

Nanotecnología para el control de *S. zeamais*, *T. castaneum* y *R. dominica*, insectos plaga de almacenamiento

Nanotechnology for the control of *S. zeamais*, *T. castaneum* and *R. dominica*, storage pest insects

Saúl Enrique Uribe Rivera,* Ernesto Cerna Chávez*,[†] Yisa María Ochoa Fuentes,*
Lisett Romero Pavón*

ABSTRACT: Insect pests of stored grains represent one of the greatest risks to their production by deteriorating quality and quantity, making them unfit for consumption. Although the chemical method is the primary way to control them, situations such as resistance and damage to non-target organisms have emerged; consequently, the use of nanotechnology as an alternative for a more efficient control through the use of nanoscale materials. In this article, some effective applications in the control of *S. zeamais*, *T. castaneum* and *R. dominica* are reviewed, specifically on silicon, copper, zinc and graphene nanoparticles against these three species.

KEYWORDS: stored grains, nanotechnology, nanoformulations.

RESUMEN: Los insectos plaga de granos almacenados representan uno de los mayores riesgos para su producción al deteriorar su calidad y cantidad, causando que estos no sean aptos para el consumo. Si bien el método químico es la vía principal para controlarlos, existen situaciones como resistencia y daño a organismos no objetivo, por lo cual la nanotecnología surge como alternativa para un control más eficiente mediante el empleo de materiales nanoescalados. En este trabajo se revisan algunas aplicaciones efectivas en el control de los insectos *S. zeamais*, *T. castaneum* y *R. dominica*, específicamente sobre nanopartículas de silicio, cobre, zinc y grafeno, contra estas tres especies.

PALABRAS CLAVE: granos almacenados, nanotecnología, nanoformulaciones.

Introducción

Las materias primas alimentarias tienen un papel importante en la nutrición humana a nivel mundial, siendo fundamental su preservación en óptimo estado para el consumo (Mesterházy *et al.*, 2020; Adler *et al.*, 2022). De este grupo de alimentos sobresalen los granos almacenados tales como maíz, arroz y trigo, los cuales están sujetos a infestaciones, por diversos agentes, dado su contenido nutricional (Srivastava y Subramanian, 2016), entre ellos sobresalen los insectos plaga de granos almacenados, por causar importantes niveles de pérdidas, estimadas entre el 50 y 60% de la producción, cuan-

Recibido: 9 de abril, 2025.

Aceptado: 26 de enero, 2026.

Publicado: 11 de febrero, 2026.

* Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología Agrícola.
Saltillo, Coahuila, México.

[†] Autor de correspondencia: jabaly1@yahoo.com



do no son controlados de manera eficiente, dañando de manera cualitativa y cuantitativa los granos (Kumar *et al.*, 2017; Rajendran, 2020). Se clasifican en dos grupos dependiendo de su manera de dañar al grano, de esta forma encontramos las llamadas plagas primarias y plagas secundarias, las primeras poseen hábitos de alimentación interna, pudiendo causar daños de manera desapercibida, pero las segundas cuentan con hábitos alimenticios externos, es decir, se alimentan del grano previamente dañado (Stejskal *et al.*, 2014; Baliyarsingh y Pradhan, 2023). Entre ellos encontramos a *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae), *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) y *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) (Coleoptera: Bostrichidae), como plagas de gran importancia económica en granos almacenados, al ser responsables de elevadas pérdidas, no solo debido al daño causado al alimentarse, sino también mediante restos de exoesqueletos, excreciones y secreciones químicas (Rajendran, 2020) comprometiendo la calidad del grano mediante cambios en contenido de lípidos, proteínas y carbohidratos (Stathas *et al.*, 2023). Situación que, junto con sus características de reproducción, hábitos alimenticios y adaptación a diversas condiciones ambientales, los convierte en amenazas serias a la producción de granos a nivel mundial (Manandhar *et al.*, 2018; Singh y Kaur, 2018); El control contra estas especies es mediante el método químico, lo cual ha favorecido la aparición de resistencia y contaminación; asimismo, tiene consecuencias para la salud humana como el desbalance hormonal, algunos tipos de cáncer, enfermedades crónicas y afectaciones de tipo gastrointestinal, causando que su manejo y control requiera cada vez de una mayor complejidad (Banga *et al.*, 2018; Rathore *et al.*, 2024), generando la búsqueda de opciones para el control de insectos plaga (Anandhi *et al.*, 2020; Jafir *et al.*, 2023). Lo anterior ha propiciado la exploración de la nanotecnología como herramienta innovadora en granos almacenados, mediante la combinación de ingredientes activos, extractos botánicos, diversos materiales a nanoescala, de entre 1 a 100 nm (nanómetros), así como diversos métodos de obtención y formulación, proporcionando ventajas sobresalientes comparadas con el control químico tradicional (Mustafa y Hussein, 2020; Victoria, 2023). Utilizar esta escala de materiales permite aprovechar algunas de sus características como la elevada proporción volumen-superficie, alta afinidad con los organismos objetivo y una capacidad acarreadora para la entrega puntual, efectiva y controlada de ingredientes activos (Usman *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2022; Adegbola *et al.*, 2024), logrando un mayor efecto insecticida notablemente mejorado (Kah y Hoffman, 2014; Li, X. *et al.*, 2023; Mana *et al.*, 2023), gracias a sus propiedades novedosas como cambios en la conductividad eléctrica, química de superficie, reactividad y la implícita disminución de ingrediente activo requerido para ejercer la actividad insecticida (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2020; Dash *et al.*, 2024). Los nanopesticidas contienen la molécula acarreadora y el ingrediente activo, se pueden presentar en forma de nano emulsiones, nanogeles, nano suspensiones y aquellos

que contienen materiales metálicos (Yadav *et al.*, 2021; Paradva y Kalla, 2023). Se categorizan de dos maneras: la primera como los que poseen componentes activos a nanoescala y la segunda los que son recubiertos, cargados o encapsulados en nanomateriales presentando una amplia gama de aplicaciones y diversos modos de acción contra los insectos (Shekar *et al.*, 2021; Gupta *et al.*, 2023). Esta combinación de características hace posible que los nanopesticidas sean aplicables en el control de insectos plaga, al permitir la evasión de los mecanismos de resistencia y algunas barreras biológicas para actuar efectivamente, constituyendo una estrategia muy efectiva con potenciales aplicaciones en el sector de productos de almacén (Zannat *et al.*, 2021; Mubeen *et al.*, 2023; Anjaneyulu *et al.*, 2024). En este sentido, algunos materiales como silicio, cobre, zinc, aluminio, titanio y, en años recientes, el grafeno, ya han sido evaluados contra insectos plaga de granos almacenados (Guru *et al.*, 2022; Kannan *et al.*, 2023; Eker *et al.*, 2024). El objetivo del presente trabajo es realizar una revisión de las aplicaciones de la nanotecnología específicamente en nanopartículas de silicio, cobre, zinc y grafeno, enfocada en el control de *S. zeamais*, *T. castaneum* y *R. dominica*, insectos de gran relevancia en granos almacenados. A continuación, se presentan por categorías de material.

Nanopartículas de silicio

Las nanopartículas de silicio (SiO_2) utilizadas en la formulación de nanopesticidas tienen grandes ventajas respecto de otro tipo de nanomateriales, como son la capacidad acarreadora de diversas moléculas, amplia compatibilidad así como presentar cierto grado de toxicidad por sí mismas, gracias a su forma, tamaño, porosidad y gran capacidad de manipulación, lo cual permite el realce del efecto insecticida (Cáceres *et al.*, 2019; Thabet *et al.*, 2021; Saw *et al.*, 2023) al hacer posible la carga, protección y liberación controlada de los ingredientes activos (Feng *et al.*, 2020; Yuvaraj *et al.*, 2023). Esta versatilidad permite que el silicio nano escalado sea un gran material para combatir insectos plaga de cuerpo duro, tal como la gran variedad de especies asociadas con productos almacenados (Rastogi *et al.*, 2019; Rajiv *et al.*, 2020; Bhatnagar *et al.*, 2024).

Modo de acción

El modo de acción de este nano material ha sido definido como fisisorción, proceso mediante el cual las nanopartículas de silicio son fisio-sorbidas por los lípidos cuticulares del insecto causando daños al afectar la capa de ceras que los protegen de la desecación, resultando en pérdida de agua, deshidratación y muerte, pues los insectos deben conservar la integridad de esta capa de ceras cuticulares para mantenerse protegidos (Arumugam *et al.*, 2016; Cáceres *et al.*, 2019; Alizadeh *et al.*, 2022; El Sayed *et al.*, 2023; Gouda y Ashwini, 2023). Además, ha sido reportado que, contribuyendo al efecto insecticida

del nano silicio, es posible encontrar el bloqueo de espiráculos en insectos expuestos a este nano material (Summer *et al.*, 2024).

Aplicaciones

El uso de nanopartículas de silicio en el control de insectos plaga de granos almacenados ha sido determinado como efectivo en algunas investigaciones, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Aplicaciones de nano silicio en el control de insectos plaga de almacén.

