

Nemátodos entomopatógenos: perspectivas, desafíos y oportunidades para la integración de nanopartículas

Entomopathogenic nematodes: perspectives, challenges and opportunities for the integration of nanoparticles

C.I. Cortés-Martínez^a, C. Hernández-Ramírez^a, R. Román-Doval^a, M.B. Ávila-López^b.

^a Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etla, 68230, Santiago Suchilquitongo, Oaxaca, México.

^b Centro de Innovación y Desarrollo Apícola Sustentable de Quintana Roo, Universidad Intercultural Maya de Quintana Roo (UIMQROO-SECIHTI), José María Morelos 77890, México.

Resumen

Los nemátodos entomopatógenos (NEP) de los géneros *Steinernema* y *Heterorhabditis* constituyen una alternativa eficaz y ambientalmente segura para el control biológico de insectos plaga en la agricultura. No obstante, su aplicación en campo enfrenta limitaciones asociadas a la radiación ultravioleta, la desecación y la reducción de su viabilidad y patogenicidad. En este contexto, la integración de nanopartículas (NP) en formulaciones de NEP emerge como una estrategia innovadora para mejorar su estabilidad, vida de anaquel y eficacia biológica. Este trabajo revisa los avances científicos recientes sobre la combinación de NEP con NP metálicas, destacando sus beneficios potenciales, mecanismos de acción, biocompatibilidad, riesgos ambientales y desafíos regulatorios. Asimismo, se revisan distintas estrategias de formulación, como suspensiones, encapsulación y polvos secos, así como estudios que evidencian efectos sinérgicos en el control de plagas. Finalmente, se discuten las perspectivas tecnológicas y científicas de estas formulaciones bio-nano como bioinsumos clave para una agricultura más efectiva y sostenible.

Palabras Clave: Bioinsecticidas, Control biológico, Coadyuvantes, Nanomateriales, Tecnología de formulación.

Abstract

Entomopathogenic nematodes (EPNs) of the genera *Steinernema* and *Heterorhabditis* represent an effective and environmentally safe alternative for the biological control of insect pests in agriculture. However, their application in the field faces limitations related to ultraviolet radiation, desiccation, and reduction of their viability and pathogenicity. In this context, the integration of nanoparticles (NPs) into EPN formulations emerges as an innovative strategy to improve their stability, shelf life, and biological efficacy. This work reviews recent scientific advances on the combination of EPNs with metallic NPs, highlighting their potential benefits, mechanisms of action, biocompatibility, environmental risks, and regulatory challenges. Different formulation strategies, such as suspensions, encapsulation, and dry powders, are also reviewed, as well as studies that demonstrate synergistic effects in pest control. Finally, the technological and scientific perspectives of these bio-nano formulations are discussed as key bioinputs for a more effective and sustainable agriculture.

Keywords: Biopesticides, Biological Control, Coadjuvants, Formulation Technology, Nanomaterials.

1. Introducción

Para alimentar de manera sostenible a una población que se proyecta alcanzar aproximadamente diez mil millones de personas en 2050, se estima que la producción agrícola global deberá incrementarse al menos un 60% (GEO, 2020). Este aumento implica lograr una mayor eficiencia productiva y optimizar la protección vegetal frente a factores bióticos que

limitan el rendimiento, como insectos plaga, enfermedades y malezas.

Tradicionalmente, la agricultura comercial ha recurrido al uso intensivo de plaguicidas químicos para mejorar las cosechas, especialmente cuando se combina con una adecuada gestión de la nutrición y el riego. Sin embargo, el desarrollo de resistencia de los insectos plaga a los compuestos sintéticos, junto con los elevados costos asociados al

*Autor para la correspondencia: carlos.cm@itvalletla.edu.mx

Correo electrónico: carlos.cm@itvalletla.edu.mx (Carlos Inocencio Cortés-Martínez), cecilia.rh@itvalletla.edu.mx (Cecilia Hernández-Ramírez), ramon.rd@itvalletla.edu.mx (Ramón Román-Doval), mariana.avila@secihtl.mx (Mariana Beatriz Ávila-López).

Historial del manuscrito: recibido el 14/01/2026, última versión-revisada recibida el 24/06/2026, aceptado el 03/07/2026, en línea (postprint) desde el 07/07/2026, publicado el 05/01/2027. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v14i28.16895>



desarrollo, registro y regulación de estos productos, ha reducido su viabilidad ambiental y económica (Hawkins *et al.*, 2019).

A ello se suman los efectos adversos sobre la salud humana, la fauna benéfica y los ecosistemas, lo que genera una presión creciente por encontrar alternativas más seguras y sostenibles para proteger los cultivos y reducir su huella ambiental, lo que exige una transformación profunda de dichas prácticas y de las tecnologías de síntesis química (Mesa & Esparcia, 2023).

