxysporum (AF2), redujeron las poblaciones de *Radopholus similis* entre un 15 y 17 %, estas combinaciones reducen las poblaciones de *R. similis* (Figura 2). Su acción se basa en mecanismos como el parasitismo directo, la antibiosis y la inducción de parálisis mediante la producción de enzimas líticas (Poveda *et al.*, 2020).

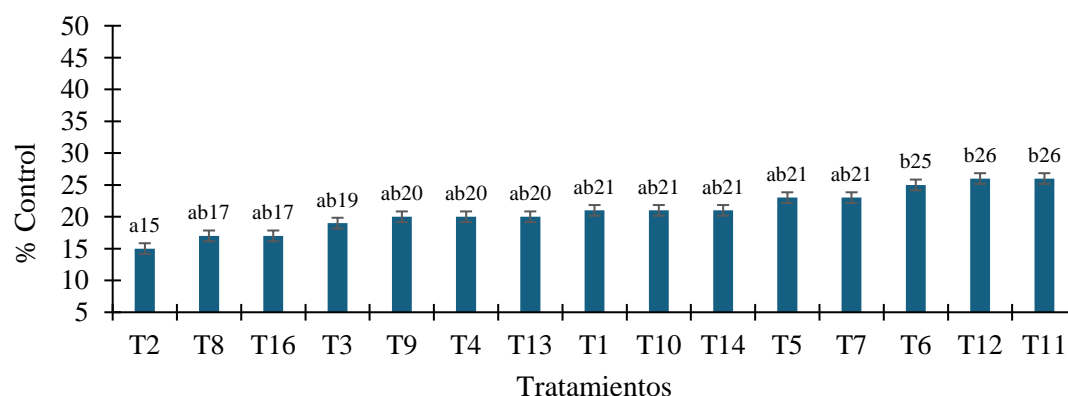
Los hallazgos encontrados indican que ciertos aislados de *Trichoderma* sp presentan incompatibilidad entre aislados de *Fusarium oxysporum* y *Purpureocillium lilacinum*. Lo que dificulta la reducción de las poblaciones de *R. Similis*. Aunque está bien documentado el uso de consorcios de hongos para mejorar el control o promover el crecimiento de las plantas. Estudios han identificados que cepas como *Trichoderma* virens muestra antagonismos, competencias y producción de metabolitos secundarios volátiles para inhibir el crecimiento de otros hongos (Contreras-Soto *et al.*, 2025).

Diversos estudios han demostrado que la inoculación combinada de *Purpureocillium* spp. y *Trichoderma* spp. reducen significativamente las poblaciones de nematodos fitoparásitos. El-Habashy *et al.*, (2021) reportaron una reducción del 79 % en la población de *Meloidogyne javanica* mediante la aplicación conjunta de estos hongos. De manera similar, Silva *et al.*, (2022) observaron una disminución en la población de nematodos fitoparásitos, lo que evidencia la eficacia de esta estrategia de control biológico.

Asimismo, Betancourt Tituaña (2020) señalaron que el uso de agentes de control biológico en inoculaciones combinadas incrementa la eficiencia del manejo fitosanitario, especialmente cuando los organismos actúan en diferentes fases del ciclo de vida de los nemátodos. Este efecto se atribuye a mecanismos como la producción de enzimas líticas y la inducción de resistencia sistémica en las plantas hospedantes. En el presente estudio, los tratamientos correspondientes a *Trichoderma* sp (AT3) + *Fusarium oxysporum* (AF3) mostraron un control del 26 % de la población de *Radopholus similis*, lo que confirma que la sinergia entre las combinaciones de cepas mejora el control de poblaciones de nematodos fitoparásitos (Figura 2).

Figura 2

Efecto de control de *Trichoderma* sp, *Purpureocillium lilacinum* y *Fusarium oxysporum* sobre *Radopholus similis*



Nota. Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza

Efecto de *Trichoderma* sp, *Fusarium Oxysporum* y *Purpureocillium lilacinum* en la promoción del crecimiento en plántulas del cultivar CEMSA ¾.

