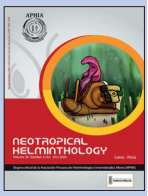
ISSN Versión Impresa 2218-6425 ISSN Versión Electrónica 1995-1403

Neotropical Helminthology, 2026, vol. 20 (2), 301-308

Neotropical Helminthology



REVIEW ARTICLE / ARTÍCULO DE REVISIÓN

PLANT-PARASITIC NEMATODES: A SILENT THREAT TO CROPS IN AGRICULTURAL REGIONS SUCH AS SINALOA, MEXICO

NEMÁTODOS FITOPARÁSITOS: LA AMENAZA SILENCIOSA BAJO LOS CULTIVOS EN REGIONES AGRÍCOLAS COMO SINALOA, MÉXICO

Juan Manuel Osuna-Cabanillas[1*], Carlos Bruno-Fiscal[1], Diana Ibarra-Rodríguez[1], E. Alberto Aragón-Noriega[2], Jennifer Zoe Borrego-Durán[3] & María Amparo Rodríguez-Santiago[4,5]

[1] Universidad Tecnológica de Escuinapa, Sinaloa, CP 82400, México.
[2] Unidad Guaymas del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Km 2.35 Camino al Tular, Estero Bacochibampo, Guaymas, Sonora, 85454, México.
[3] Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, CP 8200, México.
[4] Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Estación "El Carmen", Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad del Carmen, Campeche, México.
[5] Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, México.
* Corresponding author: Juan Manuel Osuna-Cabanillas

Juan Manuel Osuna-Cabanillas: https://orcid.org/0000-0002-3959-0592
Carlos Bruno-Fiscal: https://orcid.org/0000-0001-6789-4916
Diana Ibarra-Rodríguez: https://orcid.org/0000-0003-1528-0714
E. Alberto Aragón-Noriega: https://orcid.org/0000-0003-1043-0365
Jennifer Zoe Borrego-Durán: https://orcid.org/0000-0002-9600-7711
María Amparo Rodríguez-Santiago: https://orcid.org/0000-0003-0616-237X

ABSTRACT

Plant-parasitic nematodes are microscopic organisms considered one of the most important threats to global agriculture due to the damage they cause to plant roots. In agricultural regions such as Sinaloa, these parasites affect economically important crops including chili pepper (*Capsicum* spp.), tomato (*Solanum* spp.), cucumber (*Cucumis* spp.), and eggplant (*Solanum* spp.), reducing both crop yield and product quality. This article describes what plant-parasitic nematodes are, how they infect plants, the main damage they cause, and the environmental conditions that favor their development. Special attention is given to root-knot nematodes of the genus *Meloidogyne*, considered among the most harmful groups for agriculture worldwide. Finally, sustainable management strategies aimed at reducing agrochemical use and promoting environmentally friendly agricultural practices are discussed.

Keywords: agriculture – horticultural crops – *Meloidogyne* – plant-parasitic nematodes – sustainable management – Sinaloa

Este artículo es publicado por la revista Neotropical Helminthology de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú auspiciado por la Asociación Peruana de Helmintología e Invertebrados Afines (APHIA). Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

DOI: https://doi.org/10.62429/rnh20262022226

RESUMEN

Los nemátodos fitoparásitos son organismos microscópicos que representan una de las amenazas más importantes para la agricultura mundial debido a los daños que ocasionan en las raíces de las plantas. En regiones agrícolas como Sinaloa, estos parásitos afectan cultivos de gran importancia económica como chile (*Capsicum* spp.), tomate (*Solanum* spp.), pepino (*Cucumis* spp.) y berenjena (*Solanum* spp.), disminuyendo la producción y calidad de los alimentos. El presente artículo describe qué son los nemátodos fitoparásitos, cómo infectan a las plantas, los principales daños que ocasionan y las condiciones ambientales que favorecen su desarrollo. Asimismo, se aborda la problemática de los nemátodos agalladores del género *Meloidogyne*, considerados uno de los grupos más dañinos para la agricultura. Finalmente, se destacan algunas estrategias de manejo sustentable enfocadas en disminuir el uso de agroquímicos y promover prácticas agrícolas más amigables con el ambiente.