En respuesta a estos retos, las prácticas agroecológicas son una alternativa viable para contribuir a la autosuficiencia alimentaria de manera sostenible, especialmente en cultivos estratégicos como los granos básicos (Naciones Unidas, 2015). Estas prácticas promueven el uso de insumos biológicos de bajo impacto ambiental y seguros para la salud humana y animal, lo que favorece la transición hacia sistemas agrícolas más resilientes (Vermeire *et al.*, 2024).

Entre los insumos biológicos más prometedores para el control de plagas agrícolas destacan los nemátodos entomopatógenos (NEP) de los géneros *Steinernema* y *Heterorhabditis*, cuya aplicación exitosa en cultivos ha sido ampliamente documentada y en la que, sin embargo, la invención de insumos está poco desarrollada (Cortés-Martínez *et al.*, 2025).

El desarrollo y comercialización de bioinsumos a base de NEP es técnicamente factible, si se superan ciertos desafíos, tales como la selección de cepas altamente virulentas o el mejoramiento de su patogenicidad, la producción industrial de juveniles infectivos (JI) a bajo costo y la conservación de su eficacia en condiciones de campo (Cortés-Martínez & Chavarría-Hernández, 2020).

Frente a esta desventaja competitiva que representan los insecticidas químicos, surge una línea de investigación que explora el uso de nanomateriales que, integrados en formulaciones, protegerán a los NEP de la radiación UV, coadyuvando así al mejoramiento de la vida de anaquel y la eficacia sobre los insectos en el campo de cultivo.

2. Desarrollo

2.1. Los nemátodos entomopatógenos como agentes de control biológico

Los NEP son parásitos obligados de insectos, pertenecen al filo Nematoda y dentro de estos destacan géneros como *Steinernema* y *Heterorhabditis* como agentes de control biológico (Kaya & Gaugler, 1993; Tarasco *et al.*, 2023). Su cuerpo es blando, alargado (Figura 1) y no segmentado; están adaptados a la vida en el suelo, con la capacidad de desplazarse y localizar insectos hospedadores gracias a sus estructuras sensoriales altamente desarrolladas que les permiten responder a gradientes químicos, detección de CO₂, vibraciones u otros estímulos físicos (Griffin *et al.*, 2005). En el suelo, contribuyen a la supresión de especies plaga o invasoras de los ecosistemas.

Morfológicamente, su estructura les permite penetrar al insecto a través de aberturas naturales (espiráculos, boca, ano) o incluso perforando la cutícula, para luego liberar sus bacterias simbióticas patógenas en el interior del huésped (Campos-Herrera, 2015). Estas características, sumadas a la alta especificidad, seguridad ambiental y posibilidad de

producción masiva mediante cultivos *in vivo* e *in vitro* (Chandrakasan, 2024), les otorgan cualidades para ser aprovechados como agentes de control biológico de insectos plagas de múltiples órdenes y familias, siendo considerados seguros para humanos y animales, al estar aprobados para su uso en agricultura orgánica de diversos países, particularmente contra plagas como coleópteros y lepidópteros (Ejaj *et al.*, 2023; Zelaya-Molina *et al.*, 2022).



Figura 1. Vista de un nemátodo juvenil infectivo *Steinernema glaseri*.

En campo, se han aplicado con éxito en el control de plagas en fases larvarias o pupales en el suelo o cerca del mismo mediante liberaciones masivas en el campo para incrementar la población natural de estos enemigos biológicos de las plagas (Sáenz, 2005). Los NEP se usan en programas de Manejo Integrado de Plagas (MIP), aprovechando su compatibilidad con muchos productos agrícolas y mediante sistemas convencionales de aplicación (Romero, 2004; Yangüez *et al.*, 2024).

2.2. Las nanopartículas metálicas en la agricultura

Las nanopartículas (NP) son materiales con dimensiones comprendidas entre 1 y 100 nanómetros que presentan una relación superficie-volumen elevada, lo que les confiere propiedades físicas y químicas únicas que no se observan en materiales más grandes. En la agricultura, se han abierto nuevas posibilidades para mejorar la eficacia de los agentes de control biológico con la adición de NP como un material coadyuvante en productos biológicos formulados.

Por su capacidad para absorber y dispersar la radiación UV, y su acción antimicrobiana, se han explorado como nanofertilizantes, nanopesticidas, transportadores de pesticidas o inductores de defensas en plantas (Auffan *et al.*, 2009; Athanassiou *et al.*, 2018; Abd-Elsalam, 2021). También, se han explorado las NP de ZnO, CuO y Ag, así como NP de origen biopolimérico como quitosano y lignina, principalmente para mejorar la estabilidad de los bioinsecticidas y los fertilizantes (Kah *et al.*, 2019; Pérez-de-Luque, 2017; Pérez-Hernández *et al.*, 2024). Entre las aplicaciones más prometedoras figuran las NP metálicas (por ejemplo, de Ag, CuO, óxidos metálicos) utilizadas como nanoplaguicidas / nano-nematicidas para el control de plagas y nemátodos fitoparásitos (Le Pioufle *et al.*, 2024).