Seis semanas después de la inoculación con hongos endofíticos, los dieciséis tratamientos evaluados presentaron diferencias estadísticas ($P = 0.0001$) en las variables fisiológicas, analizadas durante la etapa de plántula del cultivar CEMSA ¾. Estas diferencias se atribuyen a los efectos de las inoculaciones combinadas, lo que sugiere una influencia notable en el comportamiento fisiológico de las plantas en esta fase temprana de desarrollo (Tabla 2.)

Los tratamientos *Purpureocillium lilacinum* + *Fusarium oxysporum* (AF2), *Trichoderma* sp (AT3) + *Fusarium oxysporum* (AF1), así como *Trichoderma* sp (AT2) + *Fusarium oxysporum* (AF2), presentaron la mayor altura con 8.58 cm con respecto al *Trichoderma* sp (AT2) + *Purpureocillium lilacinum*.

Estos resultados evidencian una variabilidad significativa entre los tratamientos, posiblemente atribuida a la interacción en función de la compatibilidad de los hongos endofíticos. Diversos estudios han demostrado que los hongos endófitos establecen relaciones simbióticas con sus hospedantes, mediante las cuales inducen la producción de fitohormonas como giberelinas (GA), ácido indol-3-acético (IAA), ácido salicílico (SA) y citoquininas (Cks), las cuales desempeñan un papel clave en la promoción del crecimiento vegetal (Lu *et al.*, 2025, Baron & Rigobelo, 2022).

Los Generos *Fusarium oxysporum* poseen la capacidad de formar consorcios microbianos que promueven el crecimiento de las plantas, principalmente mediante la mejora en la absorción de nutrientes, lo que explicaría las diferencias observadas entre los tratamientos evaluados García-Latorre *et al.*, (2023).

El diámetro del Pseudotallo mostró diferencias estadísticas. El tratamiento *Trichoderma* sp (AT2) + *Fusarium oxysporum* (AF2) presento mayor diámetro con 6.86 mm. Los organismos endófitos del generos *Trichoderma* estimulan el crecimiento vegetal gracias a su compatibilidad con otros géneros promotores del crecimiento, como *Fusarium* (Óyesela *et al.*, 2025). Esta interacción simbiótica se ve fortalecida por la producción de fitohormonas, la formación de sideróforos y otros mecanismos bioquímicos que favorecen el desarrollo radicular y la eficiencia nutricional (Contreras-Cornejo *et al.*, 2024, Ayub *et al.*, 2023; Emmanuel & Babalola, 2020).

Tabla 2
Efecto de *Trichoderma* sp, *Fusarium Oxysporum* y *Purpureocillium lilacinum* en la promoción de crecimiento

Tratamiento	Descripción	Diámetro Pseudotallo (mm)	Altura de la plántula (cm)
T15	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	5.76 cd	8.58 a

Tratamiento	Descripción	Diámetro Pseudotallo (mm)	Altura de la plántula (cm)
T9	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	5.76 cd	8.58 a
T6	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	6.86 a	8.58 a
T5	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	5.92 bcd	8.34 ab
T11	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	6.20 abc	8.20 abc
T7	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	6.20 abc	8.18 abc
T14	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	6 bcd	8.6 abcd
T13	Agua con solución de nematodos	6.28 abc	7.94 abcd
T2	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	5.88 bcd	7.94 abcd
T12	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>	6.32 abc	7.8 bcde
T1	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	6 bcd	7.78 bcde
T3	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	6.22 abc	7.54 cde
T4	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>	5.76 cd	7.52 cde
T16	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	5.72 cd	7.50 cde
T10	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	5.44 d	7.44 de
T8	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>	6.48 ab	7.10 e
$p \leq 0.05$		$P = 0.0001$	$P = 0.0001$

Nota. Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza

Efecto de la estimulación de la biomasa vegetal en plántulas in vitro del cultivar CEMSA 3/4.

Se presentaron diferencias estadísticas en el peso fresco de raíz y peso fresco foliar (Tabla 3). El tratamiento *Trichoderma* sp (AT1) + *Fusarium oxysporum* (AF3) obtuvo mayor peso fresco de raíz con 8.82 gramos. el mayor peso fresco foliar y peso fresco total con 11.76 con el tratamiento testigo, seguido del tratamiento *Trichoderma* sp (AT1) + *Fusarium oxysporum* (AF3). Al género *Trichoderma* se le atribuye la capacidad de incrementar la eficiencia fotosintética y mejorar la tolerancia al estrés abiótico. Estos efectos se traducen en un aumento del follaje, lo cual contribuye significativamente al vigor y productividad de las plantas.