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nano formulación PEG de aceite esencial de <i>Allium sativum</i>	Evaluaron aceite esencial solo y nano formulado. Concluyeron que el nano formulado fue más efectivo proporcionando una mortalidad de 80% vs 11% del aceite esencial solo.	<i>T. castaneum</i>	Yang <i>et al.</i> (2009)
Nanopartículas de silicio	Probaron el nano material, registrando mortalidades de 100 y 87%, para <i>T. castaneum</i> y <i>R. dominica</i> , respectivamente, a 5 ppm.	<i>T. castaneum</i> <i>R. dominica</i>	El-Samahy <i>et al.</i> (2015)
Nanopartículas de silicio	Evaluación y obtención de mortalidades de hasta 100%, con una CL50 de 102 ppm.	<i>R. dominica</i>	Ziaee y Ganji (2016)
Nanopartículas de silicio	Cargaron clorpirifos-etil en nanopartículas de silicio, demostrando su efectividad con mortalidades de 18.5 a 100% y de 1.4 a 100% para <i>T. confusum</i> y <i>R. dominica</i> , respectivamente.	<i>T. confusum</i> <i>R. dominica</i>	Babamir-Satehi <i>et al.</i> (2017)
Nanopartículas de silicio	Evaluación de los aceites esenciales de <i>Syzygium aromaticum</i> L. y <i>Menta piperita</i> L. solos y en nano formulación, concluyendo que la de <i>S. aromaticum</i> fue mejor, reduciendo la CL ₅₀ 4.86 veces, siendo estos valores de aceite esencial solo 5619.0 vs 1156.26 ppm en nanoformulado.	<i>T. castaneum</i>	Abdel-Halim y Attia (2018)
Nanopartículas de silicio, aluminio y malatión	Si bien el producto químico fue mejor, las nanopartículas de silicio destacaron por encima de las de aluminio para controlar al insecto, con mortalidades de hasta 93%.	<i>S. oryzae</i>	Gamal (2018)
Nanopartículas de silicio	Al evaluar el material sobre larvas y adultos registraron elevadas mortalidades para las dos especies, concluyendo que se trata de un nano material efectivo en su control.	<i>T. castaneum</i> <i>Callosobruchus maculatus</i>	Jafar y Annon (2018)
Nanopartículas de silicio	Obtención y evaluación de nanopartículas de silicio amorfas, obtenidas de cascarilla de arroz, determinando que a 175 ppm se obtuvo 100% de mortalidad	<i>S. oryzae</i>	Patil <i>et al.</i> (2018)
Nanopartículas de silicio	Evaluaron nano silicio (Aerosil 200) con mortalidades del 100% para las dos primeras especies mientras que para <i>T. castaneum</i> la máxima mortalidad fue de 83%, encontrando que fue menos sensible.	<i>Trogoderma granarium</i> <i>Stegobium paniceum</i> <i>T. castaneum</i>	Abdelfattah y Zein (2019)

Continúa ►

Tabla 1. Aplicaciones de nano silicio en el control de insectos plaga de almacén (continuación).

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nanopartículas de silicio	Nanopartículas de silicio solas y en combinación con los aceites esenciales de <i>Cinnamomum verum</i> y <i>Mentha piperita</i> , destacando las nano solas con CL ₅₀ de 0.125%, seguidas de nano canela 0.163% y 0.321% de nano menta.	<i>S. oryzae</i>	El-Shewy (2019)
Nanopartículas de silicio y plata	Evaluaron sus efectos en el número de huevos y emergencia, encontrando que las de silicio tuvieron un efecto remarcado, con 8.3% de emergencia post tratamiento comparado con 95% del testigo.	<i>T. castaneum</i>	Annon y Jafar (2020)
Nanopartículas de silicio	Sintetizaron las nanopartículas por la técnica de sol-gel, y las evaluaron, reportando valores de CL ₅₀ de 34, 20 y 263 ppm, para <i>T. castaneum</i> , <i>R. dominica</i> y <i>S. oryzae</i> , respectivamente.	<i>T. castaneum</i> <i>R. dominica</i> <i>S. oryzae</i>	El-Naggar et al. (2020)
Nanopartículas de silicio	Evalúo tres formas de nano silicio: silicio químico, bio silicio y Aerosil 200, contra <i>T. castaneum</i> , <i>R. dominica</i> y <i>C. maculatus</i> , obteniendo para el primer producto valores de CL ₅₀ de 450, 190 y 70 ppm, para cada especie respectivamente, indicando que el silicio químico presentó los valores más bajos de CL ₅₀ para las tres especies.	<i>T. castaneum</i> <i>R. dominica</i> <i>C. maculatus</i>	Salem (2020)
Nanopartículas de silicio y aluminio	Evaluaron y compararon el efecto insecticida de nanopartículas de silicio y aluminio, las primeras fueron más efectivas, logrando mortalidades de hasta 50 vs 40% de las de aluminio.	<i>T. castaneum</i>	Zayed et al. (2020)
Nanopartículas de dióxido de silicio y óxido de zinc	Evaluación de los materiales con mortalidades de 81, 98 y 58% para las nanopartículas de silicio, mientras que las de zinc fueron 88, 100 y 38%.	<i>S. oryzae</i> <i>C. maculatus</i> <i>T. castaneum</i>	Haroun et al. (2020)
Nanopartículas de silicio, cobre y zinc	Obtuvieron las nanopartículas por síntesis verde, logrando 100% de mortalidad para ambas especies a 1500 ppm, únicamente con nano silicio, destacando este material de los otros dos.	<i>Callosobruchus analis</i> <i>S. oryzae</i>	Wazid et al. (2020)
Tierra de diatomeas sola y adicionada con nanopartículas de silicio	Probaron la efectividad insecticida de la tierra de diatomeas adicionada al 15 y 20% con nanopartículas, contra <i>R. dominica</i> y <i>T. confusum</i> , Determinaron que la combinación al 20% fue mejor para ambas especies, presentando mortalidades máximas de 95 y 66%, respectivamente.	<i>R. dominica</i> <i>T. confusum</i>	Saed et al. (2020)
Nanopartículas de silicio	Nanopartículas de silicio sintéticas y biosintetizadas contra <i>T. castaneum</i> y <i>S. oryzae</i> , concluyendo que fueron más efectivas las primeras, a las 72 horas, al estimar una CL ₅₀ de 290 ppm vs 930 ppm para <i>T. castaneum</i> y 230 ppm vs 630 ppm para <i>S. oryzae</i> .	<i>T. castaneum</i> <i>S. oryzae</i>	Draz et al. (2021)
Nanopartículas de dióxido de silicio	Nanopartículas de silicio evaluadas contra <i>S. oryzae</i> y obtención de mortalidades de hasta 67% con una CL ₅₀ de 500 ppm.	<i>S. oryzae</i>	Kar et al. (2021)

Continúa ►

Tabla 1. Aplicaciones de nano silicio en el control de insectos plaga de almacén (continuación).

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nanopartículas de silicio	Uso de silicio nano escalado como aditivo en tierra de diatomeas mejoró la efectividad insecticida, logrando mortalidades de hasta 86 y 95% para <i>T. confusum</i> y <i>R. dominica</i> , respectivamente, comparadas con 47.7 y 65.5% de la tierra de diatomeas sola.	<i>T. confusum</i> <i>R. dominica</i>	Saed et al. (2021)
Nanopartículas de silicio y plata	Evaluaron los materiales, resultando en una CL ₅₀ de 438.3 ppm vs 657.4 ppm con mortalidades de 40 y 70%, respectivamente, destacando las de silicio por su CL ₅₀ más baja.	<i>T. castaneum</i>	Salah et al. (2023)
Nanopartículas de silicio	Determinación de la actividad insecticida de nanopartículas de silicio sintetizadas por la técnica de sol-gel y arena de río contra <i>S. oryzae</i> , encontrado que las primeras fueron más efectivas con CL ₅₀ de 0.44 ppm y 0.92 ppm, respectivamente, por 100 gramos de semillas de maíz en las cuales se alimentó a los insectos adultos, logrando mortalidades de 100 y 73% para cada tipo de material después de 72 horas de exposición.	<i>S. oryzae</i>	Aisvarya et al. (2023)
Nanopartículas de silicio, aluminio y arcilla	Comparación de la efectividad insecticida de 3 nanoinsecticidas, destacando el silicio a una concentración de 250 ppm con 100% de mortalidad.	<i>S. oryzae</i>	Padmasri et al. (2023)
Nanopartículas de silicio	Comparación de la efectividad insecticida de dos extractos vegetales comerciales llamados Tandexir y Balizin, solos con mortalidades de 93 y 83%, respectivamente, y con la adición de 0.2 g por litro de nanopartículas de silicio, encontrando que hubo un aumento de mortalidad en la formulación, siendo de 100 y 96%, para cada producto, respectivamente.	<i>T. castaneum</i>	Al Husani (2024)

Fuente: Elaboración de los autores.

