ARTÍCULOS DE REVISIÓN
www.mundonano.unam.mx | Mundo Nano
https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69833 | 18(34), e69833, enero-junio 2025

Nanopartículas en el control de insectos y ácaros plaga

Nanoparticles in the control of pest insects and mites

José Guadalupe Ontiveros-Guerra,* Agustín Hernández-Juárez,*,♦
Sonia Noemí Ramírez-Barrón,** Julio César Chacón-Hernández***

ABSTRACT: Agricultural production worldwide is becoming more demanding every day. Among the main limitations for food production are arthropod pests (insects and mites), which cause significant damage to crops, directly to production and yield. Phytophagous insects and mites represent a strong threat to agricultural crops, causing great economic losses. Chemical control, one of the most used for the management of pests and mites, has caused resistance problems in different pests, and has affected human and animal health, as well as non-target and beneficial species. In recent years, different nanotechnology alternatives have been explored for the management and control of the main groups of pest insects and mites. In this review we will present and debate the role of nanoparticles (NPs) as tools in the control and management of the main insect and mite pest species.
KEYWORDS: pest, mites, insects, nanoparticles, nanotechnology.

RESUMEN: La producción agrícola a nivel mundial es cada día más demandante. Dentro de las principales limitantes para la producción de alimentos encontramos los artrópodos plaga (insectos y ácaros), causantes de afectaciones importantes a los cultivos, directamente a la producción y rendimiento. Los insectos y ácaros fitófagos representan una fuerte amenaza para los cultivos agrícolas, ocasionando grandes pérdidas económicas. El control químico, uno de los más usados para el manejo de plagas y ácaros, ha ocasionado problemas de resistencia en diferentes tipos de plagas, ha afectado la salud humana y animal, así como también a especies no blanco y beneficiosas. En los últimos años, se han explorado diferentes alternativas de la nanotecnología para el manejo y control de los principales grupos de insectos y ácaros plaga. En esta revisión expondremos y debatiremos el rol de las nanopartículas (NPs) como herramientas en el control y manejo de las principales especies de insectos y ácaros plaga.
PALABRAS CLAVE: plaga, ácaros, insectos, nanopartículas, nanotecnología.

Introducción

La nanotecnología en la agricultura

En la actualidad, el mundo enfrenta nuevos retos frente a los recursos naturales, debido al incremento de la población, la búsqueda de nuevas fuentes de energía, la producción de alimentos, el cambio climático y un aprovechamien-

Recibido: 26 de mayo, 2024. Aceptado: 26 de julio, 2024. Publicado: 19 de septiembre, 2024.

* Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología.
** Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Ciencias Básicas.
*** Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería y Ciencias.
♦ Autor de correspondencia: chinoahj14@hotmail.com

to más eficiente de los recursos hídricos (Sosa 2015). Una de las áreas con más demanda es la agricultura, donde cada día se requieren mejorar los procesos y aumentar la producción, debido a los nuevos retos para abastecer a la población mundial (Mesa y Esparcia, 2023).

La nanotecnología (NT) agrícola ha tenido un gran impacto en la agricultura durante los últimos años, recibiendo la atención en muchas de sus áreas, y mejorando significativamente la calidad e inocuidad de los insumos, materias primas, la mejora de procesos y el incremento del valor nutritivo de los productos (Dasgupta *et al*., 2015). La NT ha avanzado principalmente en países desarrollados, los cuales se han abierto a nuevas innovaciones en ramas muy específicas en la agricultura, Prasad *et al*. (2014) mencionan la importancia de dispersar la NT a todos los sectores de la agricultura en diferentes áreas. Lira *et al*. (2018) refieren las diferentes áreas de la NT en la agricultura: empaque de alimentos, agricultura de precisión (sensores remotos), productos (nanofertilizantes y nanopesticidas), trasferencia genética y nanoalimentos.

La nanotecnología en el control de plagas

El uso a gran escala de productos químicos contra artrópodos plaga ha afectado negativamente las poblaciones de enemigos naturales, generando contaminación ambiental, degradación del suelo y afectaciones a la salud humana (Hernández *et al*., 2019; Carranza *et al*., 2023). En los últimos años, se han explorado alternativas procedentes de la NT para el manejo de diferentes plagas (Correa *et al*., 2018; Hernández y Orozco, 2020). Las nanoformulaciones representan una alternativa para el manejo de artrópodos plaga, entre estas encontramos: nanoemulsiones, nanoencapsulaciones y nanodispersiones (Kumar *et al*., 2019; Hernández y Orozco, 2020), las cuales tienen ventajas como el aumento significativo de la velocidad de disolución, la solubilidad en agua y la uniformidad de dispersión en la aplicación, lo cual mejora significativamente el control de plagas en la agricultura (Ramos *et al*., 2021).

Las nanopartículas en el control de plagas

Las nanopartículas (NPs) se pueden definir como partículas ultrafinas producidas intencionalmente con dimensiones características de 1 a 100 nm y con propiedades únicas (Auffan *et al*., 2009). El tamaño, la forma (esférica, varillas, tubos e irregular), la relación superficie-volumen, la fase cristalina (cristalina, amorfa etc.) y la composición química (por ejemplo, metálica, de carbono, inorgánica, orgánica, polimérica, etc.) son parámetros clave para definir muchas propiedades tóxicas de estos materiales hacia el control de plagas (Athanassiou *et al*., 2018).

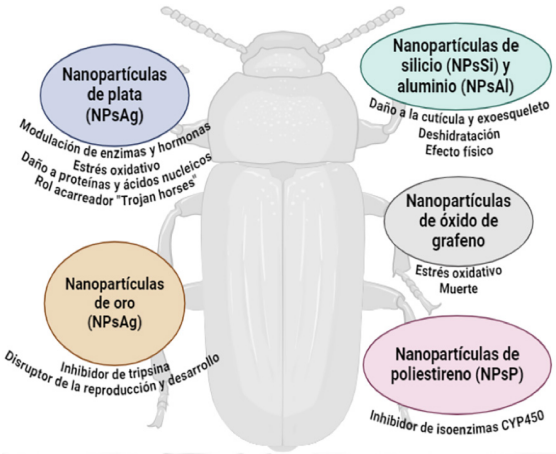
Parisi *et al*. (2016) enlistaron una amplia variedad de materiales a partir de compuestos naturales para fabricar NPs en diferentes formas y composiciones químicas, incluidos metales, óxidos metálicos, puntos cuánticos, semiconductores, carbono, cerámicas, silicatos, lípidos, polímeros, proteínas, den-

https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69833 | **18(34), e69833, enero–junio 2025**

drímeros y emulsiones. Algunos beneficios comunes de las formulaciones de pesticidas a base de NPs incluyen: mayor solubilidad, mayor estabilidad, eliminación de solventes orgánicos tóxicos en comparación con los pesticidas usados convencionalmente, liberación controlada de ingredientes activos, resistencia a la fotólisis e hidrólisis (descomposición temprana), mejor movilidad, mejor efecto a dosis más bajas (Sasson *et al*., 2007).

Las nanopartículas han sido probadas con éxito frente a una amplia gama de artrópodos perjudiciales, tanto en la agricultura (Pavela *et al*., 2017; Athanassiou *et al*., 2018), como en insectos vectores (Benelli, 2016; Benelli *et al*., 2017). Se sabe de efectos ovicidas, adulticidas y sobre la oviposición (Tunçsoy, 2018; Saranya *et al*., 2020; Shahzad y Manzoor, 2021). Algunos autores han reportado que las NPs provocan estrés oxidativo (propiciando las especies reactivas de oxígeno ROS) en tejidos de artrópodos (Mao *et al*., 2018; Benelli, 2018). Rai *et al*., (2014) mencionan un efecto físico por parte de las NPs sobre los insectos, afectando directamente el exoesqueleto, posicionándose en las células para degradar proteínas y enzimas, lo cual ocasionará la disminución de la permeabilidad de la membrana y la alteración de la fuerza motriz, provocando ataxia e inanición en insectos (Benelli, 2016). A continuación, se muestran los efectos y/o modos de acción de las NPs sobre insectos y ácaros plaga (figura 1).

FIGURA 1. Modos de acción de las nanopartículas en artrópodos plaga.



Fuente: Adaptado de Benelli (2018).

Materiales y métodos

La recolección sistemática de información se inició en agosto de 2023, aplicando un criterio de inclusión a través de diferentes bases de datos como

Scopus, Elsevier, EBSCO, Google Scholar, Springer, Redalyc y SciELO, e ingresando a la búsqueda la palabra clave principal: nanopartículas. Se seleccionaron publicaciones desde 2013 hasta 2023. Posteriormente, se aplicó el criterio de exclusión, seleccionando publicaciones donde intervinieron las palabras clave: control de plagas, ácaros e insectos fitófagos y nanopartículas. Se consultaron un total de 500 referencias. Después, se seleccionaron 150 artículos relevantes, excluyendo aquellos irrelevantes para nuestro estudio, conformando, así, un total de 62.

La síntesis y análisis de la información se realizó con la lista de verificación PRISMA 2020 (Page *et al*., 2021). Como resultado del análisis de las investigaciones consultadas sobre nanopartículas, encontramos lo siguiente: en los últimos 11 años los estudios se han centrado en el control de insectos y ácaros plaga. En esta revisión expondremos el rol de las NPs sobre el manejo y control de los insectos y ácaros plaga.

Nanopartículas de plata sobre insectos

Abdel-Gawad (2018) utilizó extracto de hoja de *Moringa oleifera* Lam (Mo-LE) (Moringaceae) para sintetizar nanopartículas de plata (Mo-AgNP) contra *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae). En el bioensayo larvicida, los valores de CL_{50} fueron 2.03 mg/mL para las Mo-AgNP. Asimismo, se determinó la CL_{50} para pupas, la cual fue de 9.604 mg/mL. A las larvas tratadas con CL_{50} se les ocasionó una reducción significativa en la fecundidad de las hembras y en la eclosión de los huevos. Las Mo-AgNP afectaron el contenido total de proteínas y la actividad de las enzimas esterasas no específicas, acetilcolina esterasa y glutatión S-transferasa en larvas alimentadas con dietas tratadas.

Kantrao *et al*. (2017) reportaron el efecto de las nanopartículas de plata (NPsAg) sobre la actividad de la proteasa intestinal de *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae). Se utilizaron los extractos de hojas de *Ficus religiosa* L. (FR) y *Ficus benghalensis* L. (FB) (Moraceae) como agentes reductores. Las NPsAg modularon la actividad de la enzima. También se redujo significativamente el peso de las larvas y la tasa de supervivencia; asimismo, las NPs estudiadas inhibieron la actividad de la proteasa en un 50 y un 70% desde 100 µg/L. Manimegalai *et al*. (2022) utilizaron el extracto de *Dichrocephala integrifolia* Kuntze (Asteraceae) como agente reductor para la síntesis de NPsAg contra *Spodoptera litura* F. (Lepidoptera: Noctuidae) y *H. armigera*. Las larvas tratadas con NPsAg exhibieron actividad antialimentaria contra *S. litura* (77%) y *H. armigera* (79%). Se obtuvieron tasas de mortalidad larvaria (68-70%) con valores de CL_{50} de 99 y 109 mg/L y tasas de afectaciones de 74-72% en pupas de *S. litura* y *H. armigera*, respectivamente; también se observaron daños histológicos en el mesenterón de larvas tratadas en comparación con el control. Baranitharan *et al*. (2021) evaluaron NPsAg utilizando el extracto de *Areca catechu* L. (Areceae) sobre *S. litura* y *H. armigera*. Las CL_{50} y CL_{90} fueron de 71-85 µg/mL y 96-129 µg/mL, respectivamente, para las dos especies. Además, se observaron efectos sobre pupas, donde las CL fueron

menores; los autores mencionan que las NPsAg podrían tener un potencial en el control de *S. litura* y *H. armigera*. A partir del extracto de hoja de *Ocimum basilicum* L. (Lamiaceae), Jafir *et al*. (2021) sintetizaron NPsAg con el objetivo de evaluar el potencial insecticida contra *S. litura*, en comparación con algunos insecticidas sintéticos de diferentes modos de acción (Coragen®, Proclaim®, Tracer® y Talstar®). Los valores de CL_{50}, CL_{90} y CL_{95} fueron estadísticamente diferentes en el segundo y cuarto estadio de *S. litura*. Las NPsAg causaron mortalidad de 22-97% en larvas de segundo estadio a una concentración de 100-1500 mg/L, seguidas de Coragen® (18-92%), Proclaim® (13-78%) y Talstar® (13-68%), mientras que Tracer® presentó la tasa de mortalidad larval más baja (12-67%) a una concentración de 60-120 mg/L. Los autores destacan la mortalidad de NPsAg por encima de los insecticidas comerciales; además, sugieren a las NPsAg como posible alternativa a los problemas de resistencia en estas plagas. En un estudio similar realizado por Ihegwuagu *et al*. (2016), se exploraron formulaciones de diclorvos y clorpirifos encapsulados con NPsAg y almidón, mostrando los tratamientos encapsulados con NPsAg mejor mortalidad que los tratamientos de los dos insecticidas solos, lo cual sugiere una posible sinergia.