La presencia del nematodo *Radopholus similis* en el sistema radicular de las plántulas afectó negativamente el desarrollo de variables como el peso radicular y el peso foliar en todos los tratamientos evaluados Según Mendoza y Sikora (2009), lo que posiblemente las inoculaciones combinadas *Trichoderma* sp + *Fusarium oxysporum* presentaron un efecto antagonista o de bioprotección en este estudio.

Tabla 3

Efecto de *Trichoderma* sp, *Fusarium Oxysporum* y *Purpureocillium lilacinum* en la estimulación de la biomasa.

Tratamiento	Descripción	Peso fresco de raíz (g)	Peso fresco foliar (g)	Peso fresco total (g)
T3	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	8.82 a	11.48 a	30.44 a
T13	Agua con solución de nematodos	8.50 ab	11.76 a	31.26 a
T15	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	8.48 abc	10.58 ab	29.36 a
T2	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	7.82 abcd	10.38 ab	28.32 a
T4	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>	7.60 abcd	10 ab	26.66 a
T12	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>	7.58 abcd	10.96 a	29.34 a
T1	<i>Trichoderma</i> sp (AT1) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	7.42 abcd	10.24 ab	27.32 a
T5	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	7.42 abcd	10.32 ab	27.70 a
T9	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	7.20 abcd	9.32 ab	26.26 a
T11	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	7.18 abcd	11.20 a	27.82 a
T6	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	7.02 abcd	10.40 ab	27.54 a
T16	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	6.92 abcd	9.48 ab	24.72 a
T8	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Purpureocillium lilacinum</i>	6.02 bcd	9.90 ab	21.14 a
T10	<i>Trichoderma</i> sp (AT3) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF2)	5.82 bcd	7.36 a	19.98 a
T14	<i>Purpureocillium lilacinum</i> + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF1)	5.76 cd	8.78 ab	22.02 a
T7	<i>Trichoderma</i> sp (AT2) + <i>Fusarium oxysporum</i> (AF3)	5.58 d	9.88 ab	23.98 a
$p \leq 0.05$		$P = 0.0001$	$P = 0.0001$	$P = 0.0001$

Nota. Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza

Conclusiones

La inoculación de hongos endofíticos en plántulas de plátano representa una estrategia biológica eficaz para el manejo de *Radopholus similis* en condiciones semi controlada. Además de contribuir a la reducción de las poblaciones del nematodo, estos microorganismos promueven el crecimiento vegetal al incrementar variables como la altura de la planta, el diámetro del pseudotallo y la producción de biomasa. Estos efectos positivos evidencian el potencial de los hongos endofíticos como agentes bioestimulantes y de control biológico. En conjunto, los resultados respaldan el uso de esta alternativa sostenible para el manejo integrado de plagas en sistemas agrícolas.

Contribución de Autoría CRediT

Rodríguez-Zamora, Markelyn: conceptualización, investigación, metodología, validación, supervisión, redacción, revisión y edición del manuscrito original. Blandón-Díaz, J.U: supervisión, investigación, revisión y edición. Martinuz, Alfonso: Metodología, Supervisión, redacción, revisión y edición del manuscrito original

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaratoria de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que usaron inteligencia artificial M365 Copilot. Durante la preparación de este trabajo. Revisamos y corregimos cuidadosamente el contenido según fue necesario y asumimos toda la responsabilidad por el contenido final de la publicación.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

Agradecimientos y financiamiento

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional Agraria por el financiamiento de esta investigación a través de una beca de doctorado.

