

Artículo de Revisión

Retos y soluciones en el manejo de nematodos fitoparásitos en el cultivo de banana (*Musa* spp.)

Challenges and solutions in the management of phytoparasitic nematodes in banana crops (*Musa* spp.)

Marianela Conce-Conce¹. Socorro García-Pantaleón¹. Delia Gutierrez-Catari². Erika Murillo-Coca² & Winder Felipez³

¹ Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF), Santo Domingo, República Dominicana

² Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Bioquímica Farmacia, Catavi, Bolivia

³ Universidad Nacional "Siglo XX", Dirección General de Investigación, Oficina Central, Calle Campero N° 36, Llallagua, Potosí, Bolivia

Recibido: 01/11/2024 Aceptado para publicación: 01/12/2024

Resumen

El cultivo de banano (*Musa* spp.) es fundamental para la seguridad alimentaria y la economía global, especialmente en lugares como República Dominicana y Puerto Rico donde enfrenta grandes desafíos debido a los nematodos fitoparásitos, como *Radopholus similis* y *Helicotylenchus multicinctus*, que afectan el sistema radicular y reducen los rendimientos hasta en un 20%. Aunque históricamente se han utilizado nematicidas químicos, las preocupaciones ambientales y su limitada efectividad a largo plazo han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles. Este estudio analiza diversas estrategias agroecológicas para manejar estos nematodos, como el uso de microorganismos antagonistas (hongos y bacterias), la incorporación de compost y vermicomposta, y el mejoramiento genético mediante variedades resistentes como FB920 y Pisang Lilin. El aporte del análisis y discusión, hacen referencia que estas prácticas no solo reducen las poblaciones de nematodos, sino que también mejoran la salud del suelo y aumentan los rendimientos. Por tanto, un enfoque integrado que combine agroecología y mejoramiento genético ofrece una solución sostenible y eficaz para el manejo de nematodos en el cultivo de banano.

Palabras claves: control químico, control biológico, resistencia, materia orgánica

Abstract

The cultivation of bananas is essential for global food security and the economy, especially in regions like Dominican Republic and Puerto Rico, where it faces significant challenges due to plant-parasitic nematodes such as *Radopholus similis* and *Helicotylenchus multicinctus*. These nematodes attack the root system, reducing yields by up to 20%. Although chemical nematicides have been historically used, environmental concerns and their limited long-term effectiveness have driven the search for more sustainable alternatives. This study examines various agroecological strategies for managing these nematodes, including the use of antagonistic microorganisms (fungi and bacteria), the incorporation of compost and vermicompost, and genetic improvement through resistant varieties such as FB920 and Pisang Lilin. The analysis and discussion highlight that these practices not only reduce nematode populations but also improve soil health and increase yields. Therefore, an integrated approach that combines agroecology and genetic improvement offers a sustainable and effective solution for nematode management in banana cultivation.

Palabras claves: chemical control, biological control, resistance, organic matter

Introducción

El banano (*Musa acuminata* x *balbisiana*) es uno de los cultivos más importantes para la agricultura global debido a su amplio alcance geográfico, su relevancia en la seguridad alimentaria y su valor económico. Este cultivo se produce en más de 150 países y ocupa el cuarto lugar entre los cultivos de mayor valor bruto de producción, después del arroz (*Oryza* spp.), trigo (*Triticum* spp.) y maíz (*Zea mays*) (Brito et al., 2015; Bakry et al., 2009; Tripathi et al., 2011). En República Dominicana y Puerto Rico, el plátano es un pilar económico, representando una fuente crucial de ingresos agrícolas, con rendimientos significativos que respaldan la seguridad alimentaria local (FAOSTAT, 2015).

A pesar de su importancia, el cultivo de plátano enfrenta múltiples desafíos, entre ellos, la incidencia de plagas y enfermedades, destacándose los nematodos fitoparásitos como una de las principales amenazas. Especies como *Radopholus similis*, *Helicotylenchus multicinctus* y *Meloidogyne* spp. causan daños severos al sistema radicular, afectando negativamente la absorción de agua y nutrientes, y disminuyendo los rendimientos agrícolas (Hartman et al., 2010; Aguirre et al., 2016). Además, estas infestaciones incrementan los costos de producción debido a la necesidad de implementar estrategias de manejo intensivas, como la aplicación de nematicidas, que a su vez generan impactos negativos en la biodiversidad del suelo y el medio ambiente (Tixier et al., 2008; Araya & De Waele, 2005).

En este contexto, las prácticas agrícolas sostenibles emergen como una alternativa viable para manejar los nematodos fitoparásitos, reducir los efectos ambientales negativos y mejorar la salud del suelo. Estrategias como el uso de enmiendas orgánicas, cultivos de cobertura, rotaciones de cultivos y la incorporación de agentes biológicos han demostrado ser efectivas no solo en la reducción de poblaciones de nematodos perjudiciales, sino también en el incremento de nematodos benéficos y microorganismos del suelo que promueven un ecosistema agrícola más resiliente (Loranger-Merciris et al., 2022; Yang et al., 2021; Ugarte et al., 2013).

Este análisis explora la relación entre las prácticas agrícolas sostenibles y el manejo de nematodos fitoparásitos en el cultivo de plátano, enfocándose en su impacto sobre la actividad microbiana del suelo. Se abordan las implicaciones de estas prácticas para la salud del cultivo y la sostenibilidad a largo plazo, subrayando la importancia de integrar enfoques agroecológicos para maximizar los beneficios económicos y ambientales en regiones como República Dominicana y Puerto Rico.

Nematodos en el cultivo de banano

Los nematodos fitoparásitos son una de las principales amenazas para el cultivo de banano a nivel mundial, incluyendo regiones como República Dominicana y Puerto Rico. Estos organismos dañan severamente las raíces y rizomas de las plantas, afectando la absorción de agua y nutrientes, lo que resulta en pérdidas significativas de

rendimiento y calidad de la fruta. Entre las especies más relevantes se encuentran *Radopholus similis*, *Pratylenchus coffeae*, *Helicotylenchus multicinctus*, *Meloidogyne incognita* y *Rotylenchulus reniformis* (Figura 1), cada una con características y mecanismos de patogenicidad distintos (Tabla 1).