Nanopartículas de cobre

Las nanopartículas de cobre tienen la ventaja respecto de otros nanomateriales, de su accesibilidad en términos de costo para ser obtenidas o producidas; contando con relativa versatilidad para mezclarse con polímeros y conservar su estabilidad en las condiciones ambientales, lo cual proporciona la pauta para su empleo en el control de insectos en el sector agrícola (Vivekanandhan et al., 2018). Pueden ser fabricadas de manera eficiente, variando según el enfoque que se pretenda dar, ya sea por el método químico, mecánico o la denominada síntesis verde (Din y Rehan, 2017).

Modo de acción

Referente al mecanismo por el cual este nano material ejerce la actividad insecticida, se ha descrito su acción mediante la generación de especies reacti-

vas de oxígeno conduciendo a un desbalance entre las ROS y los mecanismos de defensa antioxidantes de los insectos, generando estrés oxidativo (Patil *et al.*, 2016; Benelli, 2018; Rai *et al.*, 2018); asimismo, afecta la integridad de las membranas celulares, produciendo inactivación de proteínas mediante su unión a los elementos fósforo y azufre, que son constituyentes de estas, generando una serie de procesos irregulares a nivel celular, los cuales incluyen desnaturalización proteica, peroxidación lipídica, daño al ADN, destrucción de organelos y afectación a los procesos metabólicos (Gosh y Bera, 2021; Kora, 2022; Gacem y Chaibi, 2022; Li, C. *et al.*, 2023).

Aplicaciones

Este tipo de nanopartículas han sido evaluadas contra insectos plaga de granos almacenados, a continuación, se enlistan en la tabla 2.

Tabla 2. Aplicaciones de nano cobre en el control de insectos plaga de almacén.

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nanopartículas de cobre	Síntesis de nanopartículas por medio de <i>Pseudomonas fluorescens</i> MAL2 (resistente a cobre y aislada de un suelo contaminado con metales pesados) logrando estimar una CL ₅₀ de 37 ppm con mortalidades de 100% a las 96 horas.	<i>T. castaneum</i>	El-Saadony <i>et al.</i> (2020)
Nanopartículas de cobre	Desarrollo de nanopartículas a partir de una línea de <i>Aspergillus niger</i> , denominada G3-1, con mortalidades de 55.6 a 94.4% y de 70 a 90%, para <i>S. oryzae</i> y <i>R. dominica</i> , respectivamente.	<i>S. oryzae</i> <i>R. dominica</i>	Badawy <i>et al.</i> (2021)
Nanopartículas de cobre y su combinación con zinc y manganeso	Evaluación de nanopartículas de cobre y su combinación (cobre solo, cobre-manganeso y cobre-zinc) sintetizadas a partir del extracto foliar de <i>Capsicum chinense</i> L., con mortalidades en un rango de 63 a 80% y 20 a 28%, para cada especie, respectivamente. Además de atribuir la diferencia en mortalidades entre las dos especies a la constitución lipídica cuticular.	<i>T. castaneum</i> <i>Phenacoccus solenopsis</i> T.	Alfaro-Corres <i>et al.</i> (2023)
Nanopartículas de cobre	Biosíntesis mediante extractos vegetales de las plantas <i>Acacia cornigera</i> y <i>Annona purpurea</i> contra <i>T. castaneum</i> , obteniendo mortalidades máximas de 90 y 76.6%, para cada tipo de extracto/nanopartícula, respectivamente.	<i>T. castaneum</i>	Solorzano-Toala <i>et al.</i> (2024)

Fuente: Elaboración de los autores.

Nanopartículas de zinc

Este nano material es objeto de interés en el desarrollo de nanoformulaciones para aplicaciones biológicas, puesto que su actividad insecticida ha sido corroborada en diversas áreas como el control de hongos, bacterias e insectos lo cual convierte al zinc en una potencial alternativa ya sea solo o en nano formulados

para controlar a los insectos plaga, incluyendo aquellos de granos almacenados (Pittarate *et al.*, 2021; Thakur *et al.*, 2022; Abd El-Latef *et al.*, 2023).

Modo de acción

Por su naturaleza metálica, este tipo de nano material ha sido referido como un elemento cuyo principal modo de acción es provocar modificaciones en la membrana celular, comprometiendo su integridad, así como estrés oxidativo mediante la generación de ROS (Small *et al.*, 2016; Jasrotia *et al.*, 2022; Baliyarsingh *et al.*, 2023). Se ha observado que interfiere con procesos digestivos, fisiológicos e inmunológicos de los insectos, y causa daño por abrasión en la cutícula, contribuyendo así a la muerte de los mismos (Shahzad y Manzoor, 2021; Anees *et al.*, 2022). Sin embargo, en larvas de *Aedes aegypti* y *Anopheles stephensi* expuestas a este tipo de nano material se observó acumulación de nanopartículas en el intestino medio, daño a células epiteliales, células vacuoladas y cambios en la morfología del tórax (Benelli, 2018). Se considera que mediante la adsorción de las nanopartículas de zinc a las células del insecto y su posterior penetración al interior favorece el efecto sinérgico insecticida de este nano material cuando está en combinación con ingredientes activos (Jameel *et al.*, 2020; Elmasry, 2021). Además, se ha descrito que cuando este tipo de nanopartículas son ingeridas, por los insectos, disminuyen las reservas de energía, en forma de glucógeno y tejido adiposo, producto de las condiciones de estrés oxidativo, desencadenado por el nano material (Eskin y Nurullahoglu, 2022).

Aplicaciones

Las aplicaciones de este material en el control de insectos de granos almacenados son varias, tal como se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Aplicaciones de nano zinc en el control de insectos plaga de almacén.

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nanopartículas de óxido de zinc y óxido de aluminio	Mortalidades de 46.8 y 53.3%, respectivamente, para cada tipo de nano partícula, indicando que, si bien el segundo tipo tiene una mortalidad mayor, el zinc también representa una opción viable en el control.	<i>S. oryzae</i>	Nasr (2015)
Nanopartículas de óxido de zinc y de aluminio	Las nano de zinc fueron ligeramente mejor con una mortalidad de hasta 69% comparado con 68% del aluminio con valores de CL ₅₀ de 0.73 y 0.82 g/Kg de granos, respectivamente.	<i>T. castaneum</i>	Salem <i>et al.</i> (2015)
Nanopartículas de zinc y de aluminio	Mortalidades de 100 y 80%, para cada tipo de nano material, respectivamente, concluyendo que las de aluminio fueron superior que las de zinc. Mortalidades de 60 y 100%, respectivamente, indicando que el zinc sigue siendo una opción, después del silicio, para el control del insecto.	<i>S. oryzae</i> <i>Sitophilus granarius</i>	El-Bendary <i>et al.</i> (2016) Rouhani <i>et al.</i> (2019)

Continúa ►

Tabla 3. Aplicaciones de nano zinc en el control de insectos plaga de almacén (continuación).

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nanopartículas de zinc y de aluminio	Mortalidades de 18 a 83%, 23 a 99% y 70 a 100%, para cada tipo de nano material, respectivamente.	<i>Sitophilus granarius</i>	Rouhani et al. (2019)
Nanopartículas de óxido de zinc, titanio y aluminio	Las de zinc obtuvieron el menor porcentaje de control, pero son preferidas pues presentan propiedades antimicrobianas, ideales para la protección de granos almacenados.	<i>S. oryzae</i>	Das et al. (2019)
Nanopartículas de óxido de zinc y de silicio hidrofílico	Mortalidades de 100, 38.3 y 88.3%, con las primeras, mientras que con las nanopartículas de silicio las mortalidades registradas fueron 98.3, 58.3 y 81.6%, para cada especie, respectivamente. <i>T. castaneum</i> fue menos sensible a ambos tipos de nanopartículas.	<i>S. oryzae</i> , <i>T. castaneum</i> <i>C. maculatus</i>	Haroun et al. (2020)
Nanopartículas de zinc	Nano formulado de quitinasa bacteriana proveniente de una línea de <i>Lactobacillus coryniformis</i> mezclada con nanopartículas. Registró mortalidad de 100% a los 2.4 días post aplicación a una concentración de 6 ppm.	<i>S. zeamais</i>	Dikbaş et al. (2021)
Nanopartículas de zinc, titanio	Mortalidades a los 5 días de 33.9 y 29.8%, para zinc y titanio, respectivamente. Concluyendo que son herramientas efectivas en el control del insecto.	<i>T. castaneum</i>	Hilal et al. (2021)
Nanopartículas de óxido de zinc	Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc y el extracto de <i>Punica granatum</i> L., con mortalidades máximas de hasta 88.8% a 150 ppm.	<i>S. oryzae</i>	Ibrahim et al. (2022)
Nanopartículas de óxido de zinc	Síntesis y combinación de nanopartículas de óxido de zinc con extractos de <i>R. communis</i> , <i>Jatropha curcus</i> y <i>Citrus paradise</i> , logrando un control de hasta 66.3% para <i>T. castaneum</i> y 49.5% para <i>T. granarium</i> , correspondiente a la combinación con <i>R. communis</i> .	<i>T. castaneum</i> <i>T. granarium</i>	Haider et al. (2020)
Nanopartículas de óxido de zinc, plata y selenio.	Mortalidades desde 47 a 100% para los tres nano materiales a los 9 días. Concluyendo que son una herramienta para el control eficaz.	<i>R. dominica</i>	Aziz et al. (2022)
Nanopartículas de zinc	Síntesis de nanopartículas con extracto de <i>Eucaliptus globulus</i> L., y evaluaron el extracto y las nanopartículas, determinando la máxima mortalidad en 80.5%, observándose una reducción del valor de CL ₅₀ de 1043 a 202.1 ppm, del extracto solo vs las nanopartículas.	<i>R. dominica</i>	Siddique et al. (2022)
Nanopartículas de óxido de zinc	Emplearon nanopartículas como acarreadores de extracto de <i>Cinammomum verum</i> indicando que el nano formulado fue mejor que el extracto solo; sin embargo, la mortalidad máxima registrada fue de 12.9%.	<i>T. castaneum</i>	Al-Ameri et al. (2022)
Nanopartículas de zinc	Síntesis de nanopartículas empleando el extracto de semilla de <i>Silybum marianum</i> L., con mortalidades de 78% contra <i>T. castaneum</i> , y 74% para <i>S. oryzae</i> , a las 72 horas.	<i>T. castaneum</i> <i>S. oryzae</i>	Jahan et al. (2023)

Continúa ►

Tabla 3. Aplicaciones de nano zinc en el control de insectos plaga de almacén (continuación).