Palabras clave: agricultura – cultivos hortícolas – manejo sustentable – *Meloidogyne* – nemátodos fitoparásitos – Sinaloa

INTRODUCCIÓN

Un productor de chile en Escuinapa, Sinaloa, México (Figura 1) recorre con preocupación su parcela mientras observa que sus plantas no crecen como antes, carecen de ese verde brillante característico, sus hojas están marchitas y su cosecha promete ser menor. El problema no se ve a simple vista porque los enemigos de su cosecha están bajo tierra: son nemátodos fitoparásitos, es decir, gusanos parásitos que infectan a las plantas. Estos seres microscópicos son responsables de importantes pérdidas en los cultivos agrícolas y representan una amenaza silenciosa para la producción de alimentos (Kantor *et al.*, 2024). Los nemátodos son microscópicos (Figura 2) que habitan naturalmente en los suelos agrícolas donde forman comunidades complejas y diversas (Arseneault *et al.*, 2024). Dentro de todos los grupos de nemátodos existentes, algunos son muy importantes porque participan en la descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de los nutrientes. Sin embargo, de manera opuesta, existen nemátodos que necesitan nutrientes propios de las plantas de cultivo para subsistir; a este grupo se le conoce como nemátodos fitoparásitos (Hasan *et al.*, 2024). Se estima que existen alrededor de 4.100 especies de nemátodos que son parásitos de plantas (Palomares-Rius *et al.*, 2017). En la región anterior del cuerpo presentan una estructura llamada estilete (Figura 3), la cual funciona como una aguja microscópica capaz de perforar los tejidos vegetales para obtener nutrientes de raíces, tallos, hojas, flores y semillas (Tytgat *et al.*, 2000; Parrado & Quintanilla, 2024; Chen *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2024).

Los nemátodos fitoparásitos presentan diferentes formas de alimentarse. Algunos penetran la raíz y permanecen sin moverse dentro de ella (endoparásitos sedentarios) como los del género *Meloidogyne* Göldi, 1887. Otros también ingresan a la planta, pero se desplazan dentro de sus tejidos (endoparásitos migratorios) como *Pratylenchus* Filipjev, 1936. También existen nemátodos que solo introducen la parte anterior de su cuerpo en la planta (semiendoparásitos), como *Tylenchulus* Cobb, 1913, y aquellos que únicamente se alimentan desde la parte externa de las raíces (ectoparásitos) (Palomares-Rius *et al.*, 2017).

En este contexto, el objetivo de esta minirrevisión fue integrar información sobre la biología, los daños y la importancia agrícola de los nemátodos fitoparásitos, con énfasis en el género *Meloidogyne* y su relevancia en cultivos hortícolas de Sinaloa, México. Asimismo, se revisaron los principales factores ambientales que favorecen su establecimiento y reproducción, así como las estrategias actualmente disponibles para su manejo, destacando aquellas orientadas hacia una producción agrícola más sustentable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo corresponde a una minirrevisión narrativa de la literatura científica relacionada con los nemátodos fitoparásitos y su importancia en los sistemas agrícolas. La búsqueda de información se realizó en Scopus, Web of Science, Google Scholar y PubMed, mediante palabras clave en español e inglés combinadas con los operadores booleanos AND, OR y NOT, con el propósito de ampliar o restringir los resultados.

Las cadenas de búsqueda se construyeron combinando

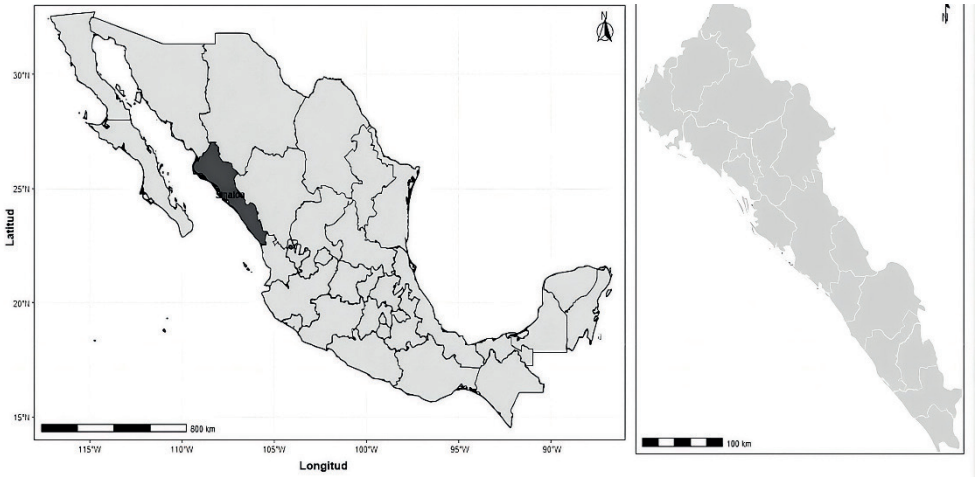


Figura 1. Ubicación geográfica: Sinaloa, México. A) corresponde al territorio nacional y B) al estado de Sinaloa.