Impacto en la producción de banano

Los nematodos reducen los rendimientos globales del cultivo de banano en hasta un 20%, alcanzando pérdidas superiores al 40% en regiones con condiciones desfavorables. Los síntomas típicos incluyen amarillamiento, enanismo, marchitez y menor peso de los racimos (Dubois y Coyne, 2011; Sousa et al., 2024). El manejo sostenible de los nematodos en cultivos de banano combina estrategias innovadoras y efectivas que integran diferentes enfoques. El control biológico mediante el uso de lombrices como *Pontoscolex corethrurus* mejora la estructura del suelo, favoreciendo la resistencia del cultivo (Loranger-Merciris et al., 2012).

Las enmiendas orgánicas, como el bagazo de caña y lodos, incrementan la fertilidad del suelo, regulan las poblaciones de nematodos y potencian el desarrollo de las plantas (Tabarant et al., 2011). La fumigación selectiva con cal y bicarbonato de amonio reduce eficazmente las poblaciones de nematodos, lo que se traduce en mejores rendimientos (Su et al., 2017). Por último, el mejoramiento genético, tanto con métodos tradicionales como transgénicos, ha logrado desarrollar variedades resistentes que fortalecen la sostenibilidad de los sistemas productivos (Sousa et al., 2024; Tripathi et al., 2013). Estas estrategias, combinadas, minimizan el impacto ambiental y maximizan la productividad del banano.

Control químico de nematodos en banano

Los nematicidas químicos han sido ampliamente utilizados para controlar los nematodos fitoparásitos en el cultivo de banano, aunque las preocupaciones ambientales han llevado a regulaciones más estrictas. En República Dominicana y Puerto Rico, los nematicidas permitidos incluyen oxamyl y etoprofos (Mocap 15G), cuyo uso está limitado a dosis reducidas para minimizar el impacto ambiental (Chavarria-Carvajal et al., 2001). El oxamyl ha demostrado eficacia temporal contra *Radopholus similis* en estudios realizados en Martinica, aunque su efectividad a largo plazo es limitada cuando se utiliza de manera aislada (Chabrier et al., 2005).

De igual forma, estudios en Costa Rica revelaron que las plantas de banano tratadas con oxamyl mostraron una reducción del 35% en poblaciones de *R. similis* y del 43% en nematodos en general (Vargas et al., 2015). Por su parte, el etoprofos ha mostrado ser efectivo, como se observó en ensayos realizados en Sudáfrica y Estados Unidos, donde redujo significativamente las poblaciones de nematodos fitoparásitos y mejoró el rendimiento de los cultivos (Rodríguez-Kábana & King, 1985., Jones, 1979).

A pesar de la eficacia de estos controles químicos, persisten desafíos. Investigaciones han señalado

Tabla 1: Efectividad de hongos y bacterias para control biológico de nematodos fitoparásitos

Especie	Nombre común	Daño principal	Pérdidas	Referencias
<i>R. similis</i>	Nematodo barrenador	Penetra raíces, creando túneles rojizos/marrones que afectan la absorción de agua y nutrientes.	5% - 100%	Nhung et al. 2023; Chabrier et al., 2010; Guzmán-Piedrahita et al., 2012.
<i>P. coffeae</i>	Nematodo de las lesiones	Provoca lesiones negras en raíces y rizomas, debilitando las plantas y facilitando la entrada de patógenos secundarios.	Hasta 60%	Bridge et al., 1997; Davis & MacGuidwin, 2000.
<i>H. multicinctus</i>	Nematodo espiral	Genera necrosis en raíces, reduciendo la funcionalidad del sistema radicular y afectando el desarrollo de las plantas.	19% - 34%	Carlier et al., 2003
<i>M. incognita</i>	Nematodo agallador	Forma agallas en las raíces, impidiendo la absorción de agua y nutrientes; facilita la entrada de otros patógenos.	Hasta 5%	Ornat & Sorribas, 2008
<i>R. reniformis</i>	Nematodo reniforme	Afecta el parénquima cortical de las raíces, reduciendo el crecimiento y desarrollo de las planta	No especificado	Sipes & Schmitt, 2000

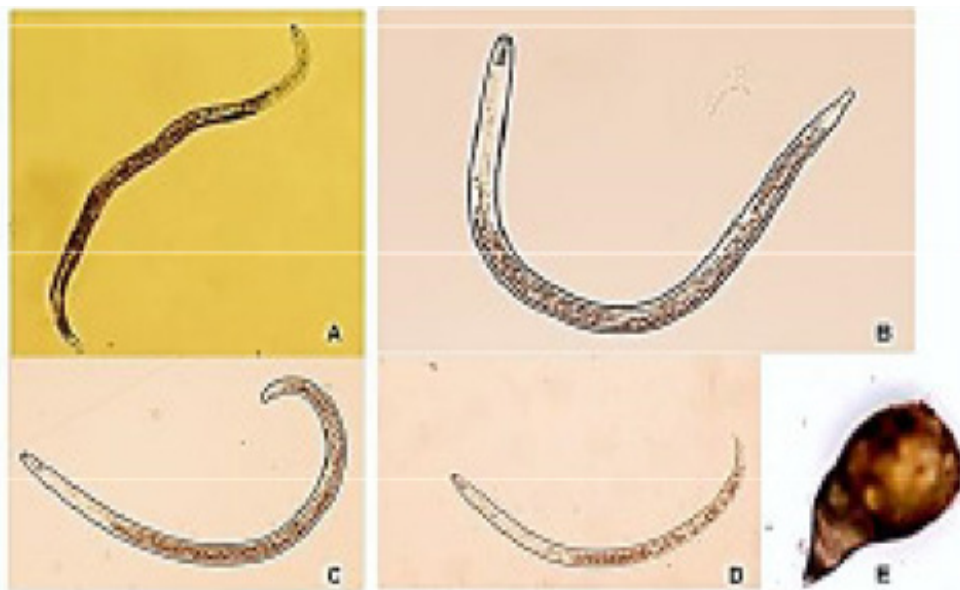


Figura 1. Nematodos parásitos que afectan el cultivo de plátano: a) *Radopholus similis*, b) *Pratylenchus coffeae*, c) *Helicotylenchus multicinctus*, d) *Rotylenchulus reniformis* y e) *Meloidogyne incognita*