Sayed *et al*. (2017) sintetizaron NPsAg utilizando la bacteria entomopatógena *Bacillus thuringiensis* var. kurstaki Berliner (Bacillaceae), evaluaron la eficacia insecticida sobre larvas de *Trichoplusia ni* (Hübner) y *Agrotis ipsilon* (Hufnagel) (Lepidoptera: Noctuidae). Los resultados demostraron ser significativamente más virulentos los tratamientos de NPsAg hacia las larvas de *T. ni* que con *A. ipsilon*. Las NPsAg fueron sintetizadas utilizando extracto de *Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt (Sargassaceae) por Moorthi *et al*. (2015), su actividad insecticida fue evaluada contra *Ergolis merione* (Cramer) (= *Ariadne merione*) (Lepidoptera:Nymphalidae), los autores observaron cambios prominentes en el perfil proteico de la hemolinfa, la morfología de los hemocitos, el deterioro del intestino medio, la membrana basal, el cuerpo adiposo y los ciegos gástricos. Asimismo, se observó que los fitoquímicos de *S. muticum* son un precursor destacado para la síntesis de nanopartículas.

Amjad *et al*. (2022) sintetizaron NPsAg utilizando cáscara de arroz, las NPsAg fueron evaluadas sobre el pulgón de la espiga *Sitobion avenae* (F.) (Hemiptera: Aphididae). Los resultados mostraron que la mortalidad más alta de pulgones fue de 93.3% con una concentración de nanopartículas de 600 mg/L, mientras que la mortalidad más baja se observó con 200 mg/L. Del mismo modo, los resultados revelaron que las actividades enzimáticas de la catalasa y la glutatión-s-transferasa aumentaron en respuesta al incremento de la concentración de NPs. Khatami *et al*. (2019) evaluaron el extracto de alas de la cucaracha americana *Periplaneta americana* (L.) (Blattodea: Blattidae) como un nuevo biomaterial para sintetizar NPsAg. Se examinó el efecto insecticida de las NPsAg resultantes sobre la mortalidad de *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae) en condiciones de laboratorio; 48 h después de los tratamientos con las NPsAg (100 mg/L), se observó una mortalidad

promedio del 40%. Bhattacharyya *et al*. (2016) evaluaron el efecto de NPsAg utilizando el extracto de *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae) contra *Macrosiphum rosae* (L.) (Hemiptera: Aphididae), explorando diferentes concentraciones de NPsAg (200, 300, 400 y 500 mg/L), los datos de mortalidad de pulgones revelaron que las NPsAg fueron efectivas a una concentración de 500 mg/L, y a medida que aumentaron la concentración también aumentó la tasa de mortalidad, obsevando diferencias estadísticamente significativas en la mortalidad de *M. rosae* entre las concentraciones (DSM al 5%).

Almadiy *et al*. (2018) estudiaron el efecto de la síntesis verde de NPsAg con el extracto de *Peganum harmala* L. (Nitrariaceae). Las NPsAg mostraron actividad insecticida contra *Trogoderma granarium* (Everts) (Coleoptera: Dermestidae). Las CL_{50} fueron de 31-62 μg/cm^2 y 24-46 μg/cm^2 24 h postratamiento contra larvas y adultos, respectivamente. La alimentación de las larvas del segundo estadio con los granos tratados con NPsAg en concentraciones subletales provocó efectos negativos en el crecimiento y desarrollo normales del insecto. Estos efectos se manifestaron con un alto porcentaje de larvas y pupas malformadas, un ciclo de vida prolongado y una reducción significativa en la aparición de adultos. Rouhani *et al*. (2013) realizaron ensayos en laboratorio para determinar la efectividad de las NPsAg sobre larvas y adultos de *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera: Chrysomelidae) en semillas de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (Fabaceae). En los experimentos, las CL_{50} en larva fueron de 1.0 g kg^{-1} y en adultos 2.06 g kg^{-1} de semilla. Los resultados muestran que las NPsAg fueron altamente efectivas en adultos y larvas (mortalidad 83%).

Alif y Thangapandiyan (2019) realizaron una formulación con NPsAg y la evaluaron contra *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). El objetivo principal del estudio fue comparar la eficacia insecticida de las NPs contra malatión. Se evaluó la tasa de mortalidad, disuasión de la oviposición, actividad repelente y actividad antialimentaria de diferentes concentraciones. Los resultados en los ensayos mostraron que la combinación de NPsAg más malatión ejerce una alta eficacia insecticida superior, resaltando respecto a los otros tratamientos.

Mosa *et al*. (2022) utilizaron árboles de limón (*Citrus limon* L. cv. Eureka) (Rutaceae) en dos temporadas para investigar el efecto de las NPsAg sobre el cultivo. Evaluaron tres concentraciones (5, 7.5 y 10 mg/L) en aplicación foliar, considerando el crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad de la fruta. Los resultados indicaron que la aplicación foliar de NPsAg mejoró la longitud de los brotes, la clorofila total, el porcentaje de cuajado de flores y frutos, el rendimiento de frutos, las características físicas y químicas de los frutos y la composición mineral de las hojas (macro y micronutrientes) en comparación con el control en ambas temporadas. La aplicación foliar de NPsAg a 10 mg/L mostró los mejores valores. Más adelante, los autores realizaron la evaluación de un aceite esencial (AE) con material vegetal de esos árboles sobre *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae). Los resultados

indicaron un mejor efecto del AE de cáscara de limón tratado con las diferentes concentraciones de las NPsAg en comparación con los no tratados.

Ahmed *et al*. (2023) utilizaron hongos para sintetizar NPsAg debido a sus especificaciones de menor toxicidad e impacto ecológico. Se realizó una micosíntesis extracelular de NPsAg de *Lecanicillium lecanii* R. Zare & W. Gams (Cordycipitaceae), evaluándose como insecticidas contra los adultos de la plaga solar *Eurygaster testudinaria* (Geoffroy) (Hemiptera: Scutelleridae). Las NPsAg mostraron una fuerte actividad en la mortalidad de adultos durante diferentes periodos de tiempo hasta registrar el 100% a una concentración de 100 mg/L después de 10 días de tratamiento.

Al-Shammari y Al-Zubaidi (2016) evaluaron la efectividad de cuatro extractos de plantas (jengibre, neem, ajo y eucalipto) y sus NPsAg contra *Planococcus citri* (Risso) (Hemiptera: Pseudococcidae). Todos los extractos de plantas y sus NPsAg causaron mortalidad en el segundo y tercer estadio, en todas las concentraciones y tiempos de evaluación. El extracto de jengibre y sus NPsAg causaron la mortalidad máxima sobre el segundo y tercer estadio de *P. citri* (94 y 90%, respectivamente). Los extractos de neem ocuparon el segundo lugar, seguidos del ajo y el eucalipto. Se observó que la CL_{50} para ninfas disminuía con el paso del tiempo.

Ramanathan *et al*. (2021) realizaron experimentos *in vitro* para evaluar la actividad insecticida de NPsAg sintetizadas a partir de extractos de hojas de *Acalypha indica* L. (Euphorbiaceae) contra *Dysdercus cingulatus* (F.) (Hemiptera: Pyrrhocoridae). Los insectos se expusieron a diversas concentraciones (1.25, 2.5, 5, 10 y 15 mg/L) de NPsAg para determinar la DL_{50}, las cuales fueron de 5 mg/L (38%), 10 mg/L (75%), 15 mg/L (83%), 20 mg/L (100%) y 25 mg/L (100%) y el valor DL_{50} de NPsAg biosintetizadas contra *D. cingulatus* fue de 4.66 mg/L (24 horas), 1.64 mg/L (48 horas), 0.3 mg/L (72 horas) y 0.18 mg/L (96 h). Los autores indicaron que las NPsAg sintetizadas a partir de extractos de hojas de *A. indica* tienen potencial para aplicarse con un enfoque ecológico para controlar *D. cingulatus*.

Rouhani *et al*. (2012) evaluaron el efecto insecticida de NPsAg sobre el pulgón de la adelfa, *Aphis nerii* Boyer (Hemiptera: Aphididae). En los experimentos, el valor de la CL_{50} para imidacloprid y las NpsAg fue de 0.13 y 425 mg/L, respectivamente. Adicionalmente, el estudio mostró que 1 mg/L imidacloprid y 700 mg/L de NPsAg tuvieron el mayor efecto en mortalidad de los insectos. Los resultados revelaron que las NPsAg pueden ser usadas como una herramienta valiosa en programas de manejo integrado hacia *A. nerii*.

La tabla 1, muestra las diferentes especies de insectos plaga estudiadas con las NPsAg, el tipo de evaluación, viabilidad de uso y sus efectos y/o daños.

Nanopartículas de plata contra ácaros

Sharifian *et al*. (2016) reportaron la toxicidad de las NPsAg contra *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). Se ensayaron seis concentraciones (190, 285, 356, 441, 551 y 685 mg/L) por el método de inmersión de hojas. El re-

TABLA 1. Nanopartículas de plata (NPsAg) evaluadas contra insectos plaga, viabilidad y sus efectos.

Insectos plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
Aphis nerii	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] bajas y alta mortalidad comparado con imidacloprid)	Mortalidad	Rouhani *et al.* (2012)
Callosobruchus maculatus	*In vitro*	–	Prometedora (CL bajas para alcanzar mortalidad de 80% sobre larvas y adultos)	Mortalidad	Rouhani *et al.* (2013)
Ergolis merione	*In vitro*	–	Prometedora (múltiples efectos sobre la plaga)	Daño al perfil proteico, deterioro del intestino medio, membrana basal, cuerpo adiposo y los ciegos gástricos	Moorthi *et al.* (2015)
Macrosiphum rosae	*In vitro*	–	Regular (CL intermedias comparado con otras especies de áfidos plaga)	Mortalidad	Bhattacharyya *et al.* (2016)
Planococcus citri	*In vitro*	–	Prometedora (CL bajas menores a 1500 mg/L)	Mortalidad en diferentes etapas de la plaga	Al-Shammari y Al-Zubaidi (2016)
Trichoplusia n	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas)	Mortalidad	Sayed *et al.* (2017)
Agrotis ipsilon	*In vitro*	–	Regular (CL intermedias comparado con otras especies de lepidópteros plaga)	Mortalidad	Sayed *et al.* (2017)
Helicoverpa armigera	*In vitro*	–	Prometedora (mejor control que la permetrina y CL bajas de control)	Efecto sobre la mortalidad de larvas y regulación de enzimas	Kantrao *et al.* (2017); Baranitharan *et al.* (2021); Manimegalai *et al.* (2022)
Musca domestica	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas)	Efectos sobre larvas, pupas y enzimas	Abdel-Gawad (2018)
Trogoderma granarium	*In vitro*	–	Prometedora (CL bajas para alcanzar mortalidad considerable, 80% contra larvas y adultos)	Efectos negativos en el crecimiento y desarrollo del insecto	Almadiy *et al.* (2018)
Aphis gossypii	*In vitro*	–	Prometedora (CL bajas para alcanzar mortalidad considerable 80%)	Mortalidad	Khatami *et al.* (2019)
Tribolium castaneum	*In vitro*	–	Prometedora (múltiples efectos sobre la plaga)	Mortalidad, disuasión de la ovoposición, actividad repelente y actividad antialimentaria	Alif y Thangapandiyan (2019)

Continúa ▸

TABLA 1. Nanopartículas de plata (NPsAg) evaluadas contra insectos plaga, viabilidad y sus efectos (continuación).

Insectos plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
Dysdercus cingulatus	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas menores a 100 mg/L)	Mortalidad	Ramanathan *et al.* (2021)
Sitobion avenae	*In vitro*	–	Prometedora (CL intermedias para alcanzar mortalidad considerable 80%)	Efecto sobre la mortalidad de estadios móviles y la enzima glutation s-transferasa	Amjad *et al.* (2022)
Spodoptera litura	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas y alta mortalidad comparado con insecticidas de diferente grupo toxicológico)	Mortalidad y daños histológicos y modulación enzimática	Baranitharan *et al.* (2021); Jafir *et al.* (2021); Manimegalai *et al.* (2022)
Sitophilus oryzae	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas)	Mortalidad	Mosa *et al.* (2022)
Eurygaster testudinaria	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas)	Mortalidad	Ahmed *et al.* (2023)
Diaphorina citri	*In vitro*	Invernadero (*C. aurantifolia*)	Prometedora (CL muy bajas)	Mortalidad	Zavala Zapata *et al.* (2024)

[1] Concentraciones letales.
Fuente: Elaboración de los autores.

sultado mostró que las NPsAg fueron altamente efectivas contra este ácaro, causando una mortalidad mayor al 96% en la concentración más alta, lo cual indica la eficacia de NPsAg para controlar esta plaga. Los valores CL_{50} y CL_{95} para NPsAg fueron 363 y 629 mg/L, respectivamente. Los autores concluyen que las NPsAg pueden usarse como una herramienta en programas de manejo de plagas sobre *T. urticae*.

En otro estudio realizado por Abdel Ghani *et al*. (2022), para evaluar la actividad acaricida de las NPsAg contra ácaros fitófagos y depredadores en naranja trifoliada *Citrus trifoliata* L. (Rutaceae), las NPsAg mostraron actividad acaricida mayor que la bifentrina sobre las tres especies de ácaros estudiados. Las CL_{50} de NPsAg fueron 29.3, 43.9 y 27.4 mg/L y 43.3, 38.9 y 31.6 mg/L para bifentrina sobre *Phyllocoptruta oleivora* Ashmead (Acari: Eriophyidae), *Eutetranychus orientalis* Klein (Acari: Tetranychidae) y *Brevipalpus obovatus* Donnadieu (Acari: Tenuipalpidae), respectivamente. Las NPsAg también mostraron una toxicidad altamente selectiva (23 veces la CL50 de la bifentrina) hacia los ácaros fitófagos en comparación con los depredadores. Las NPsAg mostraron una eficacia comparable a la bifentrina para el control de las etapas móviles de las tres especies de ácaros y superaron a la bifentrina en actividad ovicida. Los autores concluyeron que las NPsAg se pueden utilizar como alternativa de control de *P. oleivora*, *E. orientalis* y *B. obovatus* en el cultivo de naranja trifoliada.