En particular, por su alta relación superficie/volumen, reactividad, posibilidad de funcionalización y capacidad de penetración, las NP metálicas son de interés para el desarrollo de formulaciones de bioinsecticidas de liberación controlada, con menor dosis del ingrediente activo, de mayor eficiencia, menor impacto ambiental, menor lixiviación al suelo o agua y mejores entregas de los compuestos bioactivos (Ayobami & Abimbola, 2025).

2.3. Beneficios potenciales de las NP sobre los NEP

Estudios han demostrado que la exposición a la luz solar, en particular a la radiación UV-B, puede provocar daños significativos en los JI de los NEP, afectando sus membranas celulares, desnaturalizando proteínas claves y causando daño directo al ADN, lo que reduce drásticamente su viabilidad y capacidad infectiva en ambientes abiertos (Gaugler *et al.*, 1992; Shapiro-Ilan *et al.*, 2006). La estrategia para reducir su impacto es la aplicación en momentos específicos del día, como la mañana, al atardecer o sobre entornos protegidos, como el suelo (Shapiro-Ilan *et al.*, 2006); no obstante, limita su aplicación contra plagas que habitan en la superficie (Figura 2).



Figura 2. Cultivo conjunto de maíz y frijol en una parcela de la población de San Pablo Huitzo, Etla, Oaxaca.

Las NP de óxido de zinc (OZn), óxido de titanio (TiO₂), plata (Ag) y oro (Au) son especialmente útiles en formulaciones para el control biológico, gracias a su capacidad de absorber radiación UV, actuar como barreras físicas y proteger agentes biológicos sensibles como los NEP.

Estudios recientes han confirmado que la combinación de NEP con NP, particularmente aquellas funcionalizadas como el TiO₂ NH₂, puede mejorar significativamente su viabilidad y eficacia al protegerlos de la radiación UV, reduciendo su desecación y contribuyendo a su supervivencia sin afectar su virulencia (Wu *et al.*, 2023; Kotliarevski *et al.*, 2022). Algunos autores proponen el uso de NP biodegradables, como nanoquitosano, para proteger a los nemátodos de condiciones ambientales adversas y mejorar su eficacia (de Oliveira *et al.*, 2021).

Gracias a las propiedades de las NP (tamaño, superficie, funcionalización), es posible diseñar “nanoformulaciones inteligentes” que liberen su carga (por ejemplo, bacterias simbiotes, moléculas bioactivas, estabilizantes) en respuestas controladas al medio, lo que permitiría adaptar tratamientos a condiciones específicas de cultivo, tipo de plaga, etapa del nemátodo, entre otros (Atanda *et al.*, 2025).

Al mejorar la eficiencia del control biológico con NEP y NP, podría reducirse la dependencia de nematicidas y plaguicidas químicos convencionales, lo que implica menor toxicidad, menos residuos, menor contaminación del suelo/agua y menor riesgo para la salud humana. Por otro lado, revisiones recientes en nanotecnología agrícola señalan que el uso de NP en el control de plagas y enfermedades puede reducir en gran medida el uso de químicos, mejorar rendimiento y disminuir residuos contaminantes, lo que las convierte en candidatas ideales para integrarse con agentes biológicos como NEP (Tarasco *et al.*, 2023).

2.4. Biocompatibilidad

Para que una NP pueda combinarse con NEP sin afectar su viabilidad, debe ser biodegradable, estable en condiciones de suelo y no interferir con las bacterias simbióticas, ni con la movilidad y comportamiento de búsqueda del JI (Campos-Herrera, 2015; Lacey *et al.*, 2015). Esta biocompatibilidad también requiere que las NP no se acumulen de manera persistente en el suelo, evitando impactos negativos sobre la microbiota del suelo y otros organismos benéficos. Por lo tanto, su uso en agricultura y en combinación con organismos vivos debe evaluarse cuidadosamente. Revisiones sobre nanomateriales agrícolas señalan que sus efectos beneficiosos dependen de su compatibilidad biológica y del tamaño, dosis y método de aplicación (Navarro *et al.*, 2024).

La alta reactividad de NP por su gran relación superficie/volumen puede afectar la capacidad de transmisión de bacterias simbióticas a los hospederos (Pérez-Hernández *et al.*, 2024), generar efectos sobre organismos no objetivo, afectar microbiota del suelo, provocar estrés oxidativo, bioacumulación o toxicidad a largo plazo, si no se manejan adecuadamente (Vázquez-Núñez, 2023).