que nematicidas como el oxamyl pueden afectar los rendimientos de las plantas bajo ciertas condiciones, como se observó en cultivos de tomate, donde el control de nematodos resultó en una disminución del peso de los frutos (Abo-Elyousr et al., 2010). Asimismo, el etoprofos, aunque efectivo, plantea preocupaciones debido a su persistencia en el ambiente. Estos hallazgos subrayan la necesidad de enfoques integrados que combinen controles químicos con prácticas sostenibles. Estrategias de manejo integrado de plagas y prácticas agroecológicas ofrecen alternativas prometedoras para reducir la dependencia de químicos mientras se mantiene un control eficaz de los nematodos, garantizando tanto la protección ambiental como la productividad a largo plazo.

Hongos y bacterias para el control biológico

El uso de microorganismos antagonistas en los suelos de cultivos de banano ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar el rendimiento agrícola, aumentando el peso y el tamaño de los racimos, lo que mejora la aceptación del fruto en el mercado.

Hongos como *Trichoderma* spp. y *Paecilomyces lilacinus* son especialmente efectivos. Por ejemplo, *Trichoderma* spp. controla huevos y juveniles de *Meloidogyne* spp. y reduce hasta el 81% las poblaciones de *Radopholus similis*, mientras que *P. lilacinus* parasita nematodos adultos y maximiza la presencia de microorganismos benéficos en el suelo (Kisaakye et al., 2023; Mendoza et al., 2004). Además, hongos como *Fusarium oxysporum* y *Verticillium chlamydosporium* han mostrado reducir significativamente densidades de nematodos, promoviendo la salud de las raíces y aumentando los rendimientos en cultivos de banano y melón (Waweru et al., 2013; Hidalgo-Díaz & Kerry, 2008) (Tabla 2).

Por su parte, bacterias como *Pseudomonas fluorescens* y especies del género *Bacillus* son potentes agentes biológicos. *P. fluorescens* ha reducido poblaciones de *Helicotylenchus multicinctus* entre un 41.3% y 89%, disminuyendo la incidencia de marchitez en un 60% y aumentando los rendimientos en un 46.5% (Selvaraj et al., 2014). Asimismo, *Bacillus* spp. ha demostrado

propiedades antagonistas generales contra nematodos, destacándose como un componente clave en programas de manejo integrado de plagas (Djiwanti et al., 2023).

La integración de estos organismos en estrategias de control biológico no solo mitiga el impacto de los nematodos fitoparásitos, sino que también enriquece la microbiota del suelo, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles. La adopción de microorganismos en programas de control biológico puede aumentar significativamente la salud y productividad de los cultivos de banano, contribuyendo a sistemas agrícolas más resilientes y sostenibles.

Incorporación de materia orgánica en el suelo

La adición de materia orgánica al suelo, contribuye significativamente a mejorar su estructura física y estimula la actividad de los microorganismos del suelo disminuyendo los efectos de la erosión. Durante su descomposición, esta materia potencia la retención de nutrientes y la capacidad del suelo para almacenar agua, lo cual genera un entorno más favorable para que las plantas resistan el ataque de nematodos fitoparásitos (Trivedi & Barker, 1986). Por otro lado, los residuos orgánicos fomentan el

crecimiento de microorganismos benéficos que pueden competir con nematodos dañinos y reducir su presencia (Roman & Acosta, 1984). Asimismo, al liberar compuestos volátiles, la materia orgánica funciona como un fumigante natural que ayuda a controlar patógenos del suelo. Este proceso no solo mejora la fertilidad, sino que también estimula el crecimiento radicular, ajusta el pH del suelo y aporta nutrientes clave como nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio (Julca-Otiniano, 2006) (Tabla 3).

En Costa Rica, estudios demuestran que suelos enriquecidos con materia orgánica (vermicomposta), reducen las poblaciones de nematodos mientras incrementan la actividad microbiana (Blume & Reichert 2015). Estas enmiendas, mejoran la retención de humedad y disponibilidad de nutrientes, el cual beneficia directamente al cultivo de banano. El uso de compost, como el bokashi, potencia la actividad microbiana y controla infestaciones de nematodos en las raíces, complementando métodos de control biológico con hongos nematófagos. Este enfoque dual asegura una gestión sostenible de las poblaciones de nematodos, equilibrando la productividad del cultivo y la salud del suelo (Segura et al., 2015).

Tabla 2: Influencia de la materia orgánica en la actividad microbiana y los nematodos en suelos bananeros

Hongos y Bacterias	Nematodos objetivo	Efectividad	Mejora del rendimiento	Referencias
<i>F. oxysporum</i>	<i>P. goodeyi</i> , <i>H. multicinctus</i>	Reduce densidades de nematodos >45%, necrosis radicular >20% (Waweru et al., 2014, 2013)	Hasta un 36%	Nhung et al. 2023; Chabrier et al., 2010; Guzmán-Piedrahita et al., 2012.
<i>P. lilacinus</i>	<i>R. similis</i>	Reduce actividad de nematodos, mejora la salud radicular (Mendoza et al., 2004)	No especificado	Bridge et al., 1997; Davis & MacGuidwin, 2000.
<i>Trichoderma</i> spp.	<i>R. similis</i>	Reduce densidades de nematodos >81% (Kisaakye et al., 2023)	No especificado	Carlier et al., 2003; Guzmán-Piedrahita, 2010.
<i>Beauveria</i> spp.	Nematodos generales	Presente en rizosfera de banano, potencial agente biológico (Ciancio et al., 2022)	No especificado	Ornat & Sorribas, 2008
<i>P. fluorescens</i>	<i>H. multicinctus</i>	Reduce nematodos 41.3%-89%, menor incidencia de marchitez (60%) (Selvaraj et al., 2014)	36.6%-46.5%	Sipes & Schmitt, 2000
<i>Bacillus</i> spp.	Nematodos generales	Propiedades antagonistas comprobadas (Djiwanti et al., 2023)	No especificado	

Resistencia a nematodos parásitos

Aunque la información sobre variedades resistentes a nematodos parásitos en el banano en Costa Rica es limitada, investigaciones en otros cultivos han identificado estrategias útiles. Los mecanismos de resistencia incluyen genes específicos de las plantas que inhiben la invasión de nematodos o mutaciones que refuerzan sus defensas (Bhandari et al., 2015).