Al-Azzazy *et al*. (2019) evaluaron los efectos de las NPsAg en diferentes etapas del ácaro eriófido *P. oleivora*, el ácaro rojizo del tomate, *Aculops lycopersici* (Massee) (Acari: Eriophyidae) y el ácaro *T. urticae*. Además, incluyeron el impacto sobre los depredadores, *Euseius scutalis* (Athias-Henriot) y *Neosiulus cucumeris* Oudemans (Acari: Phytoseiidae), en tomate. Se exploraron cuatro concentraciones de NPsAg (54, 108, 162 y 216 mg/L). Se descubrió que las NPsAg fueron efectivas para matar *A. lycopersici* y *T. urticae* con efectos mínimos sobre *E. scutalis* y *N. cucumeris*. El porcentaje de mortalidad según las concentraciones evaluadas fue de 21, 45, 72, y 93% para *A. lycopersici* y de 19, 43, 73 y 85% para *T. urticae*, para *E. scutalis* fue de 3, 9, 17 y 24% y para *N. cucumeris* fue de 4, 13, 14 y 20%, una semana después de la exposición, respectivamente. Además, los hallazgos mostraron que las NPsAg provocaron una reducción en el porcentaje de eclosión de huevos. Los porcentajes de larvas que eclosionaron huevos fueron 68, 50, 34 y 20% para *A. lycopersici*, para *T. urticae* fueron de 79, 64, 43 y 30% una semana después de la exposición a 54, 108, 162 y 215 mg/L de NPsAg, respectivamente.

Pavela *et al*. (2017) evaluaron NPsAg fabricadas a partir del extracto de raíz de *Saponaria officinalis* L. (Caryophyllaceae) contra *T. urticae*. El extracto de raíz de *S. officinalis* como las NPsAg mostraron efecto acaricida, con una CL_{50} para las NPsAg de 1.2 g/L (CL_{90} = 2.8 g/L) y el extracto de raíz solo con una CL_{50} 7.8 (CL_{90} = 11.9 g/L). Ambos tratamientos mostraron alta toxicidad ovicida con CL_{50} de 3.1 y 13.8 g/L para las NPsAg y el extracto acuoso de raíz, respectivamente. Los autores también reportan reducción significativa de la oviposición en hembras de *T. urticae*. Asimismo, concluyen que las NPsAg pueden llegar a ser prometedoras, al mostrar una alta eficacia biológica y ser relativamente simple y barato el método de producción.

Ghani *et al*. (2022) evaluaron la actividad acaricida sobre el ácaro datilero *Oligonychus afrasiaticus* (McGregor) (Acari: Tetranychidae) y su ácaro depredador *Neoseiulus barkeri* Hughes (Phytoseiidae) bajo condiciones de laboratorio. Las NPsAg mostraron actividad significativa sobre *O. afrasiaticus* (CL_{50} de 40 mg/L) comparado con *N. barkeri* (CL_{50} de 1588 mg/L) lo cual representa aproximadamente 40 veces selectividad sobre el enemigo natural. Las NPsAg también presentaron actividad ovicida sobre *O. afrasiaticus* (CL_{50} de 68 mg/L). En el estudio en campo, las NPsAg (a 216 mg/L) alcanzaron una eficiencia ligeramente mayor a la del estudio en laboratorio, con una reducción del 86% de la población de *O. afrasiaticus*, y viéndose afectada solo el 18% de la población de *N. barkeri*. Las NPsAg redujeron la eclosión del 57% de los huevos de *O. afrasiaticus*.

En la tabla 2, se observan las diferentes especies de ácaros plaga estudiadas con las NPsAg, el tipo de evaluación, viabilidad de uso y efectos y/o daños.

Nanopartículas de oro sobre insectos

Small *et al*. (2016) evaluaron el efecto de las nanopartículas de oro (NPsAu) administradas por vía oral sobre la reproducción y desarrollo de la cucaracha

TABLA 2. Nanopartículas de plata (NPsAg) evaluadas contra insectos plaga, viabilidad y sus efectos.

Ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
Tetranychus urticae	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] bajas en diferentes etapas)	Mortalidad sobre móviles y huevos	Sharifian *et al.* (2016); Pavela *et al.* (2017); Al-Azzazy *et al.* (2019)
Aculops lycopersici	Campo	Tomate (Solanum lycopersicum)	Prometedora (reducción de la población de las etapas móviles)	Eficacia significativa sobre instares larvales y huevos	Al-Azzazy *et al.* (2019)
Eutetranychus orientalis, Phyllocoptruta oleivora, Brevipalpus obovatu	Campo	Naranjo trifoliado (Citrus trifoliata)	Prometedora (eficacia similar a la bifentrina para el control de las etapas móviles)	Eficacia significativa sobre instares móviles y huevos	Abdel Ghani *et al.* (2022)
Oligonychus afrasiaticus	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas)	Mortalidad sobre móviles y huevos	Ghani *et al.* (2022)

[1] Concentraciones letales.
Fuente: Elaboración de los autores.

alemana *Blattella germanica* (L.) (Blattodea: Blattellidae). A las hembras recién emergidas se les proporcionó alimento que contenía NPsAu (87.44 mg/L) y se les permitió aparearse con los machos. Los adultos de *B. germanica* acumularon oro de las NPsAu con un factor de bioacumulación de 0.1. La ingestión de NPsAu no afectó el tiempo de formación de la ooteca ni su eclosión. Sin embargo, la viabilidad de la ooteca disminuyó casi un 25% en las hembras tratadas con NPsAu en comparación con los controles. Al mismo tiempo, el número de ninfas nacidas disminuyó en un 33% en los tratamientos con NPsAu con respecto al control. La ingestión de NPsAu provocó efectos subletales en *B. germanica* que comprometen los rasgos de vida involucrados en la dinámica poblacional. Los autores proponen a *B. germanica* como especie modelo en estudios nanotoxicológicos para estimar los efectos de las NPsAu. Raliya *et al.* (2017) reportaron un nuevo método *in vivo* para estudiar las interacciones entre las NPsAu y el sistema nervioso de la cucaracha discoide *Blaberus discoidalis* Serville (Blattodea: Blaberidae). Se inyectaron NPsAu cargadas negativamente de 50 nm de diámetro en el sistema nervioso central (SNC) del insecto. En este estudio se demostró que las partículas cargadas afectaban la locomoción del insecto. Asimismo, afectaron el comportamiento del insecto, pero no tuvieron efectos importantes en la esperanza de vida de la cucaracha después de dos meses de observación.

Sahayaraj *et al.* (2016) realizaron un experimento de laboratorio para evaluar el impacto de la solución acuosa de oro sintetizada a partir de haba de la india (*Pongamia pinnata*), sobre la mortalidad y el desarrollo de las larvas de

Pericallia ricini (F.) (Lepidoptera: Erebidae). Los resultados mostraron que las NPsAu causaron más mortalidad que el insecticida comercial de neem (vijayneem®). Las NPsAu redujeron drásticamente el peso corporal de las larvas de *P. ricini*. Además, se observaron diferencias entre los tratamientos sobre los periodos de desarrollo, fecundidad, eclosión de larvas, pupas y adultos. Los autores señalan haber realizado evaluaciones de campo y de bioseguridad antes de recomendar la utilización de estas NPs. Chakravarthy *et al*. (2012) estudiaron el efecto de NPsAu sobre *S. litura*. Los datos revelaron que las NPs fueron efectivas y causaron un 50% de mortalidad larvaria a una concentración de 500 mg/L. La CL_{50} (216-938) incrementando a medida que aumentaban las etapas de desarrollo de la larva. El estudio demostró que las NPsAu son efectivas contra *S. litura*, por lo tanto, serían un componente útil de una estrategia de manejo integrado de plagas (MIP).

El-Ashram *et al*. (2020) estudiaron los efectos de las NPsAu sobre el escarabajo *Trachyderma hispida* (Coleoptera: Tenebrionidae). El estudio mostró daños sobre el tejido ovárico de los escarabajos, inducido por una dosis subletal de las NPsAu (0.01 mg/L). También se reportó una supresión significativa en sus niveles transcripcionales, aumento significativo en la apoptosis de las células ováricas, cambios patológicos en las células ováricas y modulación de enzimas de los escarabajos tratados. Zainol *et al*. (2023) estudiaron otro coleóptero, *Oryctes rhinoceros* (Coleptera: Scarabaeidae) pero para fines de síntesis de NPs, las pruebas citotóxicas indican un rasgo de toxicidad leve en diferentes estudios de evaluación. En conclusión, NPsAu sintetizadas de *O. rhinoceros* mejoran en estabilidad y no son tóxicas, lo cual sugiere que podrían ser prometedoras para el control de diferentes plagas.

Oliveira *et al*. (2015) investigaron a la mosca soldado negra *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomydae) como un método *in vivo* para observar la absorción y biodistribución de NPsAu en su tracto digestivo. En este estudio, se utilizó microscopía electrónica de barrido para describir el crecimiento y desarrollo de este insecto, además de detallar la morfología externa tanto de larvas como de adultos. Se encontraron NPsAu en el sistema digestivo, así como efectos amorfos sobre los estadios larvales y el adulto. Las NPsAu afectaron diferentes procesos de *H. illucens*, lo cual podría ser un modelo de estudio para determinar el efecto o los modos de acción de las NPsAu sobre dípteros.

En la tabla 3, se muestran las especies de insectos y ácaros plaga estudiadas con NPsAu, viabilidad y daños y/o efectos.

Nanopartículas de polímeros contra insectos y ácaros

Bonser *et al*. (2023) evaluaron los efectos de las nanopartículas de biopolímeros (NPsB) sobre el crecimiento y el rendimiento de soya *Glycine max* (L.) (Fabaceae). Se aplicaron NPsB, elaboradas a partir de lignina o zeína, como tratamientos para semillas de soya y pulverizaciones foliares (solo zeína) para plantas de soya. Los ensayos de alimentación de las hojas y los índices de daño indican que la susceptibilidad al ataque de herbívoros no aumentó debi-

TABLA 3. Nanopartículas de oro (NPsAu) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos.

Insectos plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
S. litura	*In vitro*	–	Regular (CL[1] intermedias comparado con otras especies de lepidópteros plaga)	Mortalidad sobre diferentes etapas larvales	Chakravarthy *et al.* (2012)
Hermetia illucens	*In vitro*	–	Modelo de estudio de los efectos de las NPsAu	El sistema digestivo, así como efectos amorfos sobre los estadios larvales y el adulto	Oliveira *et al.* (2015)
Blattella germanica	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas menores a 100 mg/L)	Efectos en reproducción y desarrollo	Small *et al.* (2016)
Pericallia ricini	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas) los resultados mostraron más mortalidad que el insecticida comercial de neem (vijayneem®)	Desarrollo, fecundidad, eclosión de larvas, pupas y adultos	Sahayaraj *et al.* (2016)
Blaberus discoidalis	*In vitro*	–	Modelo de estudio de los efectos de las NPsAu	Afectaciones al sistema nervioso central y algunos parámetros poblacionales	Raliya *et al.* (2017)
Trachyderma hispida	*In vitro*	–	Prometedora (concentraciones subletales muy bajas menores a 1 mg/L)	Efectos celulares y en sistema endocrino	El-Ashram *et al.* (2020)

[1] Concentraciones letales.
Fuente: Elaboración de los autores.

do a las NPsB. Las aplicaciones foliares de las NPsB mejoraron variables agronómicas del cultivo; además, indicaron efectos sobre la mortaliad de *Chrysodeixis includens* comparado con metoxifenocide (Intrepid 2F®).

Ahmadi *et a*l. (2018) evaluaron el aceite esencial de *Satureja hortensis* L. (Lamiaceae) encapsulado en NPs de quitosano/tripolifosfato. Los resultados obtenidos demostraron efectos ovicidas, adulticidas y de persistencia contra *T. urticae*. Los valores de la CL_{50} contra ácaros adultos fueron de 47 µL/L después de 24 h, y 31 µL/L después de 72 h de exposición. También reportan un efecto fumigante de las NPs a las 24 h con valores de CL_{50} 212 µL/L. Se observó una liberación prolongada durante los 25 días del estudio, lo cual indica la persistencia de la actividad acaricida durante un largo tiempo. Los autores destacan que el aumento de la toxicidad residual de los fumigantes puede estar relacionado con la lenta liberación del ingrediente activo, pudiendo ser potencialmente aplicable en el control de *T. urticae*. También Zhou *et al.* (2023) evaluaron el quitosano, como nanoportador genético, para mejorar la eficiencia de la interferencia de ARN (ARNi). Los resultados mostraron que

las NPs de quitosano/ARNds mejoraron significativamente la estabilidad y la eficiencia de la absorción celular. Los ensayos revelaron que las NPs de quitosano/dsRNA regulaban positivamente el gen clave de cadena pesada de clatrina (CHC) para activar la vía endocitosis dependiente de clatrina (CDE); además, la inhibición de CDE obstaculizó las respuestas robustas de ARNi de las NPs de quitosano/ARNds. También se confirmó que las NPs de quitosano/ARNds se unían directamente a la proteína CHC, componente central de la CDE, para mejorar la eficiencia del ARNi. Los autores resaltan la relevancia del mecanismo molecular mediante el cual el ARNi basado en NPs de quitosano administra ARNds para mejorar la eficiencia del ARNi. El mecanismo anterior promoverá la utilización de ARNi basado en nanoportadores en el manejo de plagas y la entrega de genes. En la tabla 4, se observan las dos especies de insectos y ácaros plaga, el polímero evaluado, su viabilidad y daños.

TABLA 4. Nanopartículas de polímeros (NPsP) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos.