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nanopartículas de óxido de zinc	Mortalidades de 100% empleando nanopartículas de óxido de zinc con extracto de <i>Clausena anisata</i> Hook.	<i>S. zeamais</i>	Gindaba et al. (2023)
Nanopartículas de óxido de zinc	Evaluación de nanopartículas cargadas con el extracto de <i>Anagallis arvensis</i> L. a distintas concentraciones, contra larvas de tercer instar, registrando mortalidad máxima de 75% comparada con 10% del control y estimando una CL ₅₀ de 105.4 ppm.	<i>T. castaneum</i>	Maryum et al. (2024)
Nanopartículas de óxido de zinc no biogénico, biogénico y malatión 5D	Determinación del efecto insecticida, registrando valores de CL ₅₀ de 22.3, 46 y 4.7 mg/100g de semillas de maíz, respectivamente, para cada material. Concluyendo que las nanopartículas de origen no biogénico (elaboradas por la técnica de sol-gel) fueron más efectivas.	<i>S. oryzae</i>	Aisvarya et al. (2024)

Fuente: Elaboración de los autores.

Nanopartículas de grafeno

En la literatura es posible encontrar información de años recientes donde se brinda una perspectiva del interés que este material ha despertado en el área de nanoformulaciones para el control de insectos plaga por sus propiedades acarreadoras y amplia compatibilidad con moléculas (Anjeneyulu *et al.*, 2024) y ha sido empleado con éxito, por ejemplo, en el área industrial, biomédica, ambiental y agrícola con resultados prometedores (Ferrari *et al.*, 2015; Jin *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2017; Aghris *et al.*, 2023). El grafeno es un material 2D con una capa de átomos de carbono organizados de manera hexagonal, derivado del grafito, el cual crea un área emergente para explorar las propiedades insecticidas en aplicaciones agrícolas en un sentido costo-eficiente y que potencialmente sea utilizado en un gran número de nanoformulaciones (Song *et al.*, 2022; Sundaresan *et al.*, 2023).

Modo de acción

Si bien algunas investigaciones brindan indicios de que las nanopartículas de óxido de grafeno inducen estrés oxidativo en los insectos, aumentando la actividad de catalasas y glutatión peroxidadas (Dziewięcka *et al.*, 2016; De Marchi *et al.*, 2018; Fang, 2021) también genera la pérdida de agua vía daño mecánico de la cutícula, mismo que facilita la entrada de los diferentes ingredientes activos y, en consecuencia, mejora el efecto insecticida (Wang *et al.*, 2019). En relación con lo anterior, el modo de acción principal del grafeno podría equipararse al de las tierras inertes, esto es, por abrasión de la cutícula y sorción de lípidos cuticulares, mediante fuerzas triboeléctricas que le permitan adherirse, dañar y generar pérdida de agua provocando desecación del insecto (Athanassiou *et al.*, 2018).

La efectividad del nano grafeno podría verse influenciada por el número de capas, defectos y estructura atómica (carbono sp^2) del material nano escalado (Dasauni *et al.*, 2022; Moisisid *et al.*, 2022). Asimismo, se ha reportado una serie de efectos en insectos que han sido expuestos a nano grafeno y que contribuyen a la actividad insecticida, estos incluyen: disminución del número de huevos ovipositados post tratamiento, daño al ADN, aumento del contenido de colesterol, lípidos y triacilgliceroles, disminución de fertilidad y fecundidad, deshidratación, encogimiento y daño de la capa de cemento de la cutícula, disminución del número de oogonias y oocitos en tejidos ováricos, disminución del índice gonadosomático, aumento del nivel de proteínas de choque térmico, glucosil L Transferasas y Glutación S Transferasas, generación de ROS y decremento de la eficiencia de conversión de alimento en biomasa (Martins *et al.*, 2019, Wang *et al.*, 2019; Batool *et al.*, 2020; Flasz *et al.*, 2020; Fang *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021; Jampilek y Kralova, 2022; Sarmah *et al.*, 2023).

Aplicaciones

Sobre insectos plaga de granos almacenados existen algunas investigaciones con grafeno, en donde los autores señalan que se trata de una herramienta efectiva en el control de insectos plaga de almacén, a continuación, se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Aplicaciones de nano grafeno en el control de insectos plaga de almacén.

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
GQD- Graphene Quantum dots	Encapsulación de cisteína proteasa obtenida de <i>Albizia procera</i> L. Aplicaron 7 mg/g de alimento lograron mortalidades de 98 y 92%, para <i>T. castaneum</i> y <i>R. dominica</i> , respectivamente.	<i>T. castaneum</i> <i>R. dominica</i>	Batool <i>et al.</i> (2020)
Grafeno en polvo	Mortalidades de 100% a 500 ppm para <i>S. oryzae</i> y <i>R. dominica</i> a los 7 días post aplicación. Para <i>T. castaneum</i> se logró la misma mortalidad, hasta los 21 días.	<i>S. oryzae</i> <i>R. dominica</i> <i>T. castaneum</i>	Lampiri y Moisisid (2022)
Nano grafeno, dos tipos: Gr-1 y Gr-2	100% de mortalidad para las 3 especies, <i>S. oryzae</i> y <i>R. dominica</i> fueron más susceptibles pues se logró con 250 ppm, para <i>T. castaneum</i> a las 500 ppm.	<i>T. castaneum</i> <i>Phenacoccus solenopsis</i> T.	Moisisid <i>et al.</i> (2022).
Grafeno nanoparticulado (100 nm) tres tipos (nG1, nG2, nG3) y grafeno microparticulado (5, 10 y 25 μ m)	Los 3 nano materiales (si bien tenían el mismo tamaño de nano partícula, difieren en propiedades como nivel de oxígeno, carbono sp^2 , defectos estructurales, hidrofobicidad y número de capas) causaron mortalidad en las 3 especies, con intervalos de 98 a 100% para <i>S. oryzae</i> , 96.6 a 99.4% para <i>R. dominica</i> y de 48 a 85% en <i>P. truncatus</i> . En el caso de los microparticulados, estos fueron menos efectivos logrando mortalidades máximas de 47, 20 y 14% para cada especie, respectivamente.	<i>S. oryzae</i> <i>R. dominica</i> <i>P. truncatus</i>	Lampiri <i>et al.</i> (2024)

Continúa ►

Tabla 4. Aplicaciones de nano grafeno en el control de insectos plaga de almacén (continuación).

Material evaluado	Aplicación / resultado	Especie	Referencia
Nano partículas de grafeno y de óxido de zinc	En las nanopartículas fue cargada una proteína llamada inhibidor de tripsina tipo Kunitz, proveniente de la planta <i>Albizia procera</i> . Al comparar el efecto insecticida de la proteína sola vs los nanoformulados, estos últimos mostraron mejor efecto insecticida y de ellos el nanogrfeno fue mejor que el óxido de zinc, al aumentar la mortalidad un 67% más respecto de este último.	<i>T. castaneum</i>	Mehmood et al. (2024)

Fuente: Elaboración de los autores.

Conclusiones

Las especies *T. castaneum*, *S. zeamais* y *R. dominica* forman parte de las principales amenazas a los granos almacenados, y la nanotecnología emerge como un área innovadora y en constante desarrollo ofreciendo soluciones a los insecticidas químicos que forman parte del control tradicional de estas plagas.

Si bien las nanopartículas de los materiales analizados en esta revisión se proyectan como excelentes alternativas para su control, es necesario considerar estudios que profundicen en los mecanismos de acción para lograr una mejor comprensión del papel que juegan las estructuras protectoras de los insectos, tal como la capa de ceras cuticulares; cuyo contenido y variedad de lípidos podría influir en la sensibilidad a los distintos nanoparticulados, con la finalidad de lograr mejoras en el desarrollo de nano formulados, costo-eficientes, que provean soluciones al control químico tradicional. Asimismo, se necesita tomar en cuenta la etología de los insectos y los mecanismos de respuesta fisiológica a las aplicaciones de nanopartículas.