En algodón, los genotipos A2-190 y LONREN-2 demostraron resistencia al nematodo reniforme *R. reniformis* (Bonfim-Junior & Inomoto, 2012). En frijol común (*Phaseolus vulgaris*), el cultivo rotativo con café mostró resistencia al nematodo de la lesión *P. jaehni* (Bonfim & Inomoto, 2012)

Asimismo, variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pimiento (*Capsicum* spp.) como Small Fry y Carolina Cayenne mostraron resistencia a nematodos formadores de nódulos (*M. incognita*, *M. javanica* y *M. arenaria*) (Kwara, Kwoseh, & Starr, 2014).

En el banano, híbridos como FB920 y H 531 han mostrado menor susceptibilidad a nematodos como *Radopholus similis* y *Pratylenchus coffeae*, mientras que variedades como 'Pisang Lilin' destacan por su alta resistencia a *M. incognita* (Tixier et al., 2008; Sundararaju et al., 2008). Además, investigaciones sobre plantas transgénicas han demostrado resistencia a múltiples especies de nematodos (Tripathi et al., 2013).

Estas estrategias, combinadas con prácticas de

Tabla 3. Influencia de la materia orgánica en la actividad microbiana y los nematodos en suelos bananeros

Factor	Influencia microbiana	Influencia nematodos	Rendimiento	Referencias
Uso de pesticidas	Alta adaptabilidad, sin disminución de actividad (Blume & Reichert, 2015)	No abordado directamente	Hasta un 36%	Nhung et al. 2023; Chabrier et al., 2010; Guzmán-Piedrahita et al., 2012.
Materia orgánica	Aumenta la respiración microbiana (Blume & Reichert, 2015; Vidaurre et al., 2020)	Favorece la presencia de nematodos entomopatógenos	No especificado	Bridge et al., 1997; Davis & MacGuidwin, 2000.
Propiedades del suelo	Afecta la diversidad microbiana y de nematodos (Segura et al., 2015)	Las condiciones pobres reducen la diversidad	No especificado	Carlier et al., 2003; Guzmán-Piedrahita, 2012.
Control biológico	Hongos nematófagos controlan nematodos (Soto-Barrientos et al., 2011)	Control eficaz	No especificado	Ornat & Sorribas, 2008
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Helicotylenchus multicinctus</i>	Reduce nematodos 41.3%-89%, menor incidencia de marchitez (60%) (Selvaraj et al., 2014)	36.6%-46.5%	Sipes & Schmitt, 2000

Tabla 4. Influencia de la materia orgánica en la actividad microbiana y los nematodos en suelos bananeros

Variedad/Híbrido	Resistencia/Tolerancia	Especies de nematodos
FB920	Baja susceptibilidad	<i>Radopholus similis</i> , <i>Pratylenchus coffeae</i> (Tixier et al., 2008)
Pisang Lilin	Alta resistencia	<i>Meloidogyne incognita</i> (Sundararaju et al., 2008)
H 531	Resistente	<i>Meloidogyne incognita</i> , <i>Helicotylenchus multicinctus</i> (Das et al., 2014)
Plantain transgénico	Resistencia amplia	Múltiples especies de nematodos (Tripathi et al., 2013)
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Helicotylenchus multicinctus</i>	Reduce nematodos 41.3%-89%, menor incidencia de marchitez (60%) (Selvaraj et al., 2014)

manejo como el control biológico mediante nematodos entomopatógenos, ofrecen un enfoque integral para mitigar el impacto de los nematodos en plantaciones de banano en Costa Rica (Vidaurre et al., 2020). Adoptar variedades resistentes como las mencionadas, junto con estrategias de control biológico y prácticas agronómicas sostenibles, podría ser clave para mitigar los daños causados por los nematodos en el cultivo de banano (Tabla 4).

Limitaciones actuales en el manejo integrado

El control de nematodos plantea un desafío complejo debido a los riesgos ambientales y de salud asociados con los nematicidas químicos tradicionales (Dutta & Phani, 2023; Abd-Elgawad, 2024; Devi et al., 2020). Las restricciones regulatorias han limitado el uso de estos productos y promovido la búsqueda de alternativas más sostenibles (Dutta et al., 2019). Aunque métodos biológicos y culturales como la rotación de cultivos y el uso de variedades resistentes ofrecen cierta promesa, su eficacia varía y a menudo requieren conocimientos especializados (Dutta & Phani, 2023; Devi et al., 2020; Dutta et al., 2019). Los enfoques tecnológicos, como la ingeniería genética y las herramientas bioinformáticas, presentan un gran potencial, pero enfrentan barreras regulatorias y requieren mayor investigación (Abd-Elgawad, 2024; Dutta & Phani, 2023).

La implementación de estrategias de manejo integrado de plagas (MIP) es compleja y requiere la coordinación

de diversos actores, además de considerar aspectos económicos y educativos (Elhady et al., 2024; Sikora et al., 2023; Ansari & Saleem, 2023; Duncan y Noling, 1998). Por tanto, el manejo efectivo de nematodos exige una combinación de enfoques que aborden tanto los aspectos biológicos como los socioeconómicos, y que promuevan la investigación continua y la transferencia de conocimiento a los agricultores (Elhady et al., 2024; Dutta et al., 2019).