Polímero	Insectos y ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
Quitosano / tripolifosfato	*T. urticae*	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] bajas)	Efectos ovicidas y adulticidas	Ahmadi *et al.* (2018); Zhou *et al.* (2023
Zeína	*Chrysodeixis includens*	Campo	Soya (*G. max*)	Prometedora (CL muy bajas) comparadas con metoxifenocide	Efectos sobre la fluctuación poblacional de *C. includens*	Bonser *et al.* (2023)

[1] Concentraciones letales.
Fuente: Elaboración de los autores.

Nanopartículas de sílice y aluminio contra insectos y ácaros

Rouhani *et al*. (2019) reportaron efectos importantes de nanopartículas de silicio (NPsSi) sobre plagas de granos almacenados. Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar la eficacia de las NPsSi contra larvas y adultos de *Sitophilus granarius* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) en trigo almacenado. Se descubrió que las NPsSi fueron muy efectivas contra *S. granarius* y causaban una mortalidad del 100% después de 2 semanas. Otro estudio en plagas de almacén lo realizaron Haroun *et al*. (2020), quienes evaluaron la eficiencia insecticida de NPsSi en adultos del gorgojo del arroz *S. oryzae*, *T. castaneum* y *C. maculatus*. Los resultados mostraron que las NPsSi presentaron efecto tóxico sobre *S. oryzae* y *C. maculatus* en la concentración más alta, mientras que *T. castaneum* mostró alta resistencia contra las NPsSi. Al final del experimento, la mortalidad registrada fue de 82, 98 y 58% a la mayor concentración (0.3, 2 y 8 mg/kg) de NPsSi contra *C. maculatus*, *S. oryzae* y *T. castaneum*, respectivamente. Además, las NPs provocaron altas reducciones en la progenie F1 contra *C. maculatus* y *S. oryzae*.

NPsSi fueron elaboradas por Pavitra *et al*. (2018) como una alternativa para el pulgón *A. gossypii* y la cochinilla del algodón *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae). Las NPsSi causaron mortalidad a la concentración de 2000 mg/L, tanto en el pulgón como en la cochinilla. La actividad pesticida de las NPsSi reveló que, a una concentración de 2000 mg/L, se registró la mortalidad máxima de las dos especies de insectos.

Un estudio realizado por Wang *et al*. (2023), sobre el barrenador del maíz *Ostrinia furnacalis* (Guenee) (Lepidoptera: Crambidae) con NPsSi en un sistema de nanorrespuesta acompañadas del insecticida spinosad, se encontró que el spinosad resultante demostró una alta capacidad de carga (39%) y una fotoestabilidad mejorada para responder de manera inteligente al microambiente intestinal del barrenador del maíz y lograr la liberación inteligente. En comparación con el pesticida convencional, el spinosad mostró una eficacia superior en el control de *O. furnacalis* y pudo ser absorbido y transportado en las plantas de maíz sin efectos adversos sobre su crecimiento. Las NPsSi acompañadas con spinosad mejoraron significativamente el control, liberación, activación, y el efecto sobre los organismos no objetivo se redujo significativamente. Martins *et al*. (2019) caracterizaron y evaluaron un sistema de administración a base de aceite de neem (AN) y nanosílice. Los resultados mostraron que el desempeño reproductivo de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) se vio afectado negativamente y estuvo influenciado por el tipo de sistema (NPsSi y AN) y su concentración en la dieta. Este impacto en el desarrollo de la palomilla puede explicarse por los efectos sobre la fisiología nutricional y utilización de alimentos en larvas alimentadas con la dieta, sugiriendo una afectación enzimática. Los autores resaltan los hallazgos y sugieren una posible alternativa para el manejo integral de *S. frugiperda*.

Alimohamadian *et al*., (2022), evaluaron el efecto de las NPsSi en el control del segundo estadio larvario del gusano soldado *Spodoptera exigua* Hubner (Lepidoptera: Noctuide), en condiciones de laboratorio y de campo. El valor de la CL_{50} de las NPsSi contra el segundo estadio larvario después de 24, 48 y 72 horas en aspersión de polvo, inmersión de hojas y aspersión de solución fue (660, 43, 893), (460, 833, 690) y (279, 565, 323) mg/L, respectivamente. En campo, el resultado de la evaluación de mortalidad y daño mostró que los tratamientos del polvo tuvieron diferencias significativas con el tratamiento control ($p \leq 0.05$). Un estudio similar, pero con otra especie de este género, lo realizaron El-Bendary y El-Helaly (2013) sobre *Spodoptera littoralis* Boisduval (Lepidoptera: Noctuide) con NPsSi en tomate. Las NPsSi resultarón tener acción tóxica alta en todas las concentraciones utilizadas sobre *S. littoralis*. Además, las NPsSi le confirieron una alta resistencia a las plantas de tomate contra esta plaga, especialmente a 300 y 350 mg/L. Las NPsSi mejoraron la resistencia a la plaga, además de tener un efecto tóxico sobre la misma.

Thabet *et al*. (2021) emplearon NPsSi en diferentes concentraciones (75-425 mg/L) en habas y soya. Se monitorearon las plagas, el pulgón *Aphis craccivora* Koch (Hemiptera: Aphididae), *Liriomyza trifolii* (Burgess) (Diptera: Agromyzidae)

y *S. littoralis*, junto con sus depredadores. En los experimentos de campo, las NPsSi redujeron las poblaciones de los tres insectos plaga asociados con los cultivos y sus depredadores asociados. Sin embargo, en los campos de soya, el número total de depredadores aumentó después de aplicar la concentración más baja. Las NPsSi afectaron la antixenosis. En laboratorio, las NPsSi a 400 mg/L inhibieron el desarrollo de las raíces de haba, pero no afectaron el porcentaje y el tiempo de germinación, además de la longitud de los tallos.

Elsadany *et al*. (2015) evaluaron el efecto de las NPsSi para controlar la araña roja *Tetranychus cucurbitacearum* (Sayed) (Acari: Tetranychidae) en plantas de soya. Se pulverizaron tres concentraciones de NPsSi (250, 350 y 450 mg/L) en dos variedades de soya: Giza 35 y Giza 111, durante la temporada 2014. Los resultados indicaron que la reducción de la población de ácaros dependió de la concentración ensayada. La concentración de 450 mg/L de NPsSi obtuvo el porcentaje de reducción más alto de ácaros en las dos variedades (79-62%). Las etapas móviles del ácaro en la variedad Giza 111 fueron más susceptibles a las NPsSi que en la variedad Giza 35. En un estudio similar, Emam *et al*. (2021) evaluaron el efecto de las NPsSi para controlar *T. urticae* bajo condiciones de invernadero en el cultivo de pepino. Las NPs mostraron mortalidad sobre el estado larvario (99%), seguido del huevo con 98%. Además, en la etapa de ninfa se observó una alta mortalidad (94%) a una concentración de 1500 mg/L. Mientras que las hembras adultas registraron una mortalidad de 92% a las 72 h. En las hembras tratadas después de 96 h, se observó una fuerte disminución en el promedio de huevos a las concentraciones de 1000 y 1500 mg/L. En los ácaros, la actividad de la acetilcolinesterasa (AChE) se inhibió significativamente a 1500 mg/L, mientras que la glutatión-S-transferasa aumentó significativamente después de 72 h. Las NPsSi afectaron estados inmaduros de *T. urticae* en condiciones de invernadero y laboratorio.

Otro estudio sobre este ácaro lo realizó Zayed (2022), quien evaluó bajo condiciones de laboratorio la sílice a granel, NPsSi, y dos agentes de síntesis (sílice a granel-abamectina y NPsSi-abamectina) contra *T. urticae*. Los resultados mostraron que las NPsSi recubiertas con abamectina tuvieron una influencia significativa en la disminución de los huevos ovipositados por las hembras adultas. Además, las NPsSi-abamectina fueron el tratamiento más eficaz para la disminución de huevos y su viabilidad. Esta investigación revela que el sílice en masa y NPsSi podrían emplearse como sustitutos o complementos de los acaricidas convencionales y son compatibles con los diferentes componentes de MIP. En la tabla 5, se muestran las especies de insectos y ácaros plaga, las cuales han sido evaluadas con nanopartículas de sílice y/o aluminio (NPsSi -NPsAl).

Nanopartículas de titanio contra insectos y ácaros

Shaker *et al*. (2017) evaluaron los efectos de la aplicación de nanopartículas de dióxido de titanio (NPsTiO_2) sobre la supervivencia y biología de *S. littoralis*. El ensayo consistió en 6 concentraciones: 1000, 500, 250, 125, 62.5 y 31.25 mg/L. El valor de la CL_{50} en las larvas del segundo estadio tratadas con NPsTiO_2

TABLA 5. Nanopartículas de sílice y aluminio (NPsSi -NPsAl) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos.

Insectos y ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
Tetranychus cucurbitacearum	Campo	Soya (*G. max*)	Prometedora (reducción de las poblaciones de ácaros a dosis inferiores a 500 mg/L)	Eficacia biológica y mejora de las características agronómicas de cultivo	Elsadany *et al.* (2015)
Aphis gossypii y *Phenacoccus solenopsis*	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] bajas y alto nivel de mortalidad comparado con dinotefuran)	Efecto sobre la mortalidad	Pavitra *et al.* (2018)
Sitophilus granarius	*In vitro*	Trigo (*Triticum aestivum*)	Prometedora (CL muy bajas y alta mortalidad)	Efectos sobre larvas y adultos	Rouhani *et al.* (2019)
Spodoptera frugiperda	*In vitro*	–	Prometedora (control competitivo comparado con el testigo comercial, además de múltiples modos de acción)	Efectos sobre el desarrollo de la plaga, antialimentarios y sobre las enzimas	Martins *et al.* (2019)
S. oryzae, T. castaneum y *C. maculatus*	*In vitro*	–	Prometedora (CL bajas y alto nivel de mortalidad), excepto en *T. castaneu*, donde el control fue regular	Efecto sobre la mortalidad, progenie (F1) y daños histológicos	Haroun *et al.* (2020)
Spodoptera littoralis	*In vitro* y campo	–	Prometedora (efecto en todas las etapas de desarrollo de la plaga)	Efecto sobre todo el ciclo de la plaga, además de efectos sobre oviposición (F1)	El-Bendary y El-Helaly (2013); Thabet *et al.* (2021)
Aphis craccivora y *Liriomyza trifolii*	Campo	Haba (*Vicia faba*) y Soya (*G. max*)	Prometedora (efecto sobre las plaga, además de un impacto mínimo en sus enemigos naturales)	Reducción de la densidad de las dos plagas (eficacia biológica), mínimo impacto a poblaciones de EN[2] e incremento en variables agronómicas en los dos cultivos	Thabet *et al.* (2021)
Spodoptera exigua	*In vitro*	–	Prometedora (control competitivo en campo por diferentes vías de exposición)	Mortalidad sobre instares larvales	Alimohamadian *et al.* (2022)
T. urticae	*In vitro* e *Invernadero*	Pepino (*Cucumis sativus*)	Prometedora (efecto sobre todos los instares de *T. urticae* a dosis inferiores a 1500 mg/L) además de alta competitividad comparado con abamectina	Eficacia biológica, además de reducción de la actividad de la acetilcolinesterasa, glutatión-S-tranferasa y progenie	Emam *et al.* (2021); Zayed (2022)

Continúa ▸

TABLA 5. Nanopartículas de sílice y aluminio (NPsSi -NPsAl) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos (continuación).

Insectos y ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
Ostrinia furnacalis	Campo	Maíz	Prometedora (control competitivo comparado con el spinosad, además de CL bajas y bajo impacto en especies no objetivo)	Eficacia biológica sobre *O. furnacalis*	Wang *et al.* (2023)

[1] Concentraciones letales.
[2] Enemigos naturales.
Fuente: Elaboración de los autores.

fue de 62 mg/L y el valor de la CL_{50} fue de 125 mg/L para el cuarto estadio. Vía ingesta, estas Nps afectaron en mayor medida al segundo instar. Hameed *et al*. (2023) evaluaron el extracto acuoso de *Chlorella vulgaris* Beijerinck (Chlorellaceae) como agente reductor de $NPsTiO_2$ para controlar *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae), los porcentajes de mortalidad alcanzaron el 100% frente al primer estadio larvario, 70% frente al tercer estadio larvario y el 93% sobre moscas adultas. También se observaron deformidades en moscas tratadas con NPsTiO2, incluyendo no emergencia de huevos y pupas, desarrollo incompleto de la cabeza, patas y alas, además de la desaparición de los órganos genitales. El estudio demostró que *C. vulgaris* es un buen candidato para la nanofabricación de $NPsTiO_2$ y un rico nanopesticida de origen natural.

Gutiérrez *et al*. (2021) evaluaron el efecto de $NPsTiO_2$ sobre ninfas de *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) en tomate bajo condiciones de laboratorio e invernadero. En laboratorio, las $NPsTiO_2$ causaron mortalidad de 99% a 96 horas después de la aplicación (dda). La aspersión directa en plantas de tomate presentó baja mortalidad con 32%, 96 horas dda. Estos resultados son un primer avance del control de *B. cockerelli* con $NPsTiO_2$ en invernadero.

Dentro de los estudios con ácaros, Senbill *et al*. (2023) evaluaron bajo condiciones de laboratorio e invernadero la toxicidad y eficacia residual de las $NPsTiO_2$ en comparación con la abamectina contra hembras adultas de *T. urticae* y sus efectos sobre el ácaro depredador *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari: Phytoseiidae). En los bioensayos de laboratorio, el valor de la CL_{50} de $NPsTiO_2$ fue de 5.82 mg/L, en comparación con 4.90 mg/L en abamectina 72 horas después del tratamiento. Los porcentajes más altos de mortalidad en las poblaciones de *T. urticae* fueron de 92% después de 24 h de aspersión con $NPsTiO_2$, en comparación con 98% en abamectina. Además, las $NPsTiO_2$ probadas mostraron menos toxicidad sobre las poblaciones de *N. californicus*.