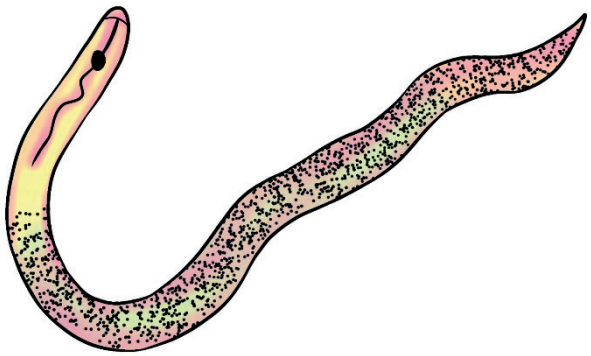


Figura 2. Representación general de un nemátodo fitoparásito mostrando su forma alargada y cilíndrica característica. Estos organismos microscópicos habitan en el suelo y algunas especies pueden infectar raíces, tallos y otros tejidos vegetales.

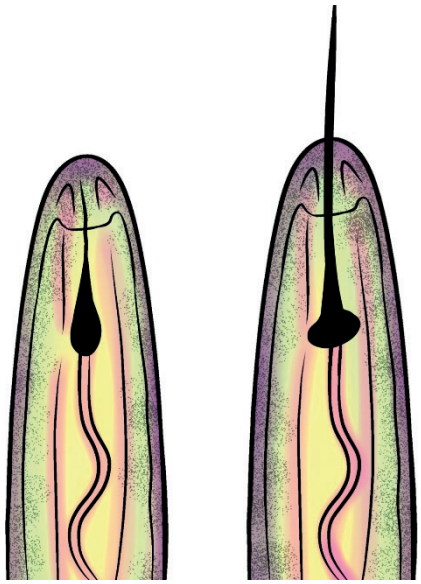


Figura 3. Representación general de un nemátodo fitoparásito mostrando su forma alargada y cilíndrica característica. Estos organismos microscópicos habitan en el suelo y algunas especies pueden infectar raíces, tallos y otros tejidos vegetales.

términos relacionados con diferentes ejes temáticos como nemátodos fitoparásitos, cultivos agrícolas, daños, factores ambientales y estrategias de manejo. Entre las principales combinaciones utilizadas se incluyeron: ("plant-parasitic nematodes" OR "phytoparasitic nematodes") AND agriculture, ("plant-parasitic nematodes" OR "root-knot nematodes") AND crop damage, (*Meloidogyne* OR "root-knot nematodes") AND (tomato OR pepper OR cucumber OR eggplant), (*Meloidogyne* AND Mexico) OR (*Meloidogyne* AND Sinaloa), ("plant-parasitic nematodes" AND "environmental factors") AND (temperature OR soil moisture), (*Meloidogyne* AND management) AND ("biological control" OR "crop rotation" OR solarization OR resistant varieties), ("plant-parasitic nematodes" AND agriculture) NOT ("animal parasites" OR "human parasites").

Los operadores OR se utilizaron para incorporar términos relacionados, AND para restringir la búsqueda a documentos que incluyeran simultáneamente los conceptos de interés y NOT para excluir trabajos no relacionados con nemátodos fitoparásitos de importancia agrícola.

Se priorizaron los artículos científicos recientes y directamente relacionados con la biología, mecanismos de infección, daños a los cultivos, importancia económica, relación hospedero-parásito y alternativas de manejo. También se conservaron publicaciones anteriores cuando aportaban información valiosa sobre la biología de los organismos o antecedentes específicos para Sinaloa y México. Se excluyeron documentos que no abordaban temas relacionados con los nemátodos fitoparásitos, sistemas agrícolas y publicaciones cuya información no contribuyera directamente al objetivo de la revisión. A partir de esta información se realizó una síntesis narrativa de la literatura disponible.