Necesidades integrales y ecología del suelo

La adopción de enfoques integrales basados en la ecología del suelo es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales (Fossey et al., 2020; Robinson et al., 2013; Lal, 2007). Estos enfoques promueven prácticas agrícolas sostenibles que integran principios ecológicos, como la biodiversidad y el reciclaje de nutrientes (Hartley, 2018). Además, la ecología del suelo desempeña un papel crucial en la mitigación y adaptación al cambio climático, al mejorar la resiliencia de los ecosistemas y regular los ciclos biogeoquímicos (Simard, 2009).

Sin embargo, la implementación de estas estrategias requiere una comprensión profunda de los complejos procesos del suelo y la colaboración entre diversas disciplinas (Vereecken et al., 2016). Asimismo, es necesario desarrollar marcos de toma de decisiones que consideren los múltiples servicios ecosistémicos del suelo y que

involucren a las comunidades locales en la co-creación de soluciones (Fossey et al., 2020; Okpara et al., 2020; Hartley, 2018; Robinson et al., 2013; Bouma & McBratney, 2013). Por tanto, la gestión sostenible del suelo requiere un enfoque holístico que integre conocimientos científicos, prácticas locales y políticas públicas para asegurar la salud de los ecosistemas y el bienestar humano a largo plazo (Lal, 2007).

Innovaciones biotecnológicas

El manejo de nematodos ha experimentado avances significativos gracias a la implementación de innovaciones tecnológicas. Sensores remotos y nanosensores permiten una detección temprana y precisa de poblaciones de nematodos, facilitando la toma de decisiones basadas en datos (Khan et al., 2023; Desaegeer et al., 2021). Modelos predictivos y sistemas de soporte de decisiones, combinados con datos de sensores, optimizan el manejo de nematodos al predecir ciclos poblacionales y permitir la aplicación de medidas de control específicas para cada sitio (Westerdahl, 2021). La edición genética, a través de tecnologías como RNAi y CRISPR/Cas9, ha permitido desarrollar plantas transgénicas con resistencia a nematodos y una mejor comprensión de las interacciones planta-nematodo (Khan et al., 2023; Dutta & Phani, 2023; Abd-Elgawad, 2022; Safeena & Zakeel, 2020).

La nanotecnología ha abierto nuevas posibilidades en el control de nematodos, con el desarrollo de nanocompuestos nematocidas y nanofertilizantes que ofrecen una mayor eficacia y especificidad (Khan et al., 2023; Safeena & Zakeel, 2020). Además, el control biológico, mediante el uso de agentes de biocontrol y hongos atrapadores de nematodos, complementa estas estrategias, promoviendo un manejo integrado de plagas (Antil et al., 2023; Jiang et al., 2017). En conjunto, estas innovaciones tecnológicas ofrecen herramientas precisas y eficientes para combatir las infestaciones por nematodos, mejorando la productividad agrícola y la sostenibilidad de los sistemas de cultivo.

Discusión

El cultivo del banana, enfrenta desafíos de manejo agronomico a nematodos fitoparásitos, los cuales afectan severamente a los rendimientos de producción y productividad, además, de generan impactos económicos y ambientales considerables. A pesar de las estrategias químicas disponibles, como el uso de oxamyl y etoprofos, estas presentan limitaciones debido a su impacto ambiental y eficacia limitada a largo plazo. Esto destaca la necesidad de explorar enfoques sostenibles que integren prácticas agrícolas regenerativas y biológicas.

El uso de hongos y bacterias antagonistas, como *Trichoderma spp.*, *Paecilomyces lilacinus* y *Pseudomonas fluorescens*, ha mostrado ser una alternativa prometedora en el control biológico de nematodos. Estas prácticas no solo mitigan la incidencia de nematodos, sino que también mejoran la salud del suelo y la productividad del cultivo, promoviendo un enfoque agroecológico integral. Además, la incorporación de materia orgánica,

como el compost y vermicomposta, potencia la actividad microbiana, mejora la estructura del suelo y reduce la población de nematodos, equilibrando la sostenibilidad ambiental con la productividad agrícola.

El mejoramiento genético también ofrece soluciones duraderas, destacándose variedades resistentes como FB920 y Pisang Lilin, y avances en tecnologías transgénicas que prometen un control más efectivo de múltiples especies de nematodos. La combinación de estas estrategias, junto con un manejo integrado de plagas, puede contribuir significativamente a reducir las pérdidas agrícolas y garantizar la sostenibilidad del cultivo de banano en regiones como República Dominicana y Puerto Rico.

Conclusión

La integración de prácticas sostenibles, control biológico y mejoramiento genético, representa el camino hacia un manejo eficiente de nematodos fitoparásitos en el cultivo de banano. Estas estrategias, no solo aseguran la productividad agrícola, sino que también promueven la sostenibilidad ambiental y económica, posicionándose como esenciales para enfrentar los desafíos agrícolas actuales.

Declaración de conflictos

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros, personales o institucionales que hayan influido en la realización o publicación de este artículo.

Contribucion de los autores

M.C.-C.: conceptualización, revisión de literatura y redacción inicial; S.G.-P.: validación de fuentes, análisis crítico y revisión científica; D.G.-C.: edición, formateo y referencias APA; E.M.-C.: sistematización de datos y verificación bibliográfica; W.F.: coordinación general y revisión final.

Agradecimientos

Agradecemos al Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF) y Universidad de Puerto Rico (Recinto Mayaguez) por su respaldo institucional, y a la Universidad Nacional "Siglo XX" por su apoyo logístico y académico.

Referencias

- Abd-Elgawad, M. M. (2022). Understanding molecular plant-nematode interactions to develop alternative approaches for nematode control. *Plants*, 11(16), 2141. <https://doi.org/10.3390/plants11162141>
- Abd-Elgawad, M. M. (2024). Upgrading strategies for managing nematode pests on profitable crops. *Plants*, 13(11), 1558. <https://doi.org/10.3390/plants13111558>
- Abo-Elyousr, K. A., Khan, Z., El-Morsi Award, M., & Abedel-Moneim, M. F. (2010). Evaluation of plant extracts and *Pseudomonas spp.* for control of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* on tomato. *Nematropica*, 40(2), 289–299.