En la tabla 6, se muestran los insectos y ácaros plaga estudiados con $NPsTiO_2$, el tipo de evaluación, viabilidad de uso, daños y/o efectos.

TABLA 6. Nanopartículas de titanio ($NPsTiO_2$) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos.

Insectos y ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
S. littoralis	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] bajas menores a 1000 mg/L)	Mortalidad larval y efectos sobre la pupa	Shaker *et al.* (2017)
Bactericera cockerelli	Invernadero	Tomate (*S. lycopersicum*	Prometedora (CL inferiores a 3000 mg/L)	Mortalidad	Gutiérrez *et al.* (2021)
Musca domestica	*In vitro*	–	Prometedora (control similar que el imidacloprid y CL menores a 1000 mg/L)	Mortalidad, deformidades, no emergencia de huevos y pupas, desarrollo incompleto de la cabeza, patas y alas, además de la desaparición de los órganos genitales	Hameed *et al.* (2023)
T. urticae	*In vitro*	–	Prometedora (CL competitivas con abamectina y menores a 10 mg/L)	Mortalidad sobre adultos, además de mostrar selectividad sobre EN[2]	Senbill *et al.* (2023)

[1] Concentraciones letales.
[2] Enemigos naturales.
Fuente: Elaboración de los autores.

Nanopartículas de zinc contra insectos y ácaros

Abdel-Gawad (2018) utilizó el extracto de hoja de *M. oleifera* Lam (Mo-LE) para sintetizar nanopartículas de óxido de zinc (Mo-ZnONP) contra *M. domestica*. En el bioensayo larvicida, el valor de CL_{50} fue de 6.41 mg/mL. Además, se determinó la CL_{50} para pupas, la cual fue de 17, 10 mg/mL. Las larvas tratadas con CL_{50} de Mo-ZnONP redujeron de forma significativa la fecundidad de las hembras y la eclosión de los huevos. El contenido total de proteínas y las actividades de las enzimas esterasas no específicas, acetilcolina esterasa y glutatión *S*-transferasa disminuyeron significativamente después de que las larvas se alimentaron con dietas tratadas con CL_{50} de las Mo-ZnONP.

Gutiérrez *et al*. (2021) evaluaron el efecto de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) sobre ninfas de *B. cockerelli* en tomate, bajo condiciones de laboratorio e invernadero. En laboratorio, las NPsZnO causaron mortalidad del 88% a 96 dda. La aspersión directa en plantas presentó baja mortalidad con 27% a 96 horas dda. Rouhani *et al*. (2012) estudiaron otro insecto chupador: *A. nerii*, en este estudio se investigó la actividad insecticida de NPsZnO. En los experimentos, la CL_{50} para las NPsZnO fue de 424 mg/L. El resultado mostró que las NPsZnO pueden ser usadas como una herramienta valiosa en programas de manejo del pulgón *A. nerii*.

En plagas de almacén, Haroun *et al*. (2020) evaluaron la eficiencia insecticida de nanopartículas de zinc (NPsZn) contra: adultos de *S. oryzae*, *T. casta-*

neum y *C. maculatus*. Los resultados para *T. castaneum* y *C. maculatus* mostraron que las NPsZn presentaron un efecto tóxico significativo contra *S. oryzae* y *C. maculatus*, mientras que *T. castaneum* mostró alta resistencia contra las NPsZn. La mortalidad fue de 88, 100 y 38% en *C. maculatus*, *S. oryzae* y *T. castaneum* a una concentración de 0.6, 2.5 y 8 mg/kg de NPsZn, respectivamente. Además, las NPs provocaron altas reducciones en la progenie (F1) contra *C. maculatus* y *S. oryzae*. Rouhani *et al*. (2019) reportaron efectos de NPsZn sobre *S. granarius*, plaga importante de granos almacenados. Se realizaron pruebas contra la etapa larvaria y los adultos de *S. granarius* en trigo almacenado. Se descubrió que las NPsZn fueron moderadamente efectivas contra esta plaga, teniendo efecto de protección en los granos durante 15 días dda, pero los efectos sobre la mortalidad no fueron significativos.

Attia *et al*. (2015) realizaron ensayos para evaluar las NPsZn en comparación con pirmifos metílico sobre adultos de *S. oryzae* en condiciones de laboratorio. Las CL_{50} van desde 0.44-0.45 mg/L a los 3 y 15 días dda, respectivamente. Además, las Nps afectaron significativamente el número de descendencia (progenie). Méndez *et al*. (2022) determinaron el efecto de las NPsZn de *Crotalaria longirostrata* Hook. & Arn. (Fabaceae) sobre la mortalidad de insectos y la viabilidad celular de la cochinilla del algodón *P. solenopsis*. Las NPsZn mostraron una actividad insecticida contra *P. solenopsis* mayor al 60% de mortalidad, después de 96 h dda. Los estudios de viabilidad celular muestran un efecto de las NPs; sin embargo, los autores sugieren más estudios acerca de modos de acción de las NPs sobre los insectos chupadores.

La mosca blanca *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) y su parasitoide *Eretmocerus mundus* (Mercet) (Hymenoptera: Aphelinidae) fueron tratados con NPsZnO (Taheri *et al*., 2020). Los valores de la CL_{50} en huevos y ninfas de *B. tabaci* fueron 7.49 y 6.93 mg/L, 3 días dda, respectivamente. El valor de la CL_{50} sobre *E. mundus* fue de 11.30 mg/L mostrando susceptibilidad a la aplicación de las NPsZnO. En los estudios de campo sobre *B. tabaci* las NPsZnO mostraron eficacia menor al 50%. Otro estudio similar realizado fue por Khooshe *et al*., (2016) sobre *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Hemiptera: Aleyrodidae), donde examinaron los efectos de las NPsZnO y *Beauveria bassiana* en adultos. En los bioensayos, los adultos fueron expuestos a diferentes concentraciones de NPsZnO (3, 5, 10, 15, 20 mg/L) y *B. bassiana* (10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8 esporas mL^{-1}). Los valores de la CL_{50} para NPsZnO y hongos fueron de 7.35 mg/L y 3.28×10^5 esporas mL^{-1}, respectivamente. Las tasas de mortalidad obtenidas con NPsZnO y hongos en la concentración más alta fueron de 92 y 89%, respectivamente. Los resultados indican un efecto positivo de las NPsZnO y de *B. bassiana* en adultos de esta mosca blanca.

En un estudio realizado por Thakur *et al*. (2022), se evaluaron NPsZnO sintetizadas a partir de *Zingiber officinale* Roscoe (Zingiberaceae) sobre plagas asociadas con el tomate (*S. litura* y *M. euphorbiae*). Tras la aplicación de NPsZnO en diferentes concentraciones, las larvas del tercer estadio de *S. litura* y

los adultos de *M. euphorbiae* mostraron una mortalidad del 100% a 500 mg/L de NPsZnO en un periodo de exposición de 144 h. Los hallazgos demostraron la eficacia de las NPsZnO sintetizadas a partir del extracto de *Z. officinale*. Jameel *et al*. (2020) estudiaron los efectos de NPsZnO con tiametoxam sobre el cuarto estadio de *S. litura*. A estas larvas se les permitió alimentarse del compuesto de NPsZnO con tiametoxam (10-90 mg/L) y hojas de ricino (*Ricinus comunis*) impregnadas de tiametoxam. Las observaciones mostraron un aumento de la mortalidad larvaria (27%), malformación de pupas y adultos, emergencia tardía y reducción de la fecundidad y la fertilidad en los diferentes tratamientos de las NPsZnO. También se observó una variación significativa en las enzimas como en la superóxido dismutasa (SOD), la glutatión- *S* -transferasa (GST) y las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) en las larvas tratadas con las NPs.

Otro estudio con integrantes del género *Spodoptera* lo realizó Pittarate *et al*. (2021) con *S. frugiperda*, donde se determinó la eficacia de las NPsZnO. El desarrollo del insecto, que se alimentó con las NPsZnO se vio afectado significativamente; además, el número de días que tardó en completar su ciclo de vida tuvo una diferencia significativa respecto al control. Asimismo, existió una diferencia significativa en la emergencia de los adultos, varias malformaciones a lo largo del ciclo de vida y la fecundidad de las hembras se vio muy afectada en todas las concentraciones de NPsZnO. Los hallazgos de este estudio sugieren la posibilidad de explotación NPsZnO no solo para erradicar *S. frugiperda*, sino también para reducir significativamente su población.

Un ensayo con *H. armigera* fue realizado por Murugan *et al*., (2018). En esta investigación documentaron la eficacia de NPsZnO sintetizadas a partir de la macroalga *Sargassum wightii* (Sargassaceae). Dosis bajas del extracto de *S. wightii* y NPsZnO mostraron toxicidad larvicida y efectos sobre la pupa. La CL_{50} de NPsZnO osciló entre 12 mg/L (L1) y 20 mg/L para la pupa. Las larvas tratadas dejaron de alimentarse, además los índices nutricionales y la digestibilidad disminuyeron significativamente.

Senbill *et al*. (2023) estudiaron el efecto de NPsZnO sobre *T. urticae* y su depredador *N. californicus*. En laboratorio, el valor de la CL_{50} fue de 7 mg/L, en comparación con 4.9 mg/L en abamectina 72 horas después del tratamiento. Las NPsZnO tuvieron un efecto de prolongación del desarrollo, acortan de 33 a 24 días el promedio de vida de los adultos de *T. urticae*, además las hembras tratadas produjeron menos huevos. Los porcentajes de mortalidad más altos en las poblaciones de *T. urticae* fueron 90% después de 24 h con 98% en la abamectina. Por el contrario, las NPsZnO demostraron menos toxicidad en poblaciones de *N. californicus*, sin fitotoxicidad en las hojas tratadas. Otro estudio con *T. urticae* lo realizaron Rasim *et al*. (2021), en el cual efectuaron experimentos de laboratorio y de invernadero para valorar la eficacia de NPsZnO comerciales. En laboratorio, las NPsZnO a 100 mg/L causaron una mortalidad del 100%. En invernadero, las NPsZnO a100 mg/L causaron fitotoxicidad, caso contrario al tratamiento de 5 mg/L donde no causó ninguna

fitotoxicidad y disminuyó la densidad de ácaros. El porcentaje promedio de área foliar dañada fue del 25% en las plantas no tratadas y de 0.9% en las plantas tratadas con NPsZnO a 5 mg/L. Estos resultados sugieren que la aplicación de NPsZnO a 5 mg/L puede usarse como estrategia de manejo integrado de *T. urticae*.

En la tabla 7, se muestran las especies de insectos y ácaros plaga estudiados con nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO), viabilidad de uso y efectos y/o daños.

TABLA 7. Nanopartículas de zinc (NPsZnO) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos.

Insectos y ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
A. nerii	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] bajas y alta mortalidad comparado con imidacloprid)	Mortalidad	Rouhani *et al.* (2012)
Trialeurodes vaporariorum	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas y alta mortalidad en concentraciones menores a 20 mg/L, además de competitividad en control comparada con *B. bassiana*)	Mortalidad sobre adultos de *T. vaporariorum*	Khooshe *et al.* (2016)
M. domestica	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas)	Efectos sobre larvas, pupas y enzimas	Abdel-Gawad (2018)
H. armigera	*In vitro*	–	Prometedora (CL menores a 50 mg/L, afectan a todos los estadios expuestos a las NPs)	Toxicidad larvicida y efectos sobre la pupa	Murugan *et al.* (2018)
S. granarius	*In vitro*	Trigo (*T. aestivum*)	Prometedora (CL muy bajas y alta mortalidad)	Efectos sobre larvas y adultos	Rouhani *et al.* (2019)
S. oryzae, *T. castaneum* y *C. maculatus*	*In vitro*	–	Prometedora (CL bajas y alto nivel de mortalidad), excepto en *T. castaneu*, donde el control fue regular	Efecto sobre la mortalidad, progenie (F1) y daños histológicos	Attia *et al.* (2015); Haroun *et al.* (2020)
Bemisia tabaci	*In vitro*	–	Regular (las dosis más altas controlan 50% de población)	Mortalidad y selectividad al EN[2] de la plaga	Taheri *et al.* (2020)
S. litura	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas y alta mortalidad en concentraciones menores a 500 mg/L, además de competitividad comparada con tiametoxam)	Mortalidad sobre larvas y modulación de enzimas	Thakur *et al.* (2022); Jameel *et al.* (2020)

Continúa ▸

TABLA 7. Nanopartículas de zinc (NPsZnO) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos (continuación).

Insectos y ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
S. frugiperda	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] muy bajas, alta mortalidad y múltiples efectos)	Emergencia de los adultos, malformaciones en el ciclo de vida y afectaciones a la fecundidad de las hembras	Pittarate *et al.* (2021)
B. cockerelli	*In vitro*	–	Prometedora (CL inferiores a 3000 mg/L)	Mortalidad	Gutiérrez *et al.* (2021)
P. solenopsis	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas y alta mortalidad)	Mortalidad y daño celular	Méndez *et al.* (2022)
M. euphorbiae	*In vitro*	–	Prometedora (CL muy bajas y alta mortalidad en concentraciones menores a 500 mg/L, además de competitividad comparada con Imidacloprid)	Mortalidad sobre adultos	Thakur *et al.* (2022)
T. urticae	*In vitro* e *Invernadero*	Tomate (*S. lycopersicum*)	Prometedora (CL competitivas con abamectina y menores a 10 mg/L)	Mortalidad sobre móviles y huevo, además de mostrar selectividad sobre EN[2]	Rasim *et al.* (2021); Senbill *et al.* (2023)

[1] Concentraciones letales.
[2] Enemigos naturales.
Fuente: Elaboración de los autores.