Aspectos éticos: El presente trabajo se planteó exclusivamente a partir de la información disponible en publicaciones científicas y otras fuentes académicas. Debido a que no se realizaron experimentos con seres humanos, animales o plantas, ni se efectuó la colecta de organismos, muestras biológicas o datos personales, no fue necesaria la aprobación de un comité de ética o bioética.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuando las raíces se enferman

En su mayoría, el ataque de los nemátodos es silencioso ya que los signos que presentan las plantas suelen confundirse con deficiencias de nutrientes o problemas de riego, por lo que pocas veces se atribuyen a infecciones por estos organismos microscópicos (Palomares-Rius *et al.*, 2017; Pulavarty *et al.*, 2021).

Los signos más visibles son aquellos que se manifiestan en la parte aérea de la planta como clorosis, marchitez y crecimiento reducido. Sin embargo, el daño más importante ocurre bajo tierra, donde los nemátodos pueden provocar que las raíces sean más pequeñas, se ramifiquen y adquieran una apariencia "barbuda". En algunos casos también forman agallas y malformaciones que reducen la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes, afectando seriamente su desarrollo (Tapia-Vázquez *et al.*, 2022). Además, los nematodos fitoparásitos pueden interactuar con otros fitopatógenos, como hongos y bacterias, formando complejos de enfermedad en los que las lesiones ocasionadas durante la infección pueden facilitar la entrada o el establecimiento de otros microorganismos. Asimismo, algunas especies de nematodos ectoparásitos, principalmente de las familias Longidoridae y Trichodoridae, pueden actuar como vectores de virus fitopatógenos entre plantas (Topalović & Geisen, 2023).

En conjunto, estos daños deterioran silenciosamente la salud de los cultivos y reducen su rendimiento. Aunque en muchas ocasiones las plantas logran sobrevivir, su crecimiento lento y la mala calidad de sus productos terminan afectando directamente la producción agrícola (Sikora *et al.*, 2023).

Lo realmente desalentador es que el problema no solo se queda en los campos de cultivo, sino que también impacta directamente el bolsillo del agricultor. Según la Sociedad Americana de Fitopatología, se estima que los nemátodos fitoparásitos provocan pérdidas cercanas a los 173 mil millones de dólares anuales en la agricultura mundial, resaltando la necesidad de implementar estrategias eficientes para su manejo (Mesa-Valle *et al.*, 2020).

A estas problemáticas se suman las pérdidas derivadas de la disminución en la calidad comercial de los productos agrícolas. En zanahoria, la infección por *Meloidogyne* spp. puede provocar deformaciones, bifurcaciones y reducción del tamaño de la raíz, disminuyendo su valor comercial (Hodson *et al.*, 2023). En papa, especies como *Meloidogyne chitwoodi* Golden, O'Bannon, Santo, & Finley, 1980 afectan la calidad de los tubérculos y pueden ocasionar que estos no cumplan con los criterios establecidos para su procesamiento o comercialización (Teklu *et al.*, 2023). Estas afectaciones no solo impactan la producción en términos de volumen, sino también el valor comercial de los cultivos y, en consecuencia, las pérdidas económicas para los productores.

Bajo tierra sinaloense

El estado de Sinaloa es conocido como el "Granero de México" debido a su alta producción agrícola (Bojórquez-Camacho & Bruno-Fiscal, 2016). Dentro de las hortalizas más importantes para esta región, destacan los cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), chile (*Capsicum annuum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y berenjena (*Solanum melongena* L.) debido a su elevado valor de producción (Carrillo-Fasio *et al.*, 2000).

Sin embargo, esta gran potencia agrícola enfrenta un enemigo microscópico capaz de afectar seriamente la productividad de los cultivos: los nemátodos del género *Meloidogyne,* conocidos comúnmente como nemátodos "agalladores" (Tapia-Vázquez *et al.*, 2022). Este grupo de nemátodos ocupa el primer lugar de importancia agrícola tanto a nivel mundial como en México debido a los daños que ocasiona en diferentes cultivos, afectando principalmente plantas de alto valor económico como la soya, cereales, tomate, papa y otros tubérculos en sistemas de invernadero como de campo abierto (Tapia-Vázquez *et al.*, 2022).

En un estudio realizado por Carrillo-Fasio *et al.* (2000) se analizó la distribución de las especies de este grupo de nemátodos en áreas hortícolas de chile, tomate, pepino y berenjena en localidades de varias comunidades del estado mexicano de Sinaloa como Guasave, Navolato, Culiacán, Elota y El Rosario, encontrando incidencia en todos los sitios muestreados. Específicamente en Escuinapa, estos nemátodos han sido reportados principalmente en cultivos de chile y tomate (Martínez-Gallardo *et al.*, 2019; Carrillo-Fasio *et al.*, 2021).