La literatura tecnocientífica sobre la combinación de NEP y NP en aplicaciones de control biológico aún es nueva; sin embargo, evidencias recientes sugieren sinergias prometedoras que abren la posibilidad de desarrollar estrategias combinadas bio + nano que potencien su eficacia sin comprometer los beneficios ambientales o biológicos.

Un estudio reciente examinó la combinación de los NEP, *Heterorhabditis indica* y un *Steinernema* sp., con NP-Ag (sintetizadas bacterianamente) y aceite esencial de romero, evaluando su eficacia contra garrapatas (*Hyalomma dromedarii*) y larvas de la polilla de la cera (*Galleria mellonella*) (Albogami *et al.*, 2025). Los resultados mostraron que las NP no causaron mortalidad significativa a los NEP, pero tuvieron un efecto sinérgico o aditivo que incrementó la mortalidad de los artrópodos cuando los NEP se combinaron con NP-Ag o aceite esencial.

Otro estudio evaluó la exposición de JI de *Steinernema glaseri* y *S. carpocapsae* a diferentes concentraciones de NP-ZnO en suspensión acuosa. Los resultados indicaron que a bajas concentraciones estas NP no resultaron tóxicas para los NEP, y en algunos casos ofrecieron protección ante radiación UV (Bravo-Soriano *et al.*, 2023).

Makirita *et al.* (2020) reportan que las NP de óxidos metálicos como ZnO, TiO₂ y Fe₃O₄ en bajas concentraciones pueden proteger a los NEP de la radiación UV bajo luz solar directa; estas NP mantienen la supervivencia de los JI y no reducen significativamente su capacidad patogénica.

En conjunto, las NP metálicas cumplen funciones claves como: actuar como barreras físicas frente a la radiación UV, conservar la humedad en la matriz protectora, favoreciendo la longevidad de los JI, y la integración en sistemas de liberación controlada (geles, cápsulas o polvos) que optimizan la dispersión de los NEP en el campo (Vermeire *et al.*, 2024; Shapiro-Ilan *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2021).

2.5. Formulación de NEP y NP

La formulación es un proceso que transforma los NEP en un producto eficaz para el biocontrol, manteniendo la supervivencia de los NEP durante el almacenamiento y la aplicación, así como en las condiciones variables del suelo agrícola. Actualmente, se reconocen tres métodos principales para la aplicación conjunta de NEP y NP: 1) encapsulación en matrices biodegradables que los protegen del ambiente, en especial la radiación UV, 2) suspensiones líquidas en las que ambas tecnologías se aplican juntas y 3) polvos secos formulados, adecuados para aplicaciones en condiciones áridas o en suelos de baja humedad (Nowak *et al.*, 2023). Bajo el concepto de la formulación en matrices nanopoliméricas que actúen como microcápsulas protectoras (Figura 3), capaces de liberar gradualmente los NEP y sus bacterias simbióticas en el sitio donde se encuentra el insecto huésped, se ha realizado investigación tecnológica y científica con resultados notables.

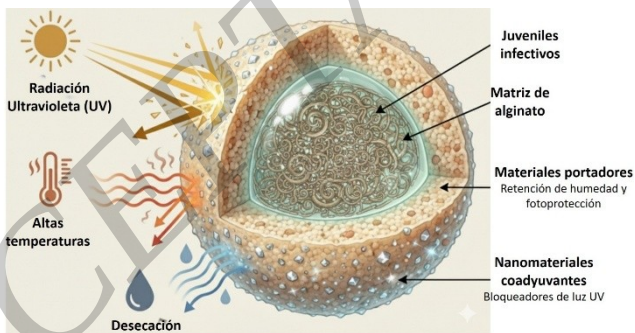


Figura 3. Representación esquemática en corte de una formulación tipo pellet con NEP (Google, 2025). Nota: Imagen generada mediante el modelo de IA Gemini.

En emulsiones tipo Pickering con NP de TiO₂ y aceite mineral que recubren individualmente a los JI, se ha logrado mantener la viabilidad de *S. carpocapsae* hasta por 120 días almacenado a 8 °C (Kotliarevski *et al.*, 2022). Wu *et al.* (2023) reportan la formulación de JI de *S. carpocapsae* con Titania

NH₂, que proporcionó mayor protección frente al daño por exposición a radiación UV por 20 min. Los JI formulados mantuvieron una alta viabilidad e infectaron eficazmente al huésped.

En el estudio de Salem *et al.* (2024), se reporta la efectividad potenciada de NEP combinados con aceite esencial de romero y NP-Ag sintetizadas por bacterias, contra las plagas *Hyalomma dromedarii* y la polilla de la cera *Galleria mellonella*, posiblemente, debido al daño ocasionado a la cutícula del insecto o por el debilitamiento de sus defensas; así mismo, observaron sinergia entre los tres agentes (NE + AgNP + aceite esencial) en algunos tratamientos. En otro estudio, se demostró que las formulaciones con NP-ZnO aumentaron la eficacia larvicida contra *Agrotis ipsilon* cuando se combinaron con NEP (El-Sherif & Abdel-Rahman, 2025).