Nanopartículas de cobre sobre insectos y ácaros

Méndez *et al*. (2022) evaluaron el impacto de las nanopartículas de cobre (NPsCuO) de *C. longirostrata* sobre la mortalidad y la viabilidad celular de la cochinilla del algodón *P. solenopsis*. Las NPsCuO de *C. longirostrata* mostraron una actividad insecticida contra *P. solenopsis* con un 63% de mortalidad después de 96 h dda. Sin embargo, se necesitan más estudios sobre la nanotoxicidad de las NPsCuO de *C. longirostra* para revelar el mecanismo exacto de la toxicidad de las NPs en los insectos.

Vivekanandhan *et al*. (2021) evaluaron NPsCuO utilizando el extracto de *Annona squamosa* L. (Annonaceae), sobre *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). Las larvas del insecto fueron expuestas a una dosis de 170 µg/L, generando una mortalidad significativa 24 horas dda sobre *T. molitor*. El presente estudio sugiere que este nanopesticida puede afectar el crecimiento y desarrollo de las larvas de *T. molitor*. Además, los resultados de las evaluaciones sobre las especies no objetivo, señalan baja toxicidad por parte de las NPsCu.

Al-Hamdani y Hameed (2023) realizaron evaluaciones de NPsCuO utilizando el extracto acuoso de *Citrus aurantium* (Rutaceae) sobre mosca blanca (B.

tabaci). Los resultados del estudio mostraron que las NPsCuO fueron efectivas en la mortalidad de ninfas, huevos e insectos a las concentraciones de 100, 200 y 300 mg/L, los porcentajes de mortalidad respondieron a las dosis evaluadas.

Rahman *et al*. (2022) estudiaron las NPsCuO sobre *S. frugiperda*. Cuatro concentraciones fueron evaluadas (10, 100, 300 y 500 mg/L), 24 h dda con las NPsCuO en la concentración más alta evaluada, se observó una notable actividad larvicida (97%, 94% y 81% en larvas del tercer, cuarto y quinto estadio, respectivamente). Las NPsCuO causaron una alta actividad antialimentaria de 98% en las larvas del tercer, cuarto y quinto estadio. Asimismo, se redujeron significativamente los niveles de hemocitos 24 h dda, los recuentos y tamaños de hemocitos cambiaron en el tratamiento con NPsCuO en comparación con el control. Después de 24 h dda los niveles de la enzima acetilcolinesterasa disminuyeron. Otro estudio realizado por Pittarate *et al*. (2023) con NPsCuO y hongos entomopatógenos muestra resultados prometedores a dosis de 1000-10,000 mg/L, teniendo cierta compatibilidad con cada uno de ellos, es decir, las NPsCuO según la concentración pueden ser compatibles con los hongos entomopatógenos. La mortalidad observada va de 63 hasta el 98%. Las NPsCuO causaron bajo impacto en el suelo (ph y nutrientes). Los autores mencionan toxicidad en el cuarto estadio de *S. frugiperda*; además, no reportan fitotoxicidad en el cultivo de maíz.

León *et al*. (2019) llevaron a cabo un estudio contra *P. solenopsis*, especie invasora asociada con plantas de algodón en varios países. Se investigó el efecto pesticida de NPsCuO, sintetizadas a partir de extracto de hoja de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. (Fabaceae) y *Pluchea sericea* Coville (Asteraceae). La toxicidad de NPsCuO fue significativa en ambas plantas contra *P. solenopsis* después de 96 h. Los porcentajes de mortalidad de *P. solenopsis* fueron de 14 y 20% ante la exposición a NPsCuO de *P. sericea* y *P. julifora*, respectivamente. Los ensayos de viabilidad para las NPsCuO de *P. sericea* y *P. julifora* indicaron reducción significativa de la viabilidad celular de *P. solenopsis* de 30 y 38%, respectivamente.

Diferentes investigaciones se han realizado con ácaros fitófagos con NPsCuO; Al-Azzazy y Ghani (2024) evaluaron la efectividad de las NPsCuO contra los estadios del ácaro *P. oleivora*, *E. orientalis* y *B. obovatus*, incluyendo sus impactos sobre los ácaros depredadores, *Amblyseius swirskii* y *E. scutalis* en naranjos en campo abierto. Los resultados obtenidos indicaron que la tasa de mortalidad de ácaros fitófagos y depredadores estaba asociada con un aumento en las concentraciones de las NPsCuO. Las NPsCuO fueron significativamente efectivas para controlar *P. oleivora*, *E. orientalis* y *B. obovatus* con efectos mínimos sobre *A. swirskii* y *E. scutalis*. Según los resultados, el uso de NPsCuO tuvo un efecto significativo en la reducción de la población de ácaros fitófagos asociados a los naranjos, con bajos efectos perjudiciales sobre los ácaros depredadores.

En la tabla 8, se muestran las especies de insectos y ácaros plaga estudiados con nanopartículas de cobre (NPsCuO), su viabilidad de uso, además de sus daños y/o efectos.

TABLA 8. Nanopartículas de cobre (NPsCuO) evaluadas contra insectos y ácaros plaga, viabilidad y sus efectos.

Insectos y ácaros plaga	Tipo de evaluación	Cultivo	Viabilidad de uso (mala, regular o prometedora)	Daños/efectos	Autor(es)
Tenebrio molitor	*In vitro*	–	Prometedora (CL[1] bajas menores a 200 mg/L)	Mortalidad larval	Vivekanandhan *et al.* (2021)
P. solenopsis	*In vitro*	–	Regular - Prometedora (susceptibilidad depende de concentraciones altas de las NPs)	Mortalidad y viabilidad celular	León *et al.* (2019); Méndez *et al.* (2022)
S. frugiperda	*In vitro*	–	Prometedora (concentraciones menores a 500 mg/L afectan los diferentes estados de desarrollo del lepidóptero)	Mortalidad, actividad antialimentaria, redujeron significativamente los niveles de hemocitos y afectaciones a la enzima acetilcolinesterasa	Rahman *et al.* (2022)
B. tabaci	*In vitro*	–	Prometedora (CL menores a 300 mg/L afectan los diferentes estados de desarrollo de la plaga)	Efectivas sobre la mortalidad de ninfas, huevos e insectos adultos	Al-Hamdani y Hameed (2023)
Agrotis ipsilon	*In vitro*	–	Regular (concentraciones de 10% de las NPsCu fueron evaluadas sobre el lepidóptero)	Mortalidad	Pittarate *et al.* (2023)
P. oleivora, *E. orientalis* y *B. obovatus*	Campo	Naranja (*Citrus sinensis*)	Prometedora (concentraciones menores a 320 mg/L afectaron las poblaciones de las diferentes especies de ácaros)	Efecto sobre la mortalidad y la oviposición de las especies ácaros	Al-Azzazy y Ghani (2024)

[1] Concentraciones letales.
Fuente: Elaboración de los autores.

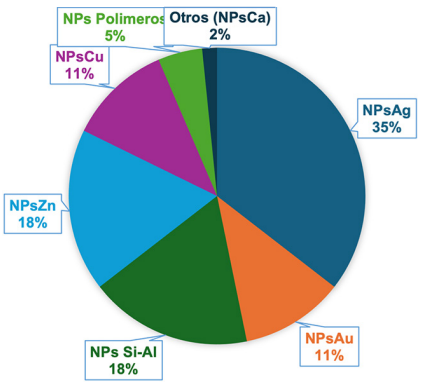
Nanopartículas de calcio contra insectos

Dentro de la exploracion de las NPsCa encontramos a Hua *et al.* (2015), quienes compararon los efectos del carbonato de nanocalcio y el carbonato de calcio coloidal. Las pruebas de campo con la cochinilla roja de California *Aonidiella aurantii* (Maskell) (Hemiptera: Diaspididae) y la mosca oriental de la fruta *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) mostraron que el nanocalcio produjo mejores tasas de control. Además, los bioensayos contra *B. dorsalis* con partículas de carbonato de calcio arrojaron valores de CL_{50} más bajos para el nanocalcio. Asimismo, el nanocalcio tuvo mejores resultados de eficacia protectora contra los pinchazos de oviposición de las moscas orientales de la fruta en *Ziziphus mauritiana*. Lam. (Rhamnaceae). El nanocalcio produjo mejores resultados generales que el calcio coloidal para la fertilización, la protección de plantas y el control de plagas.

Perspectivas de las nanopartículas

El presente análisis mostró una tendencia en el uso de las nanopartículas de diferente tipo de síntesis, específicamente dirigido a los estudios realizados en los últimos 11 años sobre insectos y ácaros fitófagos. Con el 35% de los artículos revisados, las NPsAg muestran un dominio amplio sobre el control de plagas, ya sean insectos o ácaros en la agricultura. Las nanopartículas de zinc (NPsZn-NPsZnO) y el grupo de las NPs de silicio-aluminio contemplan un 18% c/u, estos grupos se han explorado de forma interesante en diferentes trabajos de sistemas integrales con los cultivos, pues estos elementos están asociados con respuestas por parte del cultivo. Asimismo, las NPs de cobre (NPsCu- NPsCuO) ocupan otro nicho interesante con poco más del 10%, las características de estas NPs son los efectos sobre el cultivo y la eficiencia de liberación del Cu. Las NPsAu ocupan un 11% c/u, cabe mencionar haber sido estas estudiadas ampliamente en áreas como la veterinaria, para el control de artrópodos de interés médico-veterinario (Benelli, 2018), pero en la agricultura, aún falta explorar si las comparamos con las NPsAg. Existe un pequeño sector donde se han explorado polímeros o compuestos similares con el 5%. La figura 2 muestra la distribución de la información acorde con las nanopartículas anteriormente mencionadas.

FIGURA 2. Porcentaje de distribución de la información del uso de nanopartículas en el control de insectos y ácaros plaga.



Fuente: Elaboración de los autores.

Conclusiones

La nanotecnología ha demostrado inferencia en diversas disciplinas de la agricultura como la preservación de alimentos, la agricultura de precisión, transferencia genética, nanoalimentos y productos nanobasados aplicados a la fitosanidad vegetal. En la actualidad, los productos nanobasados han teni-

do un auge importante, debido a que entre ellos encontramos a los nanopesticidas, los cuales se han explorado en el manejo y control de diferentes especies de artrópodos plaga.

El uso de nanopartículas dentro de esquemas de manejo integrado de plagas (MIP) comienza a generar expectativas dentro del compendio de alternativas de manejo viable de plagas. La mayoría de los estudios de eficacia de las NPs sobre plagas son bioensayos realizados en condiciones de laboratorio, los cuales suponen múltiples efectos según la especie plaga objetivo, siendo predominantes algunos grupos de plagas chupadoras como ácaros, pulgones y cochinillas, masticadores como el grupo de noctuidos del género *Spodoptera*, algunas plagas de almacén, y modelos de estudio muy específicos con cucarachas y algunos dípteros. Asimismo, existe poca información de los efectos en cultivos agrícolas, aunque se sabe que algunas NPs llegan a estimular las plantas, los estudios en el campo de lo aplicado son limitados específicamente en condiciones de mallasombras, invernaderos y campo abierto.

Otro aspecto importante es el proceso de síntesis de estos nanomateriales, se debe considerar la viabilidad de este proceso pues la síntesis piloto o semindustrial podría llegar a ser no rentable, principalmente por el costo de los precursores de las NPs. Una alternativa pueden ser las nuevas síntesis, como la verde, la cual sugiere una optimización del proceso y un menor impacto en los agroecosistemas, evitando así el uso de solventes. Otro aspecto importante es la regulación de este tipo de nanomateriales en esquemas legales, derivado del desconocimiento de su ubicación comparado con los productos típicos de insecticidas y acaricidas comúnmente usados en la agricultura.

Definitivamente, se requiere más información acerca de los procesos de síntesis, del uso y/o espectro de control, los modos de acción de las Nps sobre las plagas (insectos y ácaros), el impacto en especies no objetivo como polinizadores, depredadores y parasitoides, además de conocer sus efectos en el agroecosistema y la cadena agroalimentaria. Todo lo anterior en un marco integral de evaluación crítica de estos nanomateriales, desde la eficacia biológica, aspectos toxicológicos, residuos en alimentos y efectos en medio ambiente, aunado a un tema regulatorio claro, el cual permita la introducción y escalamientos de estas herramientas provenientes de la nanotecnología al manejo integral de plagas en la agricultura moderna.

Contribución de autorías

Concepción y diseño del artículo: José Guadalupe Ontiveros-Guerra, Sonia Noemí Ramírez Barrón y Agustín Hernández-Juárez.
Desarrollo metodológico: Agustín Hernández-Juárez y Julio César Chacón-Hernández.
Redacción del borrador original: José Guadalupe Ontiveros-Guerra, Agustín Hernández-Juárez y Sonia Noemí Ramírez Barrón.
Revisión y edición final del texto: Agustín Hernández-Juárez, Julio César Cha-

cón-Hernández, Sonia Noemí Ramírez Barrón y José Guadalupe Ontiveros-Guerra.
Preparación de materiales suplementarios: José Guadalupe Ontiveros-Guerra y Agustín Hernández-Juárez.

Referencias

Abdel Ghani, S. B., Al-Azzazy, M. M. y Lucini, L. (2022). The miticidal activity of silver nanoparticles towards phytophagous and predatory mites of citrus: efficacy and selectivity. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 34(6): 261-262. https://doi.org/10.9755/ejfa.2022.v34.i6.2888.