Particularmente, este parásito recibe el nombre de "agallador" debido a su capacidad de formar agallas en las raíces de sus plantas, afectando significativamente la absorción y el transporte de agua y nutrientes hacia la planta hospedera (Habteweld *et al.*, 2024). Los signos visibles en las plantas infectadas van desde clorosis, marchitez y flacidez hasta la muerte de la planta (Carrillo-Fasio *et al.*, 2026). Las deformaciones producidas en las raíces dificultan que las plantas absorban adecuadamente el agua y los nutrientes del suelo, debilitando su crecimiento y disminuyendo la producción agrícola.

Una de las razones por las que este nemátodo resulta tan problemático es su capacidad de reproducirse rápidamente. El proceso de infección inicia cuando los juveniles infectivos de segundo estadio (J2), presentes en el suelo, penetran las raíces de las plantas y migran hacia el tejido vascular, donde establecen sitios de alimentación que inducen la formación de las agallas características (Goode & Mitchum, 2022). A partir de ahí, el nemátodo pasa por varias etapas de desarrollo dentro de la raíz hasta convertirse en adulto, proceso que puede completarse en tan solo 25 a 30 días. Las hembras adquieren una forma globosa con la capacidad de depositar alrededor de 500 huevos en una masa gelatinosa que ellas mismas producen, la cual sirve como barrera protectora de los huevos ante microorganismos del suelo (Khan *et al.*, 2023ab; de Brum *et al.*, 2025). Con el tiempo, las nuevas larvas emergen, migran en el suelo y reinician el ciclo de infección, lo que permite que las poblaciones crezcan rápidamente y mantengan una presión constante sobre los cultivos (Figura 4) (Tapia-Vázquez *et al.*, 2022).

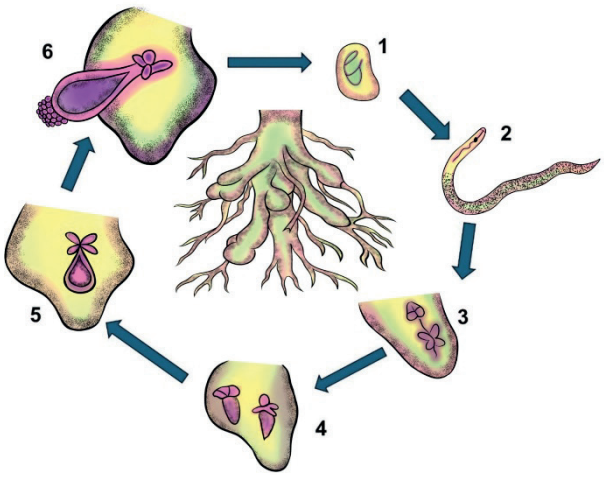


Figura 4. Esquema general del ciclo de vida de los nemátodos agalladores (*Meloidogyne* spp.) en las raíces de las plantas. 1) Huevo, 2) larva infestiva presente en el suelo, 3–5) desarrollo y establecimiento del nemátodo dentro de la raíz, y 6) hembra adulta formando masas de huevos en el tejido vegetal. Las infecciones ocasionan deformaciones y agallas en las raíces, lo que afecta la absorción de agua y nutrientes.

El ambiente que los favorece y cómo detenerlos

Aunque no se vean, los nemátodos no aparecen de la nada; su éxito depende de diversas condiciones ambientales del suelo y del cultivo. Factores como la presencia previa de nemátodos en el terreno, por ejemplo, en parcelas infestadas por ciclos agrícolas anteriores, la susceptibilidad de la planta hospedera y especialmente la temperatura del suelo determinan si una infección puede establecerse exitosamente o no. Cuando las condiciones son favorables, particularmente en suelos cálidos, los nemátodos pueden completar rápidamente su ciclo de vida y aumentar considerablemente sus poblaciones. Por el contrario, cuando la temperatura del suelo disminuye, su actividad y reproducción se reducen notablemente (Carrillo-Fasio *et al.*, 2026). La humedad del suelo y la presencia constante de cultivos susceptibles también favorecen la permanencia y dispersión de estos organismos en los campos agrícolas (Khan *et al.*, 2023ab).