El desarrollo de estas tecnologías de formulación aún enfrenta desafíos, como la compatibilidad química, la estabilidad física de las cápsulas y la estandarización de la dosificación (Gutiérrez-Ramírez *et al.*, 2020). Por ello, es imprescindible diseñar formulaciones que minimicen riesgos: por ejemplo, empleando NP biodegradables, de síntesis “verde” (biológica), con liberación controlada, concentraciones seguras para organismos beneficiosos, evaluación de impacto ecológico y seguimiento post-aplicación. Revisiones recientes llaman a realizar estudios de compatibilidad ecológica antes de generalizar su uso (Navarro *et al.*, 2024).

En el Instituto Tecnológico del Valle de Etla, se está desarrollando un biopesticida con NEP protegidos contra la radiación UV. Destaca la supervivencia y patogenicidad sostenidas de JI de *S. glaseri* en suspensión acuosa con NP-OZn, incluso después de la exposición a la radiación UV de 240 nm. En una formulación de pellets de alginato con NP-OZn, los JI pueden permanecer viables hasta cuatro meses a temperatura ambiente (datos no publicados).

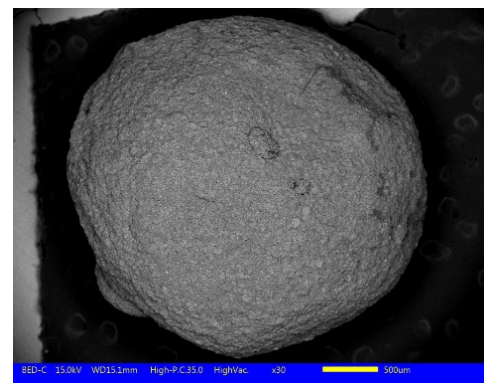


Figura 3. Vista superior de un pellet de tierra diatomea con NEP elaborado por el método de gelación iónica, imagen tomada por microscopía electrónica de barrido a un aumento de 30×.

2.6. Normatividad y consideraciones de seguridad

El creciente interés por la nanotecnología aplicada a la agricultura plantea la necesidad de establecer marcos de

control y regulación para el uso de NP, con el fin de proteger la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas, al ser más reactivas y potencialmente más riesgosas que sus formas convencionales. Por ello, agencias internacionales y normativas han comenzado a establecer criterios para su registro, evaluación y aplicación controlada en agricultura y alimentos, pero no es aún universal ni homogénea.

En la Unión Europea, por ejemplo, al introducir nanomateriales en la cadena alimentaria (como aditivos, recubrimientos o nanopesticidas), estos deben evaluarse por la autoridad reguladora correspondiente, por ejemplo, por la European Food Safety Authority (EFSA) (Pérez-Hernández *et al.*, 2024). Si un aditivo ya aprobado cambia su tamaño de partícula a escala nano, se considera un aditivo distinto, por lo que requiere nueva evaluación. Además, materiales en contacto con alimentos que contienen nanomateriales necesitan autorización específica.

Complementariamente, el Reglamento de Productos Biocidas (BPR) 528/2012 establece que las NP usadas como biocidas o pesticidas requieren evaluaciones de seguridad específicas, etiquetado indicando la presencia de forma nano y presentación de datos detallados sobre posibles efectos en la salud y el ambiente (ECHA, 2018).

No obstante, en muchos países y en particular en regiones agrícolas de Latinoamérica, la regulación de nanomateriales en agricultura o alimentos aún está en desarrollo o es inexistente, lo que genera incertidumbre regulatoria y barreras para su adopción masiva. En México, por ejemplo, aunque existe una regulación sobre fertilizantes, plaguicidas y bioinsumos, aún no hay una regulación pública consolidada específica para NP agrícolas y su combinación con microorganismos entomopatógenos como los NEP (Cámara de Diputados, 2025).

Esto implica que la comercialización debe estar precedida por investigación técnica y científica sobre estudios de riesgo, toxicidad, persistencia, efecto sobre organismos no objetivo, trazabilidad, regulación de etiquetado, normas de inocuidad, entre otros.

2.7. Mercado de NEP y de nanopartículas agrícolas

La nanotecnología agrícola de nano-fertilizantes, nano-pesticidas y nano-encapsulados está emergiendo como un sector de rápido crecimiento, impulsado por las necesidades de producción sostenible, intensificación agrícola, la reducción del uso de agroquímicos, la mejora de los rendimientos y la adaptación al cambio climático (Lira *et al.*, 2018). En cuanto a los NEP, están disponibles comercialmente en muchas regiones del mundo, siendo un insumo biológico consolidado en programas de control biológico (Sáenz, 2025).