Es necesario profundizar en investigaciones sobre *S. zeamais*, pues, si bien especies del mismo género cuentan con estudios de la actividad insecticida de los nanomateriales aquí revisados, este carece de investigaciones propias.

Contribución de autorías

Ernesto Cerna Chávez y Saúl Enrique Uribe Rivera: concepción y modelado previo del artículo, elaboración de tablas, redacción del borrador original, edición final del texto.

Yisa María Ochoa Fuentes y Lisett Romero Pavón: búsqueda y clasificación de la información, supervisión de redacción y estructura del borrador original, corrección gramatical, edición final del texto.

Referencias

- Abd El-Latef, E. A., Wahba, M. N., Mousa, S., El-Bassyouni, G. T. y El-Shamy, A. M. (2023). Cu-doped ZnO-nanoparticles as a novel eco-friendly insecticide for controlling *Spodoptera littoralis*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 52(1): 102823. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102823>.
- Abdelfattah, N. A. y Zein, D. M. (2019). Biological studies and toxicity experiments of AEROSIL 200 nanoparticles on adults and larvae of some stored grain insects. *International Journal of Entomology Research*, 4(1): 103-108. <https://www.entomologyjournals.com/assets/archives/2019/vol4issue1/3-6-26-164.pdf>.
- Abdel-Halim, K. Y. y Attia, M. A. (2018). Toxicity of certain essential oils loaded on silica nanoparticles against *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) adults. *Egyptian Journal of Plant Protection Research*. 1(1): 19-31.
- Adegbola, R. Q., Atanda, S. A., Jimoh, M. O., Okparavero, N. F., Aremu, M. B., Ajayi, O. A., ... y Adegbola, J. A. (2024). Nanobiopesticides in post-harvest management of insect pests of crops: present status, challenges and prospects—a review. *Fudma Journal of Sciences*, 8(4): 40-54. <https://doi.org/10.33003/fjs-2024-0804-2557>.
- Adler, C., Athanassiou, C., Carvalho, M. O., Emekci, M., Gvozdenac, S., Hamel, D., ... y Trematerra, P. (2022). Changes in the distribution and pest risk of stored product insects in Europe due to global warming: need for pan-European pest monitoring and improved food-safety. *Journal of Stored Products Research*, 97(1): 101977. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.101977>.
- Aghris, S., Chhaibi, B., Ouattmane, F. Z., Alaoui, O. T., Laghrib, F., Farahi, A., ... y Mhammedi, M. E. (2023). An electrochemical sensor based on clay/graphene oxide decorated on chitosan gel for the determination of flubendiamide insecticide. *Materials Chemistry and Physics*, 296(1): 127243. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127243>.
- Aisvarya, S., Kalyanasundaram, M., Kannan, M., Arunkumar, P., Preetha, S., Elango, K. y Govindaraju, K. (2024). Comparative analysis of the insecticidal activity against *Sitophilus oryzae* (L.) and agro-morphological characteristics of maize using non-biogenic and biogenic ZnO nanoparticles. *Environmental Science: Nano*, 11(5): 2173-2187. <https://doi.org/10.1039/D3EN00839H>.
- Aisvarya, S., Kalyanasundaram, M., Kannan, M., Preetha, S., Elango, K., Srinivasan, T. y Govindaraju, K. (2023). Preparation and characterization of silica nanoparticles (sol-gel and river sand): a comparative toxicity studies against seed weevil (*Sitophilus oryzae* L), and effect on agro-morphological characteristics of maize seeds. *Materials Science and Engineering: B*, 293: 116503. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116503>.
- Al-Ameri, A. A. K., Jawad Al-Taie, R. A. R. y Kahdum, B. J. (2022). Study of the effect of aqueous cinnamon extract carried on nano zinc oxide in some life aspects of red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Biochemical & Cellular Archives*, 22(1). <https://connectjournals.com/03896.2022.22.2559>.
- Alfaro-Corres, A. E., González-Mendoza, D., Ruiz-Sánchez, E., Ail-Catzin, C., Valdez-Sa-

- las, B., Gutiérrez-Miceli, F., ... y Pierre, J. F. (2023). Insecticidal activity and physicochemical characterization of nanoparticles from foliar extract of *Capsicum chinense*. *Journal of Renewable Materials*. 1(1): 1-9. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.031129>.
- ALHusani, A. H. (2024). Evaluation of the efficacy of several plant-based insecticides and aqueous nano-silica formulations against the rust-red flour *Tribolium castaneum* (Herbst.) under laboratory conditions. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 2(3): 1042-1048. [https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2\(3\).xx](https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(3).xx).
- Alizadeh, M., Sheikhi-Garjan, A., Ma'mani, L., Hosseini Salekdeh, G. y Bandehagh, A. (2022). Ethology of sunn-pest oviposition in interaction with deltamethrin loaded on mesoporous silica nanoparticles as a nanopesticide. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1): 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00296-1>.
- Anandhi, S., Saminathan, V. R., Yasotha, P., Saravanan, P. T. y Rajanbabu, V. (2020). Nano-pesticides in pest management. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8(4): 685-690. <https://www.entomoljournal.com/archives/2020/vol8issue4/PartL/8-3-380-752.pdf>.
- Anees, M. M., Patil, S. B., Kambrekar, D. N., Chandrashekhar, S. S. y Jahagirdar, S. (2022). Biosynthesis, characterization, evaluation, and shelf-life study of silver nanoparticles against cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Noctuidae: Lepidoptera). *Nanomaterials*, 12(19): 3511. <https://doi.org/10.3390/nano12193511>.
- Anjaneyulu, B., Chauhan, V., Mittal, C. y Afshari, M. (2024). Innovative nanocarrier systems: a comprehensive exploration of recent developments in nano-biopesticide formulations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 113693. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113693>.
- Annon, M. R. y Jafar, F. S. (2020). The effectiveness of silver and silica nanoparticles on productivity and adult emergence of *Tribolium castaneum* and *Callosobruchus maculatus*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1664(1): 1-5, noviembre. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1664/1/012110>.
- Arumugam, G., Velayutham, V., Shanmugavel, S. y Sundaram, J. (2016). Efficacy of nanostructured silica as a stored pulse protector against the infestation of bruchid beetle, *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae). *Applied Nanoscience*, 6, 445-450. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0446-2>.
- 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): 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0>.
- Aziz, D. J. M., Haidir, A. A. y Mustafa, T. A. (2022). Effect of nanoparticles on some biological aspects of the lesser grain borer beetle *Rhyzopertha Dominica* (Fab.) (Coleoptera: Bostrichidae). *NVEO-Natural Volatiles y Essential Oils Journal* | NVEO, 487-500.
- Babamir-Satehi, A., Ziaee, M. y Ashrafi, A. (2017). Synthesis and toxicological evaluation of silica nanoparticles as chlorpyrifos carrier against the beetle pests