Una vez que los nemátodos aparecen en los campos agrícolas, las opciones de manejo suelen enfocarse principalmente en disminuir sus poblaciones y reducir el daño ocasionado a las plantas. Tradicionalmente, este problema se ha combatido mediante productos químicos, fumigantes del suelo y nematicidas (Vashisth *et al.*, 2024). Sin embargo, el uso continuo de estos productos puede generar importantes consecuencias ambientales, como la contaminación del suelo y del agua, además de afectar negativamente la biodiversidad al eliminar microorganismos e insectos benéficos para los cultivos. Debido a estos impactos, en muchos países se han establecido regulaciones más estrictas para limitar el uso de ciertos nematicidas químicos. Por ello, actualmente existe un creciente interés en promover alternativas más sustentables que reduzcan la dependencia de agroquímicos (Pan *et al.*, 2026). Entre estas estrategias destacan la rotación de cultivos, el uso de variedades resistentes, la solarización del suelo y el empleo de microorganismos benéficos capaces de actuar como control biológico (Tapia-Vázquez *et al.*, 2022).

En un contexto donde la producción de alimentos debe ser cada vez más eficiente y respetuosa con el medio ambiente, comprender el papel de los nemátodos y aprender a manejarlos de manera responsable se vuelve fundamental. Después de todo, lo que ocurre bajo tierra puede definir el futuro de nuestras cosechas.

Los nemátodos fitoparásitos representan uno de los problemas más importantes y silenciosos para la agricultura moderna debido a su capacidad de afectar el desarrollo de las plantas desde el suelo, dificultando su detección temprana (Pun *et al.*, 2024). A diferencia de otras plagas visibles, estos organismos microscópicos dañan principalmente las raíces, reduciendo la absorción de agua y nutrientes y debilitando gradualmente a los cultivos. Como consecuencia, las plantas presentan signos que suelen confundirse con deficiencias nutricionales o estrés hídrico, retrasando la implementación de medidas de control (Palomares-Rius *et al.*, 2017).

Entre los nemátodos fitoparásitos, las especies del género *Meloidogyne* destacan por su amplia distribución y por las importantes pérdidas económicas que ocasionan en diversos cultivos agrícolas (Swaruparani & Shanmugam, 2024). La formación de agallas en las raíces altera el funcionamiento normal de las plantas y favorece infecciones secundarias por hongos, bacterias y otros patógenos oportunistas. Este efecto combinado incrementa el deterioro de los cultivos y afecta tanto la producción como la calidad comercial de los alimentos (Vashisth *et al.*, 2024).

En regiones agrícolas como Sinaloa, donde predominan cultivos hortícolas de alto valor económico, las condiciones ambientales favorecen el desarrollo y reproducción de estos organismos. Factores como las altas temperaturas del suelo, la humedad y la continuidad de cultivos susceptibles facilitan que las poblaciones de nemátodos aumenten rápidamente y permanezcan en los terrenos agrícolas durante varios ciclos productivos. Esto explica por qué los nemátodos agalladores continúan siendo considerados una de las principales amenazas fitosanitarias para la agricultura en México (Carrillo-Fasio *et al.*, 2000; Carrillo-Fasio *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, el manejo de estos parásitos se ha basado en el uso de productos químicos y fumigantes del suelo. Sin embargo, el impacto ambiental asociado al uso excesivo de nematicidas ha impulsado la búsqueda de alternativas más sustentables (Fan *et al.*, 2023). Actualmente, estrategias como la rotación de cultivos, el uso de variedades resistentes y el control biológico mediante microorganismos benéficos representan opciones prometedoras para disminuir las poblaciones de nemátodos sin afectar gravemente al ambiente (Palomares-Rius *et al.*, 2017).

Finalmente, comprender la biología, ecología y formas de dispersión de los nemátodos fitoparásitos resulta fundamental para desarrollar sistemas agrícolas más sostenibles. Aunque son invisibles para el ojo humano, sus efectos pueden determinar el éxito o fracaso de una cosecha, demostrando que gran parte de la salud de los cultivos depende de los procesos que ocurren silenciosamente bajo tierra.