Pero la acción combinada de NEP como agentes de biocontrol con la nanotecnología agrícola representa una nueva frontera de investigación para el desarrollo de tecnologías de formulación más estables y eficientes y con menor impacto ambiental que derivaría en productos de biocontrol “nano-mejorados”. Sin embargo, aún se encuentra

en una etapa de investigación a escala de laboratorio, con numerosos retos por superar, tales como validación científica del desempeño en campo, regulación, aceptación del productor, costos, escalabilidad, producción masiva, entre otros.

3. Integración y perspectivas futuras

En el contexto del control biológico, la nanotecnología y la biotecnología se integran de manera sinérgica para fortalecer la agricultura sustentable, abriendo nuevas posibilidades para el manejo racional de los agroecosistemas, con menor dependencia de insumos químicos y mayor resiliencia frente al cambio climático y las amenazas fitosanitarias emergentes.

La interacción entre NP metálicas y los NEP puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre su viabilidad y eficacia frente a los insectos plaga objetivo, lo que subraya la necesidad de comprender a fondo estas interacciones. No obstante, el avance de esta línea de investigación y su aplicación práctica podrían marcar un punto de inflexión hacia el desarrollo de bioinsumos para una producción agrícola más eficiente, segura y respetuosa con el ambiente.

La integración entre NEP y NP representa una convergencia innovadora entre el biocontrol y la nanotecnología. Los NEP aportan especificidad, seguridad ambiental y eficacia comprobada como agentes de control biológico, mientras que las NP ofrecen protección, estabilidad, liberación controlada y mejora funcional de los agentes biológicos.

Esta combinación, especialmente mediante estrategias de microencapsulación, podría superar varias de las limitaciones del biocontrol tradicional, como la vulnerabilidad ambiental, los problemas de almacenamiento, la aplicación poco uniforme y la dependencia de condiciones físicas específicas del campo. Además, abre la puerta al desarrollo de “nano-biocontroladores” comercializables, adaptables a distintos contextos productivos y alineados con los principios de la agricultura sostenible.

Sin embargo, es necesario considerar que la aplicación de microorganismos parásitos podría generar interacciones en el sistema en el que se aplique. Por lo que su implementación responsable requiere investigar rigurosamente la biocompatibilidad, la toxicología, la persistencia ambiental, los efectos sobre organismos no objetivo, las interacciones con la microbiota del suelo y la seguridad para humanos y fauna, así como el desarrollo de marcos regulatorios claros. Solo bajo estas condiciones será posible una adopción más segura y confiable de estas tecnologías de formulación.

En definitiva, el estudio de la combinación entre NEP y NP, desde un enfoque integrador y biocompatible, no representa únicamente una innovación tecnológica, sino una apuesta estratégica por una agricultura más sostenible, eficiente y resiliente, con un papel potencialmente clave en la seguridad alimentaria del futuro.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Posgrado, Investigación e Innovación del Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado a los proyectos 21562.25-P y 26530.26-P.