- Rhyzopertha dominica* and *Tribolium confusum*. *Journal of Entomological Society of Iran*, 37(2): 235-247.
- Badawy, A. A., Abdelfattah, N. A., Salem, S. S., Awad, M. F. y Fouad, A. (2021). Efficacy assessment of biosynthesized copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) on stored grain insects and their impacts on morphological and physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. *Biology*, 10(3): 233. <https://doi.org/10.3390/biology10030233>.
- Baliyarsingh, B. y Pradhan, C. K. (2023). Prospects of plant-derived metallic nanopesticides against storage pests – A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100687. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100687>.
- Banga, K. S., Kotwaliwale, N., Mohapatra, D. y Giri, S. K. (2018). Techniques for insect detection in stored food grains: an overview. *Food Control*, 94: 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.008>.
- Batool, M., Hussain, D., Akrem, A., Najam-ul-Haq, M., Saeed, S., Zaka, S. M., ... y Saeed, Q. (2020). Graphene quantum dots as cysteine protease nanocarriers against stored grain insect pests. *Scientific reports*, 10(1): 3444. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60432-5>.
- Benelli, G. (2018). Mode of action of nanoparticles against insects. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13): 12329-12341. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1850-4>.
- Bhatnagar, S., Mahanta, D. K., Vyas, V., Samal, I., Komal, J. y Bhoi, T. K. (2024). Storage pest management with nanopesticides incorporating silicon nanoparticles: a novel approach for sustainable crop preservation and food security. *Silicon*, 16(2): 471-483. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02694-y>.
- Cáceres, M., Vassena, C. V., Garcera, M. D. y Santo-Orihuela, P. L. (2019). Silica nanoparticles for insect pest control. *Current Pharmaceutical Design*, 25(37): 4030-4038. <https://doi.org/10.2174/1381612825666191015152855>.
- Cui, S., Wu, Y., Cui, Z., He, P., Huang, N., Xu, W. y Hu, J. (2023). Low-frequency ultrasound-assisted biosynthesis and characterization of ZnO nanoparticles using *Bacillus thuringiensis* against *Tribolium castaneum* (Coleoptera, Tenebrionidae). *Materials Letters*, 341(1): 134158. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134158>.
- Das, S., Yadav, A. y Debnath, N. (2019). Entomotoxic efficacy of aluminium oxide, titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L.): a comparative analysis. *Journal of Stored Products Research*, 83(1): 92-96. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.06.003>.
- Dasauni, K., Mathpal, P. y Nailwal, T. K. (2022). Polymeric nanoparticle-based insecticide: a critical review of agriculture production. *Nano-Enabled Agrochemicals in Agriculture*, 445-466. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91009-5.00015-X>.
- Dash, S., Mahapatro, G. K. y Naik, D. J. (2024). Nanopesticides: pros and cons. *Plant Archives*, 24(2): 107-115. <https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2024.v24.no.2.014>.
- De Marchi, L., Pretti, C., Gabriel, B., Marques, P. A. A. P., Freitas, R., Neto, V. (2018). An overview of graphene materials: properties, applications and toxicity on aquatic environments. *Science of The Total Environment*. 631-632: 1440-1456.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.132>.
- Dikbaş, N., Uçar, S., Tozlu, G., Öznülüer Özer, T. y Kotan, R. (2021). Bacterial chitinase biochemical properties, immobilization on zinc oxide (ZnO) nanoparticle and its effect on *Sitophilus zeamais* as a potential insecticide. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(1): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03138-8>.
- Din, M. I. y Rehan, R. (2017). Synthesis, characterization, and applications of copper nanoparticles. *Analytical Letters*, 50(1): 50-62. <https://doi.org/10.1080/00032719.2016.1172081>.
- Draz, K. A., Mohamed, M. I., Tabikha, R. M., Darwish, A. A. y Abo-Bakr, M. A. (2021). Assessment of some physical measures as safe and environmentally friendly alternative control agents for some common coleopteran insects in stored wheat products. *Journal of Plant Protection Research*, 61(2):156-169. <https://doi.org/10.24425/jppr.2021.137025>.
- Dziewięcka, M., Karpeta-Kaczmarek, J., Augustyniak, M., Majchrzycki, Ł. y Augustyniak-Jabłokow, M. A. (2016). Evaluation of *in vivo* graphene oxide toxicity for *Acheta domesticus* in relation to nanomaterial purity and time passed from the exposure. *Journal of Hazardous Materials*, 305(1): 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.021>.
- Eker, F., Duman, H., Akdaşçı, E., Bolat, E., Sarıtaş, S., Karav, S. y Witkowska, A. M. (2024). A comprehensive review of nanoparticles: from classification to application and toxicity. *Molecules*, 29(15): 3482. <https://doi.org/10.3390/molecules29153482>.
- El Sayed, T. S., Rizk, S. A. y Sayed, R. M. (2023). Cellophane packaging treated with nano silica is superior to polyethylene in reducing stored irradiated flour from *Tribolium confusum* infestation. *International Journal of Tropical Insect Science*, 43(6): 2121-2127. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01111-6>.
- El-Bendary, H. M., Abdel-Wahab, A. S. y El-Helaly, A. A. (2016). Entomo-toxic assay of nano-aluminum oxide and nano-zinc oxide against *Sitophilus oryzae* as a promising insecticide. *Egyptian Journal of Zoology*, 174(4083): 1-8. <https://dx.doi.org/10.12816/0034708>.
- Elmasry, N. S. (2021). Efficacy of zinc oxide nanoparticle adding to two neonicotinoids pesticides against *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Aphis gossypii* Glover. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, F. Toxicology y Pest Control*, 13(1): 209-215. <https://doi.org/10.21608/eajbsf.2021.161964>.
- El-Naggar, M. E., Abdelsalam, N. R., Fouda, M. M., Mackled, M. I., Al-Jaddadi, M. A., Ali, H. M., ... y Kandil, E. E. (2020). Soil application of nano silica on maize yield and its insecticidal activity against some stored insects after the post-harvest. *Nanomaterials*, 10(4): 739. <https://doi.org/10.3390/nano10040739>.
- El-Saadony, M. T., Abd El-Hack, M. E., Taha, A. E., Fouda, M. M., Ajarem, J. S., N. Maodaa, S. y Elshaer, N. (2020). Ecofriendly synthesis and insecticidal application of copper nanoparticles against the storage pest *Tribolium castaneum*. *Nanomaterials*, 10(3): 587. <https://doi.org/10.3390/nano10030587>.
- El-Samahy, M. F. M., Hamza, A. M. M. y El-Ghobary, A. M. A. (2015). A new silica

- nanoparticles formulation as stored product protectant. *Egyptian Journal of Plant Protection Research*, 3(2): 88-103. <https://www.researchgate.net/profile/Magdy-El-Samahy/publication/311954607>.
- EL-Shewy, A. M. (2019). Toxicity of different nano oils formulation against adults of rice weevil, *Sitophilus Oryzae* under laboratory conditions. *Annals of Agriculture Science, Moshtohor*. 57(3): 1-6. <https://doi.org/10.21608/assjm.2019.98135>.
- Eskin, A. y Nurullahoğlu, Z. U. (2022). Effects of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) on the biology of *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera: Pyralidae). *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 83(1): 54. <https://doi.org/10.1186/s41936-022-00318-2>.
- Fang, Y., Lu, Z., Li, M., Qu, J., Ye, W., Li, F., ... y Li, B. (2021). An assessment of the reproductive toxicity of GONPs exposure to *Bombyx mori*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 210(1): 111888. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111888>.
- Feng, J., Chen, W., Shen, Y., Chen, Q., Yang, J., Zhang, M., ... y Yuan, S. (2020). Fabrication of abamectin-loaded mesoporous silica nanoparticles by emulsion-solvent evaporation to improve photolysis stability and extend insecticidal activity. *Nanotechnology*, 31(34): 345705. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab91f0>.
- Ferrari, A. C., Bonaccorso, F., Falk's, V., Novoselov, K. S., Roche, S., Bøggild, P., ... y Kinnaret, J. (2015). Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale*, 7(11): 4598-4810. <https://doi.org/10.1039/C4NR01600A>.
- Flasz, B., Dziewięcka, M., Kędzierski, A., Tarnawska, M. y Augustyniak, M. (2020). Vitellogenin expression, DNA damage, health status of cells and catalase activity in *Acheta domesticus* selected according to their longevity after graphene oxide treatment. *Science of The Total Environment*, 737: 140274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140274>.
- Gacem, M. A. y Chaibi, R. (2022). Cu-based nanoparticles as pesticides: applications and mechanism of management of insect pests. In *Copper nanostructures: next-generation of agrochemicals for sustainable agroecosystems*. Elsevier, 203-218. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823833-2.00023-4>.
- Gamal, M. M. Z. (2018). Nano-particles: a recent approach for controlling stored grain insect pests. *Conference Proceedings*, 6(5): 88-94. <https://doi.org/10.15413/ajar.2017.IECCNA.14>.
- Gao, X., Shi, F., Peng, F., Shi, X., Cheng, C., Hou, W., ... y Wang, X. (2021). Formulation of nanopesticide with graphene oxide as the nanocarrier of pyrethroid pesticide and its application in spider mite control. *RSC Advances*, 11(57): 36089-36097. <https://doi.org/10.1039/D1RA06505J>.
- Gindaba, A., Negeri, M. y Saka, A. (2023). Entomotoxicity of ZnO NPs synthesized using *Clausena anisata* Hook. f. ex Benth (ulmaayii) leaf extract against maize weevil, *Sitophilus zeamais* Mostch (Coleoptera: curculionidae). *Journal of Phytology*, 15(1): 155-162. <https://doi.org/10.25081/jp.2023.v15.8620>.
- Gouda, M. R. y Ashwini, L. M. B. (2023). Emerging role of entomopathogenic fungi in nanoparticle synthesis and their application in pest control. *Journal of Plant Biology and Crop Research*. 6(2): 1-8.