- Aguirre, O., Chávez, C., Giraud, A., & Araya, M. (2016). Frequencies and population densities of plant-parasitic nematodes on banana (*Musa AAA*) plantations in Ecuador from 2008 to 2014. *Agronomía Colombiana*, 34(1), 61–73. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n1.53915>
- Ansari, T., & Saleem, M. (2023). Plant parasitic nematodes: A silent threat to agricultural output and sustainable approaches for their management. In *Climate-resilient agriculture* (Vol. 1, pp. 799–819). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37424-1_36
- Antil, S., Kumar, R., Pathak, D. V., & Kumari, A. (2023). Recent advances in utilizing bacteria as biocontrol agents against plant parasitic nematodes emphasizing *Meloidogyne* spp. *Biological Control*, 183, 105244. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105244>
- Araya, M., & De Waele, D. (2005). Effect of weed management on nematode numbers and their damage in different root thickness and its relation to yield of banana (*Musa AAA* cv. Grande Naine). *Crop Protection*, 24(7), 667–676. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.11.010>
- Bakry, F., Carreel, F., Jenny, C., & Horry, J-P. (2009). Genetic improvement of banana (pp. 3–50). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_1
- Bhandari, B., Myers, G. O., Indest, M. O., & Overstreet, C. (2015). Response of five resistant cotton genotypes to isolates of *Rotylenchulus reniformis* collected from reniform nematode infested fields of Louisiana. *Nematropica*, 45(2), 252–262.
- Blume, E., & Reichert, J. M. (2015). Herbicide sorption and leaching potential in tropical soils of Costa Rica. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(6), 1232–1238. <https://doi.org/10.1002/etc.2933>
- Bonfim Junior, M. F., & Inomoto, M. M. (2012). Resistance of common bean to *Pratylenchus jaehni*. *Nematropica*, 42, 320–323. <https://journals.flvc.org/nematropica/article/view/81866>
- Bouma, J., & McBratney, A. (2013). Framing soils as an actor when dealing with wicked environmental problems. *Geoderma*, 200, 130–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.011>
- Bridge, J., Forgain, R., & Spaijer, P. (1997). Nematodos lesionadores de los bananos. Inibap. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/2ff9d421-c03d-4628-b4ac-c52adcb81b4f/content>
- Brito, F. S. D., Fraaije, B., & Miller, R. N. G. (2015). Sigatoka disease complex of banana in Brazil: Management practices and future directions. *Outlooks on Pest Management*, 26(2), 78–81. https://doi.org/10.1564/v26_apr_08
- Carlier, A., Uroz, S., Smadja, B., Fray, R., Latour, X., Dessaux, Y., & Faure, D. (2003). The Ti plasmid of *Agrobacterium tumefaciens* harbors an attM-paralogous gene, *aiiB*, also encoding N-acyl homoserine lactonase activity. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(8), 4989–4993. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.8.4989-4993.2003>
- Chabrier, C., Hubervic, J., Jules-Rosette, R., & Queneherve, P. (2005). Evaluation of two oxamyl formulations for nematodes and weevil control in banana fields in Martinique. *Nematropica*, 35(1), 49–60. <https://journals.flvc.org/nematropica/article/view/69709>
- Chavarriá-Carvajal, J. A., Rodríguez-Kábana, R., Kloepper, J. W., & Morgan-Jones, G. (2001). Changes in populations of microorganisms associated with organic amendments and benzaldehyde to control plant-parasitic nematodes. *Nematropica*, 31(2), 165–180. <https://journals.flvc.org/nematropica/article/view/69623>
- Das, S. C., Balamohan, T. N., Poornima, K., Velalazan, R., Seenivasan, N., Van Den Bergh, I., & De Waele, D. (2014). Screening of banana hybrids (Phase II) resistant to *Helicotylenchus multicinctus*. *Indian Journal of Nematology*, 44(1), 9–16. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijn&volume=44&issue=1&article=003>
- Davis, E. L., & MacGuidwin, A. E. (2000). Lesion nematode disease. The Plant Health Instructor. <https://n9.cl/cbtbf>
- Desaeger, J., Sikora, R. A., & Molendijk, L. P. (2021). Outlook: A vision of the future of integrated nematode management. In J. Desaeger, R. A. Sikora, & L. P. Molendijk (Eds.), *Integrated nematode management: State-of-the-art and visions for the future* (pp. 475–483). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789247541.0065>
- Devi, T. S., Das, D., Ansari, R. A., Rizvi, R., Sumbul, A., & Mahmood, I. (2020). Role of organic additives in the sustainable management of phytoparasitic nematodes. In R. A. Ansari, A. Sumbul, & I. Mahmood (Eds.), *Management of phytonematodes: Recent advances and future challenges* (pp. 279–295). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-4087-5_12
- Djiwanti, S. R., Wiratno, & Kaushik, S. (2023). Burrowing nematode in spice and fruit crops and their management by novel biocontrol strategies. In S. Kaushik (Ed.), *Nematode diseases in plants: Diagnosis and management* (pp. 395–437). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2893-4_18
- Dubois, T., & Coyne, D. L. (2011). Integrated pest management of banana. In D. Ortiz & R. Swennen (Eds.), *Banana breeding: Progress and challenges* (pp. 121–144). CRC Press. <https://biblio.iita.org/documents/S11InbkDuboisIntegratedNothomNodev.pdf-5661abe8cdeb1a88db97ac3f33106405.pdf>
- Duncan, L. W., & Noling, J. W. (1998). Agricultural sustainability and nematode integrated pest management. In K. R. Barker, G. A. Pederson, & G. L. Windham (Eds.), *Plant and nematode interactions* (Agronomy Monograph No. 36, pp. 251–287). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr36.c13>
- Dutta, T. K., Khan, M. R., & Phani, V. (2019). Plant-parasitic nematode management via biofumigation using brassica and non-brassica plants: Current status and future prospects. *Current Plant Biology*, 17, 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2019.02.001>
- Dutta, T. K., & Phani, V. (2023). Transgenics: Application in plant nematode management. In M. R. Khan (Ed.), *Novel biological and biotechnological applications in plant nematode management* (pp. 203–226). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2893-4_9
- Elhady, A., Alghanmi, L., Abd-Elgawad, M. M., Heuer, H., Saad, M. M., & Hirt, H. (2024). Plant-parasitic nematode research in the arid desert landscape: A systematic review of challenges and bridging interventions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1432311. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1432311>
- Food and Agriculture Organization. (2015). FAOSTAT agriculture database, agricultural production, crops primary: Yams. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Fossey, M., Angers, D., Bustany, C., Cudennec, C., Durand, P., Gascuel-Oudoux, C., Jaffrezic, A., Pérès, G., Besse, C., & Walter, C. (2020). A framework to consider soil ecosystem services in territorial planning. *Frontiers in Environmental Science*, 8, Article 28. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00028>
- Guzmán-Piedrahita, Ó. A. G., Zapata, J. C., & Estrada, B. V. (2012). Principales nematodos fitoparásitos y síntomas ocasionados en cultivos de importancia económica. *Agron*, 20(1), 38–50. [http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia%2020\(1\) completa.pdf#page=38](http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia%2020(1) completa.pdf#page=38)
- Hartley, S. E. (2018). Agroecological approaches to sustainable intensification. In *Sustainable food and agriculture: An integrated*