Abdel-Gawad, R. M. (2018). Insecticidal activity of *Moringa oleifera* synthesized silver and zinc nanoparticles against the house fly, *Musca domestica L. Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. A, Entomology*, 11(4): 19-30. https://doi.org/10.21608/eajbsa.2018.17729.

Ahmadi, Z., Saber, M., Akbari, A. y Mahdavinia, G. R. (2018). Encapsulation of *Satureja hortensis* L. (Lamiaceae) in chitosan/TPP nanoparticles with enhanced acaricide activity against *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161: 111-119. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013-8.05.051.

Ahmed, S. H., Mohmed, A. y Hussein, A. M. (2023). Mycosynthesis of silver nanoparticles and evaluation as insecticidal against the sunn pest *Eurygaster testudinaria in vitro*. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*, 1158: 13-72. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1158/7/072013.

Al-Azzazy, M. M. y S. B. Abdel-Ghani. (2024). Field evaluation of the efficacy of copper nanoparticles against mites associated with orange trees. *Brazilian Journal of Biology*, 84: 270-451. https://doi.org/10.1590/1519-6984.270451.

Al-Azzazy, M. M., Abdel-Ghani, S., B. y Alhewairini, S. S. (2019). Field evaluation of the efficacy of silver nanoparticles (AgNp) against mites associated with tomato plants in greenhouses Pak. *J. Agri. Sci*, 56(1): 283-288. https://doi.org/10.21162/PAKJAS/19.8155.

Al-Hamdani H., M. y Hameed, R. S. (2023). Preparation of the environmentally friendly green nano insecticide using copper salts. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicada a la PYME*, 12(1): 225-241. https://doi.org/10.17993/3ctecno.2023.v12n1e43.225-241.

Alif, A. A. S. y Thangapandiyan, S. (2019). Comparative bioassay of silver nanoparticles and malathion on infestation of red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 80(1): 1-10. https://doi.org/10.1186/s41936-019-0124-0.

Alimohamadian, M., Aramideh, S., Mirfakhraie, S. y Frozan, M. (2022). Silica nanoparticle: a potential of noninvasive and as a natural insecticide application for beet armyworm, *Spodoptera exigua* Hubner (Lep.: Noctuidae) control. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(2): 248-257. https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/download/7515/3885/37071.

Almadiy, A. A., Nenaah, G. E. y Shawer, D. M. (2018). Facile synthesis of silver nanoparticles using harmala alkaloids and their insecticidal and growth inhibitory activities against the khapra beetle. *Journal of Pest Science*, 91: 727-737. https://doi.org/10.1007/s10340-017-0924-2.

Al-Shammari, H. I. y Al-Zubaidi, H. K. (2016). Toxicity of silver nanoparticles prepared by extract of *Eucalyptus* sp in some biological aspects of Citrus mealybug *Planococcus citri* (Risso), Hemiptera: Pseudococcidae. *European Academic Research*, 4: 7658-7675.

Amjad, T., Afsheen, S. y Iqbal, T. (2022). Nanocidal effect of rice husk–based silver nanoparticles on antioxidant enzymes of aphid. *Biol Trace Elem Res*, 200: 4855-4864. https://doi.org/10.1007/s1+2011-021-03067-5.

Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., Benelli, G., Losic, D., Usha Rani, P. y Desneux, N. (2018). Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. *Journal of Pest Science*, 91: 1-15. https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0

Attia, Y. K., Raffat, B., Abo, A., Ahmed, A., Ismail, A. y George, M. N. (2015). Impact of nanoparticle zinc oxide and aluminum oxide against rice weevil *Sitophilus oryzae* (coleoptera: curculionidae) under laboratory conditions egy. *J. Plant Pro. Res*. 3(3): 30-38. https://kfs.edu.eg/agre/pdf/184201611233516.pdf.

Auffan, M., Rose, J., Bottero, J. Y., Lowry, G. V., Jolivet, J. P. y 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.

Baranitharan, M., Alarifi, S., Alkahtani, S., Ali, D., Elumalai, K., Pandiyan, J., Krishnappa, K., Rajeswary, M. y Govindarajan, M. (2021). Phytochemical analysis and fabrication of silver nanoparticles using *Acacia catechu*: an efficacious and eco-friendly control tool against selected polyphagous insect pests. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1): 148-156. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.09.024.

Benelli, G. (2016). Green synthesized nanoparticles in the fight against mosquito-borne diseases and cancer-a brief review. *Enzyme and Microbial Technology*, 95: 58-68. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.08.022.

Benelli, G. (2018). Mode of action of nanoparticles against insects. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(13): 12329-12341. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1850-4. PMID: 29611126.

Benelli, G., Maggi, F., Romano, D., Stefanini, C., Vaseeharan, B., Kumar, S. y Canale, A. (2017). Nanoparticles as effective acaricides against ticks a review. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 8(6): 821-826. https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2017.08.004.

Bhattacharyya, A., Prasad, R., Buhroo, A. A., Duraisamy, P., Yousuf, I., Umadevi, M. y Khanday, A. L. (2016). One-pot fabrication and characterization of silver nanoparticles using *Solanum lycopersicum*: an eco-friendly and potent control tool against rose aphid, *Macrosiphum rosae*. *Journal of Nanoscience*, 1: 1-7. doi:10.1155/2016/4679410.

Bonser, C. A., Borgatta, J., White, J. C., Astete, C. E., Sabliov, C. M. y Davis, J. A. (2023). Impact of zein and lignin-PLGA biopolymer nanoparticles used as pes-

ticide nanocarriers on soybean growth and yield under field conditions. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(2): 20-35. https://doi.org/10.1002/agg2.20350.

Carranza, P. M., Contreras, M. M., Macías, L. M., Pincay, P. P., Rendón, M. E. y Robinson, H. F. (2023). Uso de los pesticidas y su efecto en el cultivo de *Zea mays*: una revisión de la literatura. *Código Científico Revista de Investigación*, 4: 1258-1286. https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v4/nE2/219.

Chakravarthy, A. K., Bhattacharyya, A., Shashank, P. R., Epidi, T. T., Doddabasappa, B. y Mandal, S. K. (2012). DNA-tagged nano gold: a new tool for the control of the armyworm, *Spodoptera litura* Fab.(Lepidoptera: Noctuidae). *Afr J Biotechnol*, 11(38): 9295-9301. https://doi.org/10.5897/AJB11.883.

Correa, P. Z., Bautista, B., S., Hernández, L. M. y Marquina, V. M. (2018). Evaluación de nanoformulaciones en el desarrollo *in vitro* de hongos fitopatógenos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(3): 457-467. https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1803-2.

Dasgupta, N., Ranjan, S., Mundekkad, D., Ramalingam, C., Shanker, R. y Kumar, A. (2015). Nanotechnology in agro-food: from field to plate. *Food Research International*, 69: 381-400. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.005.

El-Ashram, S., Kheirallah, D. A. M., El-Samad, L. M. y Toto, N. A. (2020). Relative expression of microRNAs, apoptosis, and ultrastructure anomalies induced by gold nanoparticles in *Trachyderma hispida* (Coleoptera: Tenebrionidae). *PLOS ONE*, 15(11): 24-37. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241837.

El-Bendary, H. M. y El-Helaly, A. A. (2013). First record nanotechnology in agricultural: silica nano-particles a potential new insecticide for pest control. *Applied of Scientific Reports*, 4(3): 241-246. https://www.fayoum.edu.eg/English/Agri/PlantProtection/pdf/MrHelmiE2.pdf.

Elsadany, M. F., Aboulila, A. A., Abo-Sein, T. M. y Magouz, R. I. E. (2015). Effect of silica nano-particles in control of mite, *Tetranychus cucurbitacearum* (Sayed) and agronomic traits of soybean plants and qualitative assessment of its genotoxicity using total protein and RAPD analysis. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 6(11): 529-544. https://doi.org/10.21608/jacb.2015.48470.

Emam, H., Ibrahim, M. S., Ibrahim, M. y El-Sayed, S. (2021). Greenhouse and laboratory evaluation of the efficiency of green silicon dioxide nanoparticles against *Tetranychus urticae* (Koch). *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 29(3): 901-912. https://doi.org/10.21608/ajs.2021.92246.1411.

Ghan, S. B. A. y Al-Azzazy, M. (2022). The miticidal activity of silver nanoparticles towards phytophagous and predatory mites of citrus: efficacy and selectivity. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 34(6): 509-518. https://doi.org/10.9755/ejfa.2022.v34.i6.2888.

Ghan, S. B. A., Al-Azzazy, M. M., Alhewairini, S. S. y Al-Deghairi, M. A. (2022). The miticidal activity of silver nanoparticles towards date palm mite (*Oligonychus afrasiaticus* (McGregor)): efficacy, selectivity, and risk assessment. *Brazilian Journal of Biology*, 84: 1-8. https://doi.org/10.1590/1519-6984.2661262.

Gutiérrez, M. J. A., Betancourt, G. R., Aguirre,U. L. A., Cerna, C. E., Sandoval, R. A.,

Ángel, E. C., Chacón, H. J. C.; García, L. J. I., y Hernández, J. A. (2021). Insecticidal effect of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles against *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) on tomato *Solanum lycopersicum*. *Agronomy*, 11(8): 1460-1480. https://doi.org/10.3390/ agronomy11081460.

Hameed, R. S., Fayyad, R. J., Shafeeq, M. A. A. y Nuaman, R. S. (2023). Manufacturing and characterization of an effective and eco-friendly nano insecticide with the aid of green alga *Chlorella vulgaris* in contrast to traditional insecticide. *Indonesian Journal of Biotechnology*, 28(2): 112-118. https://doi.org/10.22146/ijbiotech.79105.

Haroun, S. A., Elnaggar, M. E., Zein, D. M. y Gad, R. I. (2020). Insecticidal efficiency and safety of zinc oxide and hydrophilic silica nanoparticles against some stored seed insects. *Journal of Plant Protection Research*, 60(1): 77-85. https://doi.org/10.24425/jppr.2020.132211.

Hernández, T. A., Estrada, D. B., Rodríguez, H. R., García, G. J. M., Patiño, A. S. A. y Osorio H. E. (2019). Importancia del control biológico de plagas en maíz (*Zea mays* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4): 803-813. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1665.

Hernández, T. F. y Orozco, S. F. (2020). Nanoformulaciones de bioinsecticidas botánicos para el control de plagas agrícolas. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 9(1): 72-91. Universidad Nacional de Colombia. https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n1.81401.

Hua, K. H., Wang, H. C., Chung, R. S. y Hsu, J. C. (2015). Calcium carbonate nanoparticles can enhance plant nutrition and insect pest tolerance. *Journal of Pesticide Science*, 40(4): 208-213. https://doi.org/10.1584/jpestics.d15-025.

Ihegwuagu, N. E., Sha'Ato, R., Tor-Anyiin, T. A., Nnamonu, L. A., Buekes, P., Soneab, B. y Maazaab, M. (2016). Facile formulation of starch–silver-nanoparticle encapsulated dichlorvos and chlorpyrifos for enhanced insecticide delivery. *New Journal of Chemistry*, 40(2): 1777-1784. https://doi.org/10.1039/c5nj01831e.

Jafir, M., Ahmad, J. N., Arif, M. J., Ali, S. y Ahmad S. J. N. (2021). Characterization of *Ocimum basilicum* synthesized silver nanoparticles and its relative toxicity to some insecticides against tobacco cutworm, *Spodoptera litura* Feb. (Lepidoptera; Noctuidae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 218: 112-127. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112278. PMID: 33965777.

Jameel, M., Shoeb, M., Khan, M. T., Ullah, R., Mobin, M., Farooqi, M. K. y Adnan, S. M. (2020). Enhanced insecticidal activity of thiamethoxam by zinc oxide nanoparticles: a novel nanotechnology approach for pest control. *ACS Omega*, 5(3): 1607-1615. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03680.

Kantrao, S., Ravindra, M. A., Akbar, S. M. D., Jayanthi, P. K. y Venkataraman, A. (2017). Effect of biosynthesized silver nanoparticles on growth and development of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae): Interaction with midgut protease. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(2): 583-589. https://doi.org/10.1016/j.aspen.2017.03.018.

Khatami, M., Iravani, S., Varma, R. S., Mosazade, F., Darroudi, M. y Borhani, F. (2019). Cockroach wings-promoted safe and greener synthesis of silver nanoparticles

and their insecticidal activity. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 42(12): 2007-2014. https://doi.org/10.1007/s00449-019-02193-8.

Khooshe, Z., Sahebzadeh, N., Ghaffari, M. y Mirshekar, A. (2016). Insecticidal effects of zinc oxide nanoparticles and *Beauveria bassiana* TS11 on *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood, 1856) (Hemiptera: Aleyrodidae). *Acta Agriculturae Slovenica*, 107(2): 299-309. https://doi.org/10.14720/aas.2016.107.2.04.

Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., Aly Hassan, A. y Kim, K. H. (2019). Nano-based smart pesticide formulations: emerging opportunities for agriculture. *Journal of Controlled Release*, 294: 131-153. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.12.012.

León, J. E., Valdéz, S. B., González, M. D. y Tzintzun, C. O. (2019). Síntesis y actividad insecticida de nanopartículas de Cu de *Prosopis juliflora* (Sw) DC y *Pluchea sericea* (Nutt.) sobre *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 78(2): 1-10. https://doi.org/10.25085/rsea.780202.

Lira, S. R. H., Méndez, A. B., Santos, V. G. D. y Vera, R. I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2): 9-24. https://doi.org/10.15174/au.2018.1575.

Manimegalai, T., Raguvaran, K., Kalpana, M., Ajarem, A. J. S., Allam, A. A., Khim, J. S. y Maheswaran, R. (2022). Bio efficacy of synthesised silver nanoparticles using *Dicrocephala integrifolia* leaf extract and their insecticidal activity. *Materials Letters*, 314: 13-18. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131860.