Referencias

Abd-Elrahman, A. A., Elzamk, F. I., Labib, H. M., & Hegazy, M. I. (2024). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on plant parasitic nematodes infecting banana, *Musa* spp. In some

- specific farms in sharkia governorate. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 51(4), 727-743. https://zjar.journals.ekb.eg/article_380611_330c75ff607a78c2d2d89a665604dda5.pdf
- Abd-Elgawad, M. M., & Askary, T. H. (2020). Factors affecting success of biological agents used in controlling the plant-parasitic nematodes. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00215-2>
- Ayub J, Tahir A, Iqbal U, Ayub H, Hyder MZ, Kiyani A, Hafeez FY, Ilyas MK, Ghafoor A, Yasmin T. (2023). Effective biological control of Lentil (*Lens culinaris*) Fusarium wilt and plant growth promotion through native Rhizobacteria. *Physiological and Molecular Plant Pathology*; <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102203>
- Baron, N. C., & Rigobelo, E. C. (2022). Endophytic fungi: a tool for plant growth promotion and sustainable agriculture. *Mycology*, 13(1), 39–55. <https://doi.org/10.1080/21501203.2021.1945699>
- Betancourt Tituaña, H. F. (2020). Sinergismo entre hongos micorrícicos y *Trichoderma harzianum* en el control del nematodo *Nacobbus aberrans* en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata). <https://doi.org/10.35537/10915/101157>
- El-Habashy, D. E., Amer, G. M., & Eid, A. R. (2021). Efficacy of *Paecilomyces*, *Bacillus* and *Trichoderma* as Biocontrol Agents Against *M. javanica* on Pepper under Geenhouse Conditions. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 52(5), 90-103. <https://doi.org/10.21608/ajas.2022.112734.1075>
- Castillo-Arévalo, T., & Machado, K. I. M. (2021). Identificación de la problemática en la exportación del cultivo de plátano, en el departamento de Rivas, Nicaragua. *Revista Universitaria del Caribe*, 27(02), 59-66. <https://doi.org/10.5377/ruc.v27i02.13773>
- Contreras-Cornejo HA, Schmoll M, Esquivel-Ayala BA, González-Esquivel CE, Rocha-Ramírez V, Larsen J. (2024). Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystems. *Microbiological Research*; 2024. p. 281, 127621. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127621>
- Contreras-Soto, M. B., Tovar-Pedraza, J. M., Solano-Báez, A. R., Bayardo-Rosales, H., & Márquez-Licon, G. (2025). Biocontrol Strategies Against Plant-Parasitic Nematodes Using *Trichoderma* spp.: Mechanisms, Applications, and Management Perspectives. *Journal of Fungi*, 11(7), 517. <https://doi.org/10.3390/jof11070517>
- Chaves, N. P., Pocasangre, L. E., Elango, F., Rosales, F. E., & Sikora, R. (2009). Combining endophytic fungi and bacteria for the biocontrol of *Radopholus similis* and effects on plant growth. *Scientia Horticulturae*, 122(3), 472–478. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.05.025>
- Gattoni, K. M., Park, S. W., y Lawrence, K. S. (2023). Evaluation of the mechanism of action of *Bacillus* spp. to manage *Meloidogyne incognita*. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1079109. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1079109>

- Emmanuel OC, Babalola OO. (2020). Productivity and quality of horticultural crops through co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria. *Microbiological Research*; 2020. p. 239, 126569.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126569>
- Fatma, G. R., & Pervez, R. (2025). Diversity and community structure of nematodes associated with banana plantations in Muzaffarpur district (Bihar), India. *Indian Phytopathology*, 78(2), 399-406. <https://doi.org/10.1007/s42360-025-00860-3>
- García-Latorre, C., Rodrigo, S., Marin-Felix, Y., Stadler, M., & Santamaria, O. (2023). Plant-growth promoting activity of three fungal endophytes isolated from plants living in dehesas and their effect on *Lolium multiflorum*. *Scientific Reports*, 13(1), 7354. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34036-8>
- Gallegos-Morales, G., Espinoza-Ahumada, C. A., Figueroa-Reyes, J., Méndez-Aguilar, R., Rodríguez-Guerra, R., Salas-Gómez, A. L., & Peña-Ramos, F. M. (2022). Compatibilidad de especies de *Trichoderma* en la producción y biocontrol de marchitez del chile. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(2). <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3066>
- Lu, C., Sugihara, S., Noma, S., Tanaka, H., Tajima, R., Matsumoto, S., Hirose, D., Zhang, X., Wang, N., & Ban, T. (2025). Phosphorus Dynamics in Managed and Natural Soils: SEM-PLS Analysis of *Vaccinium*, Forest, and Grassland Ecosystems. *Plants*, 14(2), 189. <https://doi.org/10.3390/plants14020189>
- Kumar, K. K., & Dara, S. K. (2021). Fungal and Bacterial Endophytes as Microbial Control Agents for Plant-Parasitic Nematodes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4269. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084269>
- Mendoza, A. R., y Sikora, R. A. (2009). Biological control of *Radopholus similis* in banana by combined application of endophytes. *BioControl*, 54(2), 263–272. <https://doi.org/10.1007/s10526-008-9181-x>
- Molina-Montenegro MA, Escobedo VM and Atala C (2023) Inoculation with extreme endophytes improves performance and nutritional quality in crop species grown under exoplanetary conditions. *Front. Plant Sci.* 14:1139704. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1139704>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería, (2022). Informe anual sobre producción de plátano en Nicaragua. Gobierno de Nicaragua. <https://www.mag.gob.ni/index.php/noticias?view=article&id=59:producci%C3%B3n-platano-aporta&catid=11>
- Oyesola, O. L., Kinge, R. T., & Obembe, O. O. (2025). *Trichoderma*: A Review of its Mechanisms of Action in Plant Sustainable Disease Control. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1492(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1492/1/012008>
- Oduori, C. A., Atandi, J., Kisaakye, J., & Coyne, D. (2021). Cocoyam (*Colocasia esculenta*) provides an effective monoxenic culture media for *Radopholus similis*. *Nematology*, 23(5), 597-599. <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10088>