Aunque no se vean a simple vista, los nemátodos fitoparásitos representan una de las amenazas más importantes para la agricultura en México y en el mundo, afectando silenciosamente la salud de los cultivos y la productividad agrícola en regiones clave como Sinaloa. Su capacidad

para pasar desapercibido y multiplicarse rápidamente bajo condiciones favorables los convierte en un reto constante para los productores agrícolas. Bajo este escenario, el manejo adecuado de estos organismos no solo implica reducir sus poblaciones, sino también comprender cuáles son los factores que favorecen su desarrollo y promover estrategias de manejo más sustentables. En un contexto donde la producción de alimentos debe ser cada vez más eficiente y respetuosa con el medio ambiente, lo que ocurre bajo tierra cobra una importancia fundamental, pues de ello depende, en gran medida, el éxito de nuestras cosechas. Comprender el papel de estos organismos microscópicos permitirá desarrollar prácticas agrícolas más sostenibles y contribuir a la protección de la seguridad alimentaria en el futuro.

Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

JMOC = Juan Manuel Osuna-Cabanillas
CBF = Carlos Bruno-Fiscal
DIR = Diana Ibarra-Rodríguez
EAAN = Eugenio Alberto Aragón-Noriega
JZBD = Jennifer Zoe Borrego-Durán
MARS = María Amparo Rodríguez Santiago

Conceptualization: JMOC, MARS
Data curation: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN
Formal Analysis: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN
Funding acquisition: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN
Investigation: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN
Methodology: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF
Project administration: JMOC, MARS, DIR
Resources: JMOC, MARS, DIR
Software: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN
Supervision: JMOC, MARS, DIR
Validation: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN
Visualization: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN
Writing – original draft: JMOC, MARS
Writing – review & editing: JMOC, MARS, DIR, JZBD, CBF, EAAN

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arseneault, H., Lynch, D. H., Nyiraneza, J., Stiles, K., Mills, A., & Fraser, T. (2024). Soil nematode communities differ across long-term land-use intensities in relation to soil physical, chemical, and biological parameters. *Canadian Journal of Soil Science*, *104*, 482–495.

Bojórquez-Camacho, H., & Bruno-Fiscal, C. (2016). *La paradoja de la economía sinaloense en la globalización: Inseguridad alimentaria en el granero de México, 1994–2014*. CONACYT.

Carrillo-Fasio, J. A., Estrada, R. S. G., Molar, R. A., Zequera, I. M., & Ortega, J. E. C. (2000). Identificación y distribución de especies del nematodo nodulador (*Meloidogyne* spp.) en hortalizas, en Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, *18*, 115–119.

Carrillo-Fasio, J. A., Angúlo-Castro, A., Martínez-Gallardo, J. Á., Ayala-Tafoya, F., Yáñez-Juárez, M. G., & Retes-Manjarrez, J. E. (2021). Distribution and incidence of root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) on pepper in Sinaloa, Mexico. *Tropical Plant Pathology*, *46*, 195–200.

Carrillo-Fasio, J. A., Báez-Sañudo, M. A., & Valdez-Morales, M. T. (2026). Estrategias biorracionales para el manejo de *Meloidogyne enterolobii* y *Rotylenchulus reniformis* en tomate, chile y pepino en Sinaloa, México. *Revista Bioc Scientia*, *2,* 1-14.

Chen, X., Li, F., Wang, D., & Cai, L. (2024). Insights into the plant response to nematode invasion and modulation of host defense by plant parasitic nematode. *Frontiers in Microbiology*, *15*, 1482789.

de Brum, D., Campos, V. P., Terra, W. C., de Paula, L. L., Taketani, R. G., Kavamura, V. N., de Sousa Melo, D., Pylro, V. S., de Carvalho, T. S., & Martins, S. (2025). Bacterial composition of *Meloidogyne exigua* egg masses from symptomatic and asymptomatic coffee plants. *Phytobiomes Journal*, *9*, 459–467.

Fan, Z., Wang, L., Qin, Y., & Li, P. (2023). Activity of chitin/chitosan/chitosan oligosaccharide against plant pathogenic nematodes and potential modes of application in agriculture: A review. *Carbohydrate Polymers*, *306*, 120592.

Goode, K., & Mitchum, M. G. (2022). Pattern-triggered immunity against root-knot nematode infection: A minireview. *Physiologia Plantarum*, *174*, e13680.

Habteweld, A., Kantor, M., Kantor, C., & Handoo, Z. (2024). Understanding the dynamic interactions of root-knot nematodes and their host: Role of plant growth promoting bacteria and abiotic factors. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1377453.

Hasan, M. S., Lin, C.-J., Marhavy, P., Kyndt, T., & Siddique, S. (2024). Redox signalling in plant–

nematode interactions: Insights into molecular crosstalk and defense mechanisms. *Plant, Cell & Environment*, *47*, 2811–2820.