Mao, B. H., Chen, Z. Y., Wang, Y. J. y Yan, S. J. (2018). Silver nanoparticles have lethal and sublethal adverse effects on development and longevity by inducing ROS-mediated stress responses. *PubMed Scientific Reports*, 8(1):2445-2461. https://doi.org/10.1038/s41598-018-20728-z.

Martins, C. H. Z., De Sousa, M., Fonseca, L. C., Martínez, D. S. T. y Alves, O. L. (2019). Biological effects of oxidized carbon nanomaterials (1D *versus* 2D) on *Spodoptera frugiperda*: Material dimensionality influences on the insect development, performance and nutritional physiology. *Chemosphere*, 215: 766-774. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.178.

Méndez, T. V., Valdez, S. B., Curiel, A. M., Beltrán, P. E., Alfaro, C., Ruiz, S. E., Bautista, T. G., Tzintzun, C. O., Grimaldo, J. O., Ceceña, D. C., Ail, C. C. y González, M. D. (2022). Insecticidal effect of green bimetallic nanoparticles from *Crotalaria longirostrata* on cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis*. *Journal of Renewable Materials*, 10(10): 2543-2552. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.020965.

Mesa, M. R. y Esparcia P. J. (2023). Cambios en la demanda y estrategias de adaptación en producciones agrarias sostenibles durante el confinamiento por la pandemia COVID-19. *Anales de Geografía de la Universidad Complutens*e, 43(1): 109-132. https://doi.org/10.5209/aguc.85940

Moorthi, P. V., Balasubramanian, C. y Mohan, S. (2015). An improved insecticidal activity of silver nanoparticle synthesized by using *Sargassum muticum*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175(1): 135-140. https://doi.org/10.1007/s12010-014-1264-9.

Mosa, W. F. A., Mackled, M. I., Abdelsalam, N. R., Behiry, S. I., Al-Askar, A. A., Basile, A., Abdelkhalek, A., Elsharkawy, M. M. y Salem, M. Z. M. (2022). Impact of silver nanoparticles on lemon growth performance: insecticidal and antifungal activities of essential oils from peels and leaves. *Frontiers in Plant Science*, 13: 846-898. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.898846.

Murugan, K., Roni, M., Panneerselvam, C., Aziz, A. T., Suresh, U., Rajaganesh, R., Aruliah, R., Mahyoub, J. A., Trivedi, S., Rehman, H., Naji Al-Aoh, H. A., Kumar, S., Higuchi, A., Vaseeharan, B., Wei, H., Senthil-Nathan, S., Canale, A. y Benelli, G. (2018). *Sargassum wightii*-synthesized ZnO nanoparticles reduce the fitness and reproduction of the malaria vector *Anopheles stephensi* and cotton bollworm *Helicoverpa armigera*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 101: 202-213. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.02.004.

Oliveira, F., Doelle, K., List, R. y O'Reilly, J. R. (2015). Assessment of Diptera: Stratiomyidae, genus *Hermetia illucens* (L., 1758) using electron microscopy. *J. Entomol. Zool. Stud.*, 3(5): 147-152. E-ISSN: 2320-7078. https://www.entomoljournal.com/archives/2015/vol3issue5/PartC/3-5-21.pdf.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D. y Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *International Journal of Surgery*, 88: 372-443. https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4

Parisi, I. O., Scrivano, L., Sinicropi, S. M., Picci, N. y Puoci, F. (2016). Engineered polymer-based nanomaterials for diagnostic, therapeutic and theranostic applications. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 16(9): 754-761. https://doi.org/10.2174/1389557515666150709112122.

Pavela, K. M., Canale, A. y Benelli, G. (2017). *Saponaria officinalis*-synthesized silver nanocrystals as effective biopesticides and oviposition inhibitors against *Tetranychus urticae* Koch. *Industrial Crops and Products*, 97: 338-344. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.046.

Pavitra, G., Sushila, N., Sreenivas, A. G., Ashok, J. y Sharanagouda, H. (2018). Biosynthesis of green silica nanoparticles and its effect on cotton aphid, *Aphis gossypii* glover and mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(10): 1450-1460. https://doi.org/10.20546/IJCMAS.2018.710.162.

Pittarate, S., Perumal, V., Kannan, S., Mekchay, S., Thungrabeab, M., Suttiprapan, P., Sengottayan, S. N. y Krutmuang, P. (2023). Insecticidal efficacy of nanoparticles against *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) larvae and their impact in the soil. *Heliyon*, 9(5): 1-11. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16133.

Pittarate, S., Rajula, J., Rahman, A., Vivekanandhan, P., Thungrabeab, M., Mekchay, S. y Krutmuang, P. (2021). Insecticidal effect of zinc oxide nanoparticles against *Spodoptera frugiperda* under laboratory conditions. *Insects*, 12: 10-17. https://doi.org/10.3390/insects12111017.

Prasad, R., Kumar, V. y Prasad, K. (2014). Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*, 13(6): 705-713. https://doi.org/10.5897/AJBX2013.13554.

Rahman, A., Pittarate, S., Perumal, V., Rajula, J., Thungrabeab, M., Mekchay, S. y Krutmuang, P. (2022). Larvicidal and antifeedant effects of copper nano-pesticides against *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) and its immunological response. *Insects*, 13(11): 10-30. https://doi.org/10.3390/insects13111030.

Rai, M., Kon, K., Ingle, A., Duran, N., Galdiero, S. y Galdiero, M. (2014). Broadspectrum bioactivities of silver nanoparticles: the emerging trends and future prospects. *Appl Microb Biotechnol*, 98: 1951-1961.

Raliya, R., Saha, D., Chadha, T. S., Raman, B. y Biswas, P. (2017). Non-invasive aerosol delivery and transport of gold nanoparticles to the brain. *Scientific Reports*, 7: 44718. https://doi.org/10.1038/srep44718.

Ramanathan, B., Gnanamanai, R. y Chandran, G. (2021). Evaluation of insecticidal activity of biosynthesised silver nanoparticles against the cotton insect pest, *Dysdercus cingulatus*. *Int J Recent Sci Res*., 12(08): 42688-42692. http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.2021.1208.6133.

Ramos, U. C. M., Pérez, A. S., Guerrero, M. S. y Palacios, M. A. (2021). Biofertilización y nanotecnología en la alfalfa (*Medicago sativa* L.) como alternativas para un cultivo sustentable. *Cultivos Tropicales*, 42(2): 1-15.

Rasim, H. S., Mohsen, B. H. y Al-Gburi, B. K. (2021). Acaricidal effects of silicon oxide and zinc oxide nanoparticles against *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on tomato plants. *Journal of Agricultural and Urban Entomology*, 37(1): 60-71. https://doi.org/10.3954/JAUE21-08.

Rouhani, M., Amin Samih, M. y Kalantari, S. (2012). Insecticied effect of silver and zinc nanoparticles against *Aphis nerii* Boyer of fonscolombe (Hemiptera: Aphididae). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(4): 590-594. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000400020.

Rouhani, M., Samih, M. A. y Kalantari, S. (2013). Insecticidal effect of silica and silver nanoparticles on the cowpea seed beetle, *Callosobruchus maculatus* F. (Col.: Bruchidae). *IAU Entomological Research Journal*, 4(4): 297-305. ISSN 2008-4668. https://sanad.iau.ir/en/Journal/jer/Article/523925?jid=523925&lang=en.

Rouhani, M., Samih, M. A., Zarabi, M., Beiki, K., Gorji, M. y Aminizadeh, M. R. (2019). Synthesis and entomotoxicity assay of zinc and silica nanoparticles against *Sitophilus granarius* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Plant Protection Research*, 59(1): 26-31. https://doi.org/10.24425/jppr.2019.126033.

Sahayaraj, K., Madasamy, M. y Radhika, S. A. (2016). Insecticidal activity of bio-silver and gold nanoparticles against *Pericallia ricini* Fab.(Lepidoptera: Archidae). *Journal of Biopesticides*, 9(1): 63-72. https://doi.org/10.57182/jbiopestic.9.1.63-72.

Saranya, S., Selvi, A., Babujanarthanam, R., Rajasekar, A. y Madhavan, J. (2020). Insecticidal activity of nanoparticles and mechanism of action. En *Model organisms to study biological activities and toxicity of nanoparticles*, 243-266. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1702-0_12.

Sasson, Y., Levy-Ruso G., Toledano O. y Ishaaya I. (2007). Nanosuspensions: emerging novel agrochemical formulations. En Ishaaya I., Nauen R., Horowitz A. R. (eds.), *Insecticides design using advanced technologies*. Springer: 1: 1-39.

Sayed, A. M., Kim, S. y Behle, R. W. (2017). Characterisation of silver nanoparticles

synthesised by *Bacillus thuringiensis* as a nanobiopesticide for insect pest control. *Biocontrol Science and Technology*, 27(11): 1308-1326. https://doi.org/10.1080/09583157.2017.1397597.

Senbill, H., Hassan, S. M. y Eldesouky, S. E. (2023). Acaricidal and biological activities of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) and their side effects on the predatory mite, *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 26(1): 1020-1027. https://doi.org/10.1016/j.aspen.2022.102027.

Shahzad, K. y Manzoor, F. (2021). Nanoformulations and their mode of action in insects: a review of biological interactions. *Drug and Chemical Toxicology*, 44(1): 1-11. https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1525393.

Shaker, A. M., Zaki, A. H., Abdel-Rahim, E. F. y Khedr, M. H. (2017). TiO2 nanoparticles as an effective nanopesticide for cotton leaf worm. *Agricultural Engineering International: CIGR Journa*l, 19: 61-68.

Sharifian, A., Jafarzadeh, A., Azodian, S., Zabetian, A. y Riahi, A. (2016). The application of the silver nanoparticles in control of arthropoda under laboratory conditions. *1st Conference on Modern Bio-medical researches*. https://www.researchgate.net/publication/341277946_The_Application_of_the_Silver_Nanoparticles_in_Control_of_Arthropoda_under_Laboratory_Conditions.

Small, T., Ochoa, Z. M. A., Gallello, G., Ribera, A., Romero, F. M., Torreblanca, A. y Garcerá, M. D. (2016). Gold-nanoparticles ingestion disrupts reproduction and development in the German cockroach. *Science of the Total Environment*, 565: 882-888. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.032

Sosa, R. F. S. (2015). Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 6(2): 4-23.

Taheri, S. M., Aramideh, S., Akbarian, J. y Pirsa, S. (2020). The effect of zinc oxide nanoparticles, kaolin powder and *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin in combination with Neemarin® against *Bemisia tabaci* and pupae of *Eretmocerus mundus* under field conditions. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 43(3): 1-19. https://doi.org/10.22055/ppr.2020.16187.

Thabet, A. F., Boraei, H. A. y Galal, O. A. (2021). Silica nanoparticles as pesticide against insects of different feeding types and their non-target attraction of predators. *Scientific Report*, 11(1): 44-84. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93518-9.

Thakur, P., Thakur, S., Kumari, P., Shandilya, M., Sharma, S., Poczai, P., Alarfaj, A. A. y Sayyed, R. Z. (2022). Nano-insecticide: synthesis, characterization, and evaluation of insecticidal activity of ZnO NPs against *Spodoptera litura* and *Macrosiphum euphorbiae*. *Applied Nanoscience*, 12: 3835-3850. https://doi.org/10.1007/s13204-022-02530-6.

Tunçsoy, B. S. (2018). Toxicity of nanoparticles on insects: a review. *Artıbilim: Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(2): 49-61.

Vivekanandhan, P., Kannan, S. A. T., Krutmuang, P. y Eliningaya, J. K. (2021). Green copper nano-pesticide synthesized by using *Annona squamosa* L., seed and

their efficacy on insect pest as well as non-target species. *Int. J. Plant Environ. Sci*, 11: 456-473. https://doi.org/10.26502/ijpaes.202115.

Wang, C., Qiao, K., Ding, Y., Liu, Y., Niu, J. y Cao, H. (2023). Enhanced control efficacy of spinosad on corn borer using polylactic acid encapsulated mesoporous silica nanoparticles as a smart delivery system. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(1): 126-142. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126425.

Zainol, N. A., Kormin, F., Zainol Abidin, N. A., Bakar, M. F. A. y Moujdin, I. A. (2023). Synthesis and characterization of curcumin-chitosan loaded gold nanoparticles by *Oryctes rhinoceros*' chitin for cosmeceutical application. *Molecules*, 28(4): 1799-1811.

Zavala-Zapata, V., Ramírez-Barrón, S. N., Sánchez-Borja, M., Aguirre-Uribe, L. A., Delgado-Ortiz, J. C., Sánchez-Peña, S. R., Mayo-Hernández, J., García-López, J. I., Vargas-Tovar, J. A. y Hernández-Juárez, A. (2024). Insecticide efficacy of green synthesis silver nanoparticles on *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Insects*, 15: 469. https://doi.org/10.3390/insects15070469.

Zayed, M. (2022). Silica nanoparticles boosted abamectin's acaricidal bioactivity against *Tetranychus urticae* koch's two spotted spider mite developmental stages. *Journal of Plant Protection and Pathology*. 13(5): 93-100. Mansoura Univ. https://doi.org/10.21608/jppp.2022.132496.1066.

Zhou, H., Wan, F., Jian, Y., Guo, F., Zhang, M., Shi, S., Yang, L., Li, S., Liu, Y. y Ding, W. (2023). Chitosan/dsRNA polyplex nanoparticles advance environmental RNA interference efficiency through activating clathrin-dependent endocytosis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(4): 121-127. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127021.