- approach (pp. 179–184). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr36.c13>
- Hartman, J. B., Vuylsteke, D., Speijer, P. R., Ssango, F., Coyne, D. L., & de Waele, D. (2010). Measurement of the field response of *Musa* genotypes to *Radopholus similis* and *Helicotylenchus multicinctus* and the implications for nematode resistance breeding. *Euphytica*, 172(1), 139–148. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-0104-4>
- Hidalgo-Díaz, L., & Kerry, B. R. (2008). Integration of biological control with other methods of nematode management. In A. Ciancio & K. G. Mukerji (Eds.), *Integrated management and biocontrol of vegetable and grain crops nematodes* (pp. 29–49). Springer. <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/89yx3/integration-of-biological-control-with-other-methods-of-nematode-management>
- Jiang, X., Xiang, M., & Liu, X. (2017). Nematode-trapping fungi. *Microbiology Spectrum*, 5(1), FUNK-0022-2016. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0022-2016>
- Jones, R. K. (1979). Control of *Helicotylenchus multicinctus* parasitising banana using systemic nematicides. *Nematropica*, 9, 147–150. <https://journals.flvc.org/nematropica/article/view/63693/61361>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49–61. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Khan, M. R., Haque, Z., & Sharma, R. K. (2023). Novel biotechnological interventions in plant nematode management technologies. In M. R. Khan (Ed.), *Novel biological and biotechnological applications in plant nematode management* (pp. 167–186). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2893-4_7
- Kisaakye, J., Fourie, H., Coyne, D., Cortada, L., Khamis, F. M., Subramanian, S., Masinde, S., & Haukeland, S. (2023). Endophytic fungi improve management of the burrowing nematode in banana (*Musa* spp.) through enhanced expression of defence-related genes. *Nematology*, 25(4), 427–442. <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10229>
- Kwara, B. K., Kwoseh, C. K., & Starr, J. L. (2014). Effectiveness of root-knot nematode (*Meloidogyne* species) resistant tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and pepper (*Capsicum* species) cultivars in Ghana. *Nematropica*, 44(2), 130–136. <https://journals.flvc.org/nematropica/article/view/84278>
- Lal, R. (2007). Soil science and the carbon civilization. *Soil Science Society of America Journal*, 71(5), 1425–1437. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0001>
- Loranger-Merciris, G., Cabidoche, Y.-M., Deloné, B., Quénéhervé, P., & Ozier-Lafontaine, H. (2012). How earthworm activities affect banana plant response to nematodes parasitism. *Applied Soil Ecology*, 52(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.10.003>
- Loranger-Merciris, G., Ozier-Lafontaine, H., Diman, J.-L., Sierra, J., & Lavelle, P. (2022). Fast improvement of macrofauna communities and soil quality in plantain crops converted to agroecological practices. *Pedobiologia*, 93–94. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2022.150823>
- Mendoza, A., Sikora, R. A., & Kiewnick, S. (2004). Efficacy of *Paecilomyces lilacinus* (strain 251) for the control of *Radopholus similis* in banana. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 69(3), 365–372.
- Nhung, T. T. P., & Quoc, L. P. T. (2023). Nematicidal effect of *Eupatorium odoratum* Linn. aqueous extract on burrowing nematodes (*Radopholus similis*) and its application to control toppling disease on cavendish banana (*Musa acuminata*). *Journal of Horticultural Research*, 31(2), 69–78.
- Okpara, U. T., Fleskens, L., Stringer, L. C., Hessel, R., Bachmann, F., Daliakopoulos, I., ... Zoumides, C. (2020). Helping stakeholders select and apply appraisal tools to mitigate soil threats: Researchers' experiences from across Europe. *Journal of Environmental Management*, 257, 110005. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110005>
- Ornat, C., & Sorribas, F. J. (2008). Integrated management of root-knot nematodes in Mediterranean horticultural crops. In A. Ciancio & K. G. Mukerji (Eds.), *Integrated management and biocontrol of vegetable and grain crops nematodes* (Vol. 2, pp. 295–319). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6063-2_14
- Robinson, D. A., Jackson, B. M., Clothier, B. E., Dominati, E. J., Marchant, S. C., Cooper, D. M., & Bristow, K. L. (2013). Advances in soil ecosystem services: Concepts, models, and applications for earth system life support. *Vadose Zone Journal*, 12(4), Article vzj2013-01.0027. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0027>
- Rodríguez-Kábana, R., & King, P. S. (1985). Evaluation of selected nematicides for control of *Meloidogyne arenaria* in peanut: A multi-year study. *Nematropica*, 15, 155–164. <https://journals.flvc.org/nematropica/article/download/63863/61531>
- Román, J., & Acosta, N. (1984). *Nematodos: Diagnóstico y combate*. Universidad de Puerto Rico, Servicio de Extensión Agrícola, Recinto Universitario de Mayagüez. <https://uprmweb.uprm.edu/ofarrill/HTMLobj-234/NematodosDiagnosticoyCombate.pdf>
- Safeena, M. I. S., & Zakeel, M. C. M. (2020). Nanobiotechnology-driven management of phytonematodes. In R. A. Ansari, A. Sumbul, & I. Mahmood (Eds.), *Management of phytonematodes: Recent advances and future challenges* (pp. 1–33). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4087-5_1
- Segura, R. A., Serrano, E., Pocasangre, L., Acuña, O., Bertsch, F., Stoorvogel, J. J., & Sandoval, J. A. (2015). Chemical and microbiological interactions between soils and roots in commercial banana plantations (*Musa* AAA, cv. Cavendish). *Scientia Horticulturae*, 197, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.028>
- Selvaraj, S., Ganeshamoorthi, P., Anand, T., Raguchander, T., Seenivasan, N., & Samiyappan, R. (2014). Evaluation of a liquid formulation of *Pseudomonas fluorescens* against *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense and *Helicotylenchus multicinctus* in banana plantation. *BioControl*, 59(3), 345–355. <https://doi.org/10.1007/s10526-014-9569-8>
- Sikora, R. A., Helder, J., Molendijk, L. P., Desaegeer, J., Eves-van den Akker, S., & Mahlein, A. K. (2023). Integrated nematode management in a world in transition: Constraints, policy, processes, and technologies for the future. *Annual Review of Phytopathology*, 61(1), 209–230. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-113058>
- Simard, S. W. (2009). Mycorrhizal networks and complex systems: Contributions of soil ecology science to managing climate change effects in forested ecosystems. *Canadian Journal of Soil Science*, 89(4), 369–382. <https://doi.org/10.4141/cjss08078>
- Sipes, B. S., & Schmitt, D. P. (2000). Rotylenchulus reniformis damage thresholds on pineapple. In *Acta Horticulturae* (Vol. 529, pp. 273–280). International Society for Horticultural Science (ISHS). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.529.29>
- Sousa, A. B. P., Rocha, A. de J., Oliveira, W. D. dos S., Rocha, L. de S., & Amorim, E. P. (2024). Phytoparasitic nematodes of *Musa* spp. with emphasis on sources of genetic resistance: A systematic review. *Plants*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/plants13101299>
- Su, L., Shen, Z., Ou, Y., Tao, C., Ruan, Y., Li, R., & Shen, Q. (2017). Novel