Hodson, A. K., Celayir, T., & Quiroz Alonso, A. (2023). A real-time PCR assay to detect and quantify root-knot nematodes from soil extracts. *Plant Disease*, *107*, 2169–2176.

Kantor, C. K., Eisenback, J. D., & Kantor, M. (2024). Biosecurity risks to human food supply associated with plant-parasitic nematodes. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1404335.

Khan, A., Chen, S., Fatima, S., Ahamad, L., & Siddiqui, M. A. (2023a). Biotechnological tools to elucidate the mechanism of plant and nematode interactions. *Plants*, *12*, 2387.

Khan, A., Haris, M., Hussain, T., Khan, A. A., Laasli, S. E., Lahlali, R., & Mokrini, F. (2023b). Counter-attack of biocontrol agents: Environmentally benign approaches against root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) on agricultural crops. *Heliyon*, *9*, e21653.

Martínez-Gallardo, J. Á., Díaz-Valdés, T., Allende-Molar, R., Retes-Manjarrez, J. E., & Carrillo-Fasio, J. A. (2019). Identificación y distribución de *Meloidogyne* spp. en tomate de Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *10*, 453–459.

Mesa-Valle, C. M., Garrido-Cardenas, J. A., Cebrian-Carmona, J., Talavera, M., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). Global research on plant nematodes. *Agronomy*, *10*, 1148.

Palomares-Rius, J. E., Escobar, C., Cabrera, J., Vovlas, A., & Castillo, P. (2017). Anatomical alterations in plant tissues induced by plant-parasitic nematodes. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1987.

Pan, X., Yildiz, U., Armstrong, S. K., & Bissonnette, K. (2026). Status and advancement of root-knot nematode management strategies and the emerging CRISPR/Cas biotechnology application. *Functional & Integrative Genomics*, *26*, 38.

Parrado, L. M., & Quintanilla, M. (2024). Plant-parasitic nematode disease complexes as overlooked challenges to crop production. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1439951.

Pulavarty, A., Egan, A., Karpinska, A., Horgan, K., & Kakouli-Duarte, T. (2021). Plant parasitic nematodes: A review on their behaviour, host interaction, management approaches and their occurrence in two sites in the Republic of Ireland. *Plants*, *10*, 2352.

Pun, T. B., Thapa Magar, R., Koech, R., Owen, K. J., & Adorada, D. L. (2024). Emerging trends and technologies used for the identification, detection, and characterisation of plant-parasitic nematode infestation in crops. *Plants*, *13*, 3041.

Sikora, R. A., Helder, J., Molendijk, L. P. G., Desaeger, 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*, 209–230.

Singh, A. K., Das, A., Kumar, K., Joshi, I., Kumar, M., Kohli, D., Koulagi, R., Kumar, A., Gaikwad, K., Jain, P. K., & Sirohi, A. (2024). Unveiling the draft genome of the seed gall nematode, *Anguina tritici*: Insights and analysis. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *133*, 102330.

Swaruparani, N., & Shanmugam, H. (2024). Molecular mechanisms and phytomolecules as source of resistance for sustainable management of root knot nematode infestations in horticultural crops: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *133*, 102354.

Tapia-Vázquez, I., Montoya-Martínez, A. C., De los Santos-Villalobos, S., Ek-Ramos, M. J., Montesinos-Matías, R., & Martínez-Anaya, C. (2022). Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) a threat to agriculture in Mexico: Biology, current control strategies, and perspectives. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *38*, 26.

Teklu, M. G., Schomaker, C. H., Been, T. H., & Molendijk, L. P. G. (2023). Tuber yield, quality and infestation levels of potato genotypes, resistant to the root-knot nematode, *Meloidogyne chitwoodii*. *Potato Research*, *66*, 105–135.

Topalović, O., & Geisen, S. (2023). Nematodes as suppressors and facilitators of plant performance. *New Phytologist*, *238*, 2305–2312.

Tytgat, T., De Meutter, J., Gheysen, G., & Coomans, A. (2000). Sedentary endoparasitic nematodes as a model for other plant parasitic nematodes. *Nematology*, *2*, 113–121.

Vashisth, S., Kumar, P., Chandel, V. G. S., Kumar, R., Verma, S. C., & Chandel, R. S. (2024). Unraveling the enigma of root-knot nematodes: From origins to advanced management strategies in agriculture. *Planta*, *260*, 36.

Received July 9, 2026.

Accepted September 17, 2026.

Published online September 21, 2026.