Referencias

- Abd-El salam, K. A. (2021). Silver-based nanomaterials for sustainable applications in agroecology: A note from the editor. En *Silver nanomaterials for agri-food applications* (pp. 1–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821008-9.00001-7>
- Albogami, B., Darwish, H., Alghamdi, A., Darwish, A. B., Al-Otaibi, W. M., Osman, M. A., ... & Nourelddeen, A. (2025). Acaricidal and insecticidal activities of entomopathogenic nematodes combined with rosemary essential oil and bacterium-synthesized silver nanoparticles against camel tick, *Hyalomma dromedarii* and wax moth, *Galleria mellonella*. *PeerJ*, 13, e18782. <https://doi.org/10.7717/peerj.18782>
- Atanda, S.A., Shaibu, R.O. & Agunbiade, F.O. (2025). Nanoparticles in agriculture: balancing food security and environmental sustainability. *Discover Agriculture*, 3 (26). <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00159-x>
- Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., Benelli, G., Losic, D., Uvah, I. I., & Desneux, N. (2018). Nanoparticles for pest control: Current status and future perspectives. *Journal of Pest Science*, 91(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0>
- Auffan, M., Rose, J., Bottero, J. Y., Lowry, G. V., Jolivet, J. P., & Wiesner M. R. (2009). Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective. *Nature Nanotechnology*, 4(10), 634–641. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.242>
- Bravo-Soriano, L., Cortés-Martínez, C. I., & Santiago-Martínez, G. M. (2023). Nanopartículas metálicas de óxido de zinc como coadyuvantes para la formulación de nematodos entomopatógenos *Steinernema*. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10, 55–55.
- Campos-Herrera, R. (2015). *Nematode Pathogenesis of Insects and Other Pests*. Switzerland: Springer.
- Chandrakasan, G., García Trejo, J. F., Alatorre Jácome, O., & Rico-García, E. (2024). Abundancia, caracterizaciones moleculares y producción masiva de comunidades microbianas benéficas (nematodos entomopatógenos) del suelo. Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología, 83-103. <https://doi.org/10.61820/pct.vi.1068>
- COFEPRIS. (2020). *Tarifas por servicios: Licencias sanitarias para plaguicidas*. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. <https://www.gob.mx/cofepris>
- Cortés-Martínez, C. I., & Chavarria-Hernández, N. (2020). Production of entomopathogenic nematodes in submerged monoxenic culture: A review. *Biotechnology and Bioengineering*, 117(12), 3968–3985. <https://doi.org/10.1002/bit.27497>
- Cortés-Martínez, C. I., Ruiz-Vega, J., Chavarria-Hernández, N., & Aquino-Bolaños, T. (2025). Thirty-eight years of patenting for the progress in biopesticides based on entomopathogenic nematodes: a mini-review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 132(4), 119. <https://doi.org/10.1007/s41348-025-01116-y>
- de Oliveira, J. L., Campos, E. V. R., Pereira, A. E. S., & Fraceto, L. F. (2021). Nanotechnology-based strategies for nematode control. *Pest Management Science*, 77(1), 21–30.
- ECHA. (2019). Nanomaterials and REACH. European Chemicals Agency. <https://echa.europa.eu/es/regulations/nanomaterials>
- Ejaj, R., Chowdhury, A., & Hossain, M. A. (2023). Entomopathogenic nematodes as biocontrol agents: Recent advances and future prospects. *Journal of Invertebrate Pathology*, 199, 107804. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2023.107804>
- El-Sherif, S., & Abdel-Rahman, H. (2025). Larvicidal activities of *Steinernema carpocapsae* and ZnO nanoparticles against *Agrotis ipsilon*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 35(1), 56–62. https://journals.ekb.eg/article/445043_0.html
- GEO (Group on Earth Observations). (2020). *GEO strategic plan 2020–2022: Implementing GEOSS*. <https://earthobservations.org>
- Griffin, C. T., Boemare, N., & Lewis, E. E. (2005). Biology and behaviour. In *Nematodes as Biocontrol Agents* (pp. 47–75). CABI Publishing.
- Gutiérrez-Ramírez, J. G., Sánchez-Muñoz, B. A., & López-Sánchez, G. (2020). Biopolímeros nanoestructurados para la agricultura. *Revista Agropecuaria de Ciencia y Tecnología*, 12(3), 45–59.
- Hawkins, N. J., Bass, C., Dixon, A., & Neve, P. (2019). The evolutionary ecology of pesticide resistance: Building a bridge between molecular biology and population genetics. *Pest Management Science*, 75(1), 47–58. <https://doi.org/10.1002/ps.5128>
- Kah, M., Kookana, R. S., Gogos, A., & Bucheli, T. D. (2019). A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers. *Nature Nanotechnology*, 14, 1004–1015.
- Kaya, H. K., & Gaugler, R. (1993). Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, 38, 181–206.
- Kim, J. J., Park, C. G., & Kim, H. S. (2021). Development of dry powder formulations for entomopathogenic nematodes using nanomaterials to improve survival and efficacy. *Biological Control*, 155, 104524. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104524>
- Kotliarevski, L., Cohen, R., Ramakrishnan, J., Wu, S., Mani, K. A., Amar-Feldbaum, R., ... & Mechrez, G. (2022). Individual coating of entomopathogenic nematodes with titania (TiO₂) nanoparticles based on oil-in-water pickering emulsion: a new formulation for biopesticides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(42), 13518–13527.
- Lacey, L. A., Grzywacz, D., Shapiro-Ilan, D. I., Frutos, R., Brownbridge, M., & Goettel, M. S. (2015). Insect pathogens as biological control agents. *Journal of Invertebrate Pathology*, 132, 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2015.07.009>
- Le Pioufle, O., Miranda-Arámbula, M., & López-Valdez, F. (2024). Nanopartículas metálicas como plaguicidas en cultivos agrícolas, ventajas y retos de producción. *Frontiera Biotecnológica*, 28, 30-40. <https://share.google/wgDgsL9JMiEadsVcz>
- Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villareal, G., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 8-37. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Makirita, W., Zhang, F., Mbega, E. R., He, N., Li, X., Chacha, M., & Liu, T. (2020). Influence of metal oxides nanoparticles on pathogenicity of *Steinernema carpocapsae* nematodes against lepidopteran *Galleria mellonella*. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(3), 1470–1477. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.17329>
- Mesa, C. A., & Esparcia, J. (2023). Agricultura y sostenibilidad en tiempos de cambio climático: desafíos globales y locales. *Revista Iberoamericana de Estudios de Desarrollo*, 12(1), 45–65. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4478931>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (A/RES/70/1). Asamblea General de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Navarro, N. E., González, A.M., Morales, N. y Pérez, E. A. (2024). La Nanotecnología en la Agricultura: Innovación para la Producción Sostenible de Alimentos. *Azcatl*, 3, 23-27. <https://doi.org/10.24275/AZC2024B005B>
- Nowak, M., Skwiercz, A., & Radziemska, M. (2023). Effects of silver, gold, and platinum nanoparticles on selected nematode trophic groups. *Journal of Horticultural Research*, 31(2), 41–49. <https://doi.org/10.2478/johr-2023-0035>
- Pérez-de-Luque, A. (2017). Interaction of nanomaterials with plants: What do we need for real applications in agriculture? *Frontiers in Environmental Science*, 5, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00012>
- Pérez-Hernández, H., López-Valdez, F., Juárez-Maldonado, A., Méndez-López, A., Sarabia-Castillo, C. R., García-Mayagoitia, S., ... & Pérez-Moreno, A. Y. (2024). Implicaciones de los nanomateriales utilizados en la agricultura: una revisión de literatura de los beneficios y riesgos para la sustentabilidad. *Mundo Nano*, 17(32), 10e-50e. <https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2024.32.69720>
- Romero R. Felipe. 2004. Manejo Integrado de Plagas: Las bases, los conceptos, su mercantilización. Universidad Autónoma Chapingo. Colegio de Postgraduados: Instituto de Fitosanidad, Montecillo, Chapingo, Texcoco. Manejo Integrado de Plagas: las bases, los conceptos su mercantilización
- Sáenz, A., A. (2005). Importancia de los nematodos entomopatógenos para el control biológico de plagas en palma de aceite. *Palmas*, 26(2), 41–57.
- Salem, H. F., Moustafa, H. A., Fouad, E. A., El-Aziz, N. M. A., & Ramadan, M. M. (2024). Acaricidal and insecticidal activities of entomopathogenic nematodes combined with rosemary essential oil and bacterium-synthesized silver nanoparticles. *Scientific Reports*, 14(1), 10345. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51797-z>
- Shapiro-Ilan, D. I., Gouge, D. H., Piggott, S. J., & Fife, J. P. (2006). Application technology and environmental considerations for use of entomopathogenic nematodes in biological control. *Biological Control*, 38(1), 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.11.011>
- Sistema de Información Legislativa de la Secretaría de Gobernación. <http://sil.gob.mx/gob.mx/portal> Fuente: <http://www.diputados.gob.mx>
- Tarasco E, Fanelli E, Salvemini C, El-Khoury Y, Troccoli A, Vovlas A, De Luca F. Nematodos entomopatógenos y sus bacterias simbióticas: desde los genes hasta los usos de campo. *Frontiers in Insect Science*. 2023 29 de agosto; 3:1195254. doi: 10.3389/finsec.2023.1195254.