- Poveda, J., Abril-Urias, P., & Escobar, C. (2020). Biological control of plant-parasitic nematodes by filamentous fungi inducers of resistance: *Trichoderma*, mycorrhizal and endophytic
- Rodríguez-Zamora, M., Centeno, J. C. M., Blandón-Díaz, J. U., & Martinuz, A. (2025). Control biológico de *Radopholus similis* (Cobb) Thorne mediante el uso de bacterias y hongos endófitos en *Musa paradisiaca* L. *La Calera*, 25(45), 144-151. DOI: <https://doi.org/10.5377/calera.v25i45.21924>
- Rodríguez-Zamora, M., Mejía-Betancourt, F. A., Blandón, J. U., & Martinuz, A. (2026). Biocontrol potential of endophytic fungi from plantain roots against the burrowing nematode *Radopholus similis*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/03235408.2026.2627615>
- Rocha, A. D. J., Ferreira, M. D. S., Rocha, L. D. S., Oliveira, S. A., Amorim, E. P., Mizubuti, E. S., & Haddad, F. (2020). Interaction between *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and *Radopholus similis* can lead to changes in the resistance of banana cultivars to *Fusarium* wilt. *European Journal of Plant Pathology*, 158 (2), 403-417. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02081-y>
- Sousa ABP, Rocha AdJ, Oliveira WDdS, Rocha LdS, Amorim EP. Phytoparasitic Nematodes of *Musa* spp. with Emphasis on Sources of Genetic Resistance: A Systematic Review. *Plants*. 2024; 13(10):1299. <https://doi.org/10.3390/plants13101299>
- Silva, K. C. L., Burin, L. X., Seraglio, N. A., Junior, A. F. C., Machado, I. E. S., Falcão, D. F., & Fidelis, R. R. (2022). Biocontrol of plant-parasitic nematodes by soil in soybean cultivation. *Research, Society and Development*, 11(15), e118111536768-e118111536768. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.36768>
- Tazuba, AF, Ocimati, W., Ogwal, G., Nyangwire, B., Onyilo, F. y Blomme, G. (2025). El sustrato usado de *Pleurotus ostreatus* tiene potencial para controlar el nematodo fitoparásito *Radopholus similis* en bananos. *Agronomía*, 15 (5), 1040. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051040>
- Varkey, S., Anith, K. N., Narayana, R., & Aswini, S. (2018). A consortium of rhizobacteria and fungal endophyte suppress the root-knot nematode parasite in tomato. *Rhizosphere*, 5, 38-42. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.11.005>
- Yang, R., Qin, Z., Wang, J., Zhang, X., Xu, S., Zhao, W., & Huang, Z. (2022). The interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma longibrachiatum* enhance maize growth and modulate root metabolome under increasing soil salinity. *Microorganisms*, 10(5), 1042. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10051042>