- Gupta, R., Saxena, T., Mehra, N., Arora, R. y Sahgal, A. (2023). Nanopesticides: promising future in sustainable pest management. *Journal of Advanced Applied Scientific Research*, 5(2): 22-37. <https://doi.org/10.46947/joaasr522023515>.
- Guru, P. N., Mridula, D., Dukare, A. S., Ghodki, B. M., Paschapur, A. U., Samal, I., ... y Subbanna, A. R. (2022). A comprehensive review on advances in storage pest management: current scenario and future prospects. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6(1): 1-21. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.993341>.
- Haider, Z., Ayub, A. R., Tahir, M. U., Sajid, S. A. y Khalid, M. (2020). Efficacy and characterization of synthesized zinc oxide nanoparticles against *Tribolium castaneum* and *Trogoderma granarium*. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 10(3): 131-151. <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.10.03.2020.p9912>.
- Hamdy, E., Al-Askar, A. A., El-Gendi, H., Khamis, W. M., Behiry, S. I., Valentini, F., ... y Abdelkhalek, A. (2023). Zinc oxide nanoparticles biosynthesized by *Eriobotrya japonica* leaf extract: characterization, insecticidal and antibacterial properties. *Plants*, 12(15): 2826. <https://doi.org/10.3390/plants12152826>.
- 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-Tenorio, F. y Orozco-Sánchez, F. (2020). Nanoformulaciones de bioinsecticidas botánicos para el control de plagas agrícolas. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 9(1): 72-91. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n1.81401>.
- Hilal, S. M., Mohamed, A. S., Barry, N. M. y Ibrahim, M. H. (2021). Entomotoxicity of TiO₂ and ZnO nanoparticles against adults *Tribolium Castaneum* (Herbert) (Coleoptera: Tenebrionidae). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 910(1): 012088, noviembre. *IOP Publishing*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/910/1/012088>.
- Ibrahim, S., Elbe Hery, H. y Samy, A. (2022). Insecticidal activity of ZnO NPs synthesized by green method using pomegranate peels extract on stored product insects. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(4): 135-145. <https://dx.doi.org/10.21608/ejchem.2021.92692.4496>.
- Jafar, F. S. y Annon, M. R. (2018). Insecticidal effect of silica nanoparticles against *Tribolium castaneum* and *Callosobruchus maculatus*. *Biochemical y Cellular Archives*, 18(1).
- Jafir, M., Irfan, M., Zia-ur-Rehman, M., Hafeez, F., Ahmad, J. N., Sabir, M. A., ... y Moosa, A. (2023). The global trend of nanomaterial usage to control the important agricultural arthropod pests: a comprehensive review. *Plant stress*, 10, 100208. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100208>.
- Jahan, N., Rasheed, K., Hazafa, A., Saleem, A., Alamri, S., Iqbal, M. O. y Rahman, M. A. (2023). Green inspired synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Silybum marianum* (milk thistle) extract and evaluation of their potential pesticidal and phytopathogens activities. *PeerJ*, 11: e15743. <https://doi.org/10.7717/peerj.15743>.
- 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>.
- Jampilek, J. y Kralova, K. (2022). Advances in biologically applicable graphene-based 2D nanomaterials. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(11): 1-38. <https://doi.org/10.3390/ijms23116253>.
- Jin, T., Li, F., Cheng, J., Wu, S., Zhou, H. y Cheng, M. (2016). Polymer monolithic column containing embedded graphene oxide sheets for sensitive determination of carbamate insecticides by HPLC. *Microchimica Acta*, 183(1): 543-551. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1637-y>.
- Kah, M. y Hofmann, T. (2014). Nanopesticide research: current trends and future priorities. *Environment International*, 63(1): 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.015>.
- Kannan, M., Bojan, N., Swaminathan, J., Zicarelli, G., Hemalatha, D., Zhang, Y., ... y Faggio, C. (2023). Nanopesticides in agricultural pest management and their environmental risks: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(9): 10507-10532. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04795-y>.
- Kar, S., Nayak, R. N., Sahoo, N. R., Bakhara, C. K., Panda, M. K., Pal, U. S. y Bal, L. M. (2021). Rice weevil management through application of silica nano particle and physico-chemical and cooking characterization of the treated rice. *Journal of Stored Products Research*, 94: 101892. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101892>.
- Kora, A. J. (2022). Copper-based nanopesticides. Copper nanostructures: next-generation of agrochemicals for sustainable agroecosystems. *Nanobiotechnology for Plant Protection*, 133-153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823833-2.00019-2>.
- Kumar, S., Bhanjana, G., Sharma, A., Dilbaghi, N., Sidhu, M. C. y Kim, K. H. (2017). Development of nanoformulation approaches for the control of weeds. *Sci. Total Environment*, 586(1): 1272-1278. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.138>.
- Lampiri, E. y Moisisdis, I. C. (2022). Evaluation of graphene for the control of stored product insects. *Proceedings of the 13th Meeting, Integrated Protection of Stored Products*. 159(1): 171-175. <https://iobc-wprs.org/product/iobc-wprs-bulletin-vol-159-2022/>.
- Lampiri, E., Yap, P. L., Berillis, P., Athanassiou, C. G. y Losic, D. (2024). Graphene powders as new contact nanopesticides: revealing key parameters on their insecticidal activity for stored product insects. *Chemosphere*, 364: 143200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143200>.
- Li, C., Han, Y., Gao, T., Zhang, J., Xu, D. X. y Wang, Y. (2023). Insecticidal activity of metallic nanopesticides synthesized from natural resources: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2): 1141-1176. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01548-0>.
- Li, X., Chen, Y., Xu, J., Lynch, I., Guo, Z., Xie, C. y Zhang, P. (2023). Advanced nanopesticides: advantage and action mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108051. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108051>.
- Liu, G., Li, L., Xu, D., Huang, X., Xu, X., Zheng, S., ... y Lin, H. (2017). Metal-organic

- framework preparation using magnetic graphene oxide- β -cyclodextrin for neonicotinoid pesticide adsorption and removal. *Carbohydrate Polymers*, 175(1): 584-591. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.06.074>.
- Manandhar, A., Milindi, P. y Shah, A. (2018). An overview of the post-harvest grain storage practices of smallholder farmers in developing countries. *Agriculture*, 8(4): 57. <https://doi.org/10.3390/agriculture8040057>.
- Manna, S., Roy, S., Dolai, A., Ravula, A. R., Perumal, V. y Das, A. (2023). Current and future prospects of “all-organic” nanoinsecticides for agricultural insect pest management. *Frontiers in Nanotechnology*, 4: 1082128. <https://doi.org/10.3389/fnano.2022.1082128>.
- Martins, C. H., de Sousa, M., Fonseca, L. C., Martinez, 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>.
- Maryum, A., Yasmin, H., Saeed, Q., Ahmed, A. M., Popescu, S. M. y Ahmad, F. (2024). Phytofabrication and characterization of ZnO nanoparticles with *Anagallis arvensis* as promising eco-friendly insecticide against *Tribolium castaneum* Herbst. *Journal of King Saud University-Science*, 36(5): 103162. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103162>.
- Mehmood, S., Thirup, S. S., Ahmed, S., Bashir, N., Saeed, A., Rafiq, M., ... y Akrem, A. (2024). Crystal structure of Kunitz-type trypsin inhibitor: entomotoxic effect of native and encapsulated protein targeting gut trypsin of *Tribolium castaneum* Herbst. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 23: 3132-3142. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.07.023>.
- Mesterházy, Á., Oláh, J. y Popp, J. (2020). Losses in the grain supply chain: causes and solutions. *Sustainability*, 12(6): 1-18. <https://doi.org/10.3390/su12062342>.
- Moisisdis, I. C., Sakka, M. K., Karunakaran, R., Losic, D. y Athanassiou, C. G. (2022). Insecticidal effect of graphene against three stored-product beetle species on wheat. *Journal of Stored Products Research*, 98(1): 101999. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.101999>.
- Mubeen, I., Mfarrej, M. F. B., Razaq, Z., Iqbal, S., Naqvi, S. A. H., Hakim, F., ... y Li, B. (2023). Nanopesticides in comparison with agrochemicals: outlook and future prospects for sustainable agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107670. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107670>.
- Mustafa, I. F. y Hussein, M. Z. (2020). Synthesis and technology of nanoemulsion-based pesticide formulation. *Nanomaterials*, 10(8): 1608. <https://doi.org/10.3390/nano10081608>.
- Nasr, M. (2015). Impact of nanoparticle zinc oxide and aluminum oxide against rice weevil *Sitophilus Oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) under laboratory conditions. *Egyptian Journal of Plant Protection. Research*, 3(3): 30-38. <https://kfs.edu.eg/agre/pdf/184201611233516.pdf>.
- Padmasri, A., Rameash, K. y Jayanth, B. V. (2023). Nanoparticles-an alternate strategy for the management of rice weevil (*Sitophilus oryzae* Linnaeus) in maize