- Vázquez-Núñez, E. (2023). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo Nano*. 16(30), 1-25. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69704>
- Vermeire, M. L., Thiour-Mauprivez, C., & De Clerck, C. (2024). Agroecological transition: towards a better understanding of the impact of ecology-based farming practices on soil microbial ecotoxicology. *FEMS Microbiology Ecology*, 100(4), fiae031. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae031>
- Wu, S., Mechrez, G., Ment, D., Toews, M. D., Mani, K. A., Feldbaum, R. A., & Shapiro-Ilan, D. I. (2023). Tolerance of *Steinernema carpocapsae* infective juveniles in novel nanoparticle formulations to ultraviolet radiation. *Journal of Invertebrate Pathology*, 192, 107851. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2022.107813>
- Yangüez, Joseph, Pitti Javier, Vargas Reynaldo, Bado, Merly, Guerra Ivonne, Martínez Oscar, Rios-Moreno, Alex. (2004). Patogenicidad de nematodos entomopatógenos sobre larvas de *Agrotis* sp.: (Lepidoptera: Noctuidae). *Revista Investigaciones Agropecuarias*. 7 (1), 75-87. <https://doi.org/10.48204/j.ia.v7n1.a6547>
- Zelaya-Molina, Lily Xochilt, Chávez-Díaz, Ismael Fernando, de los Santos-Villalobos, Sergio, Cruz-Cárdenas, Carlos Iván, Ruiz-Ramírez, Santiago, & Rojas-Anaya, Edith. (2022). Control biológico de plagas en la agricultura mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(spe27), 69-79. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i27.3251>
- Gaugler, R., Bednarek, A., & Campbell, J.F. (1992). Ultraviolet inactivation of heterorhabditid and steinernematid nematodes. *Journal of Invertebrate Pathology*, 59(2), 155-160. [https://doi.org/10.1016/0022-2011\(92\)90026-Z](https://doi.org/10.1016/0022-2011(92)90026-Z)
- Ayobami, A. O., & Abimbola, A. A. (2025). Advances in Nanoparticles as Drug Delivery Systems: A Review. *Scientific African*, e03101. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e03101>