- soil fumigation strategy suppressed plant-parasitic nematodes associated with soil nematode community alterations in the field. *Applied Soil Ecology*, 121, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.039>
- Sundararaju, P., Swarnakumari, N., & Uma, S. (2008). Evaluation of banana (*Musa* spp.) germplasm against root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 78(6), 563–566.
- Tabarant, P., Villenave, C., Risède, J.-M., Roger-Estrade, J., & Dorel, M. (2011). Effects of organic amendments on plant-parasitic nematode populations, root damage, and banana plant growth. *Biology and Fertility of Soils*, 47(3), 341–347. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0541-9>
- Tixier, P., Salmon, F., Chabrier, C., & Quénéhervé, P. (2008). Modelling pest dynamics of new crop cultivars: The FB920 banana with the *Helicotylenchus multicinctus*–*Radopholus similis* nematode complex in Martinique. *Crop Protection*, 27(11), 1427–1431. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.06.004>
- Trivedi, P. C., & Barker, K. R. (1986). Management of nematodes by cultural practices. *Nematropica*, 16(2), 213–236. <https://journals.flvc.org/nematropica/article/view/63891>
- Tripathi, L., Tripathi, J. N., Roderick, H., & Atkinson, H. J. (2013). Engineering nematode resistant plantains for sub-Saharan Africa. *Acta Horticulturae*, 974, 99–108. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2013.974.11>
- Ugarte, C. M., Zaborski, E. R., & Wander, M. M. (2013). Nematode indicators as integrative measures of soil condition in organic cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 64, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.03.035>
- Vargas, R., Wang, A., Obregón, M., & Araya, M. (2015). Efecto de *Trichoderma* spp., *Paecilomyces lilacinus* y la inyección de nematicida en el pseudotallo en el combate de *Radopholus similis* y la producción de banano. *Agronomía Costarricense*, 39(2), 61–76. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v39n2/0377-9424-ac-39-02-00061.pdf>
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., & Young, I. M. (2016). Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15(5), Article vzj2015-09.0131. <https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>
- Vidaurre, D., Rodríguez, A., & Uribe, L. (2020). Edaphic factors and entomopathogenic nematodes in a neotropical banana agroecosystem [Factores edáficos y nematodos entomopatógenos en un agroecosistema neotropical de banana]. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 276–288. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.37680>
- Waweru, B. W., Losenge, T., Kahangi, E. M., Dubois, T., & Coyne, D. (2013). Potential biological control of lesion nematodes on banana using Kenyan strains of endophytic *Fusarium oxysporum*. *Nematology*, 15(1), 101–107. <https://doi.org/10.1163/156854112X645606>
- Westerdahl, B. B. (2021). Scenarios for sustainable management of plant parasitic nematodes. *Indian Phytopathology*, 74(2), 469–475. <https://doi.org/10.1007/s42360-021-00370-y>
- Yang, B., Banerjee, S., Herzog, C., Ramírez, A. C., Dahlin, P., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Impact of land use type and organic farming on the abundance, diversity, community composition, and functional properties of soil nematode communities in vegetable farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 318, 107488. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107488>