- seeds. *Journal of Experimental Zoology India*, 26(2). <https://doi.org/10.51470/jez.2023.26.2.2255>.
- Paradva, K. C. y Kalla, S. (2023). Nanopesticides: a review on current research and future perspective. *Chemistry Select*, 8(26): e202300756. <https://doi.org/10.1002/slct.202300756>.
- Patil, C. D., Borase, H. P., Suryawanshi, R. K. y Patil, S. V. (2016). Trypsin inactivation by latex fabricated gold nanoparticles: a new strategy towards insect control. *Enzyme and Microbial Technology*, 92(1): 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.06.005>.
- Patil, N. B., Sharanagouda, H., Ramachandra, C. T., Ramappa, K. T., Doddagoudar, S. R. y Nadagouda, S. (2018). Efficacy of rice husk silica nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L) and *Xanthomonas oryzae*. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(4S): 259-264.
- 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(11): 1017. <https://doi.org/10.3390/insects12111017>.
- Rai, M., Ingle, A. P., Pandit, R., Paralikar, P., Shende, S., Gupta, I., ... y da Silva, S. S. (2018). Copper and copper nanoparticles: role in management of insect-pests and pathogenic microbes. *Nanotechnology Reviews*, 7(4): 303-315. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0031>.
- Rajendran, S. (2020). Insect pest management in stored products. *Outlooks on Pest Management*, 31(1): 24-35. https://doi.org/10.1564/v31_feb_05.
- Rajiv, P., Chen, X., Li, H., Rehaman, S., Vanathi, P., Abd-Elsalam, K. A. y Li, X. (2020). Silica-based nanosystems: their role in sustainable agriculture. In *Multifunctional hybrid nanomaterials for sustainable agri-food and ecosystems*. Elsevier, 437-459. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821354-4.00018-2>.
- Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., ... y Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*, 9: 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>.
- Rathore, A., Hasan, W., NM, R., Pujar, K., Singh, R., Panotra, N. y Satapathy, S. N. (2024). Nanotech for crop protection: utilizing nanoparticles for targeted pesticide delivery. *UTTAR Pradesh Journal of Zoology*, 45(6): 46-71. <https://doi.org/10.56557/upjz/2024/v45i63950>.
- 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*, 1(1): 26-31. <https://doi.org/10.24425/jppr.2020.132211>.
- Saed, B., Ziaee, M., Kiasat, A. R. y Jafari nasab, M. (2020). Preparation of nanosilica from sugarcane bagasse ash for enhanced insecticidal activity of diatomaceous earth against two stored-products insect pests. *Toxin Reviews*, 41(2): 516-522. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.1903038>.
- Saed, B., Ziaee, M., Kiasat, A. y Jafari Nasab, M. (2021). Evaluation of Iranian diatomaceous earth in combination with nanosilica from sugarcane bagasse ash ap-

- plied on three different storage surfaces against two insect pests of stored products. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41: 1747-1752. <https://doi.org/10.1007/s42690-020-00380-9>.
- Salah, S., Alyousuf, A. A. y Abass, M. H. (2023). Efficiency of silicon and silver nanoparticles against the infestation of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on wheat grains under laboratory conditions. *Basra Journal of Agricultural Sciences*, 36(2): 175-184. <https://doi.org/10.37077/25200860.2023.36.2.13>.
- Salem, A. A. (2020). Comparative insecticidal activity of three forms of silica nanoparticles on some main stored product insects. *Journal of Plant Protection and Pathology*, 11(4): 225-230. <https://dx.doi.org/10.21608/jppp.2020.96009>.
- Salem, A. A., Hamzah, A. M. y El-Taweelah, N. M. (2015). Aluminum and zinc oxides nanoparticles as a new method for controlling the red flour beetles, *Tribolium castaneum* (Herbst) compared to malathion insecticide. *Journal of Plant Protection and Pathology*, 6(1): 129-137. <https://dx.doi.org/10.21608/jppp.2015.53186>.
- Sarmah, K., Borah, R., Boruah, S. y Sarmah, D. (2023). Nanopesticides: revolutionizing pest management with nanotechnology. *Biological Forum – An International Journal*, 15(7): 210-218.
- Saw, G., Namdev, P., Jeer, M. y Murali-Baskaran, R. K. (2023). Silica nanoparticles mediated insect pest management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 194(1): 105524. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105524>.
- 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>.
- Sharma, S., Singh, S., Ganguli, A. K. y Shanmugam, V. (2017). Anti-drift nano-stickers made of graphene oxide for targeted pesticide delivery and crop pest control. *Carbon*, 115(1): 781-790. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.075>.
- Shekhar, S., Sharma, S., Kumar, A., Taneja, A., and Sharma, B. (2021). The framework of nanopesticides: a paradigm in biodiversity. *Materials Advances* 2: 6569-6588. <https://doi.org/10.1039/D1MA00329A>.
- Siddique, M. A., Hasan, M. U., Sagheer, M. y Sahi, S. T. (2022). Comparative toxic effects of *Eucalyptus globulus* L. (Myrtales: Myrtaceae) and its green synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 42(1): 1697-1706. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00691-5>.
- Singh, B. y Kaur, A. (2018). Control of insect pests in crop plants and stored food grains using plant saponins: a review. *Lwt*, 87(1): 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.077>.
- Solorzano Toala, R., Gutierrez-Miceli, F., Valdez-Salas, B., Beltran-Partida, E., Gonzalez-Mendoza, D., Tzintzun-Camacho, O., ... y Basilio-Cortes, A. (2024). Biosynthesis of copper nanoparticles from *Acacia cornigera* and *Annona purpurea* and their insecticidal effect against *Tribolium castaneum*. *Reactions*, 5(2): 274-284. <https://doi.org/10.3390/reactions5020013>.
- Song, S., Wan, M., Feng, W., Zhang, J., Mo, H., Jiang, X., ... y Shen, J. (2021). Gra-

- phene oxide as the potential vector of hydrophobic pesticides: ultrahigh pesticide loading capacity and improved antipest activity. *ACS Agricultural Science y Technology*, 1(3): 182-191. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsagscitech.1c00002?goto=supporting-info>.
- Srivastava, C. y Subramanian, S. (2016). Storage insect pests and their damage symptoms: an overview. *Indian Journal of Entomology*, 78(1): 53-58. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-8172.2016.00025.0>.
- Stathas, I. G., Sakellariadis, A. C., Papadelli, M., Kapolos, J., Papadimitriou, K. y Stathas, G. J. (2023). The effects of insect infestation on stored agricultural products and the quality of food. *Foods*, 12(10): 1-11. <https://doi.org/10.3390/foods12102046>.
- Stejskal, V., Aulicky, R. y Kucerova, Z. (2014). Pest control strategies and damage potential of seed-infesting pests in the Czech stores — A review. *Plant Protection Science*, 50(4): 165-173. <https://doi.org/10.17221/10/2014-pps>.
- Summer, M., Tahir, H. M., Ali, S., Nawaz, S., Abaidullah, R., Mumtaz, S., ... y Gormani, A. H. (2024). Nanobiopesticides as an alternative and sustainable solution to tackle pest outbreaks. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 96(4): 112-136. <https://doi.org/10.2317/0022-8567-96.4.112>.
- Sundaresan, P., Karikalan, N., Na, J. H. y Lee, T. Y. (2023). Design and investigation of barium vanadate nanoflakes incorporated on the multi-layered graphene nanocomposite: an efficient electrocatalyst for the rapid determination of hazardous insecticide methiocarb in environmental media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2): 109220. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109220>.
- Thabet, A. F., Boraei, H. A., Galal, O. A., El-Samahy, M. F., Mousa, K. M., Zhang, Y. Z., ... y Nozaki, T. (2021). Silica nanoparticles as pesticide against insects of different feeding types and their non-target attraction of predators. *Scientific Reports*, 11(1): 14484. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93518-9>.
- Thakur, P., Thakur, S., Kumari, P., Shandilya, M., Sharma, S., Poczai, P., ... 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(12): 3835-3850. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02530-6>.
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., ... y Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities. *Science of the total environment*, 721(1): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>.
- Victoria, J., Tripathi, S., Prakash, V., Tiwari, K., Mahra, S., Sharma, A., ... y Sharma, S. (2023). Encapsulated nanopesticides application in plant protection: *Quo vadis?* *Plant Physiology and Biochemistry*, 108225. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108225>.
- Vivekanandhan, P., Deepa, S., Kweku, E. J. y Shivakumar, M. S. (2018). Toxicity of *Fusarium oxysporum*-VKFO-01 derived silver nanoparticles as potential insecticide against three mosquito vector species (Diptera: Culicidae). *Journal of Cluster Science*, 29(1): 1139-1149. <https://doi.org/10.1007/s10876-018-1423-1>.

- Wang, X., Xie, H., Wang, Z., He, K. y Jing, D. (2019). Graphene oxide as a multifunctional synergist of insecticides against lepidopteran insect. *Environmental Science: Nano*, 6(1): 75-84. <https://doi.org/10.1039/C8EN00902C>.
- Wang, X., Zhang, T., Xie, H., Wang, Z., Jing, D., He, K. y Gao, X. (2021). Phenotypic responses and potential genetic mechanism of lepidopteran insects under exposure to graphene oxide. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 228: 113008. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113008>.
- Wazid, S. N., Prabhuraj, A., Naik, R. H., Shakuntala, N. M. y Sharanagouda, H. (2020). The persistence of residual toxicity of zinc, copper and silica green nanoparticles against important storage pests. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8(5): 1207-1211.
- Xu, Z., Tang, T., Lin, Q., Yu, J., Zhang, C., Zhao, X., ... y Li, L. (2022). Environmental risks and the potential benefits of nanopesticides: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3): 2097-2108. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01338-0>.
- Yadav, J., Jasrotia, P., Kashyap, P. L., Bhardwaj, A. K., Kumar, S., Singh, M. y Singh, G. P. (2021). Nanopesticides: current status and scope for their application in agriculture. *Plant Protection Science*, 58(1): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01338-0>.
- Yang, F. L., Li, X. G., Zhu, F. y Lei, C. L. (2009). Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(21): 10156-10162. <https://doi.org/10.1021/jf9023118>.
- Yuvaraj, M., Priya, R. S., Jagathjothi, N., Saranya, M., Suganthi, N., Sharmila, R., ... y Subramanian, K. S. (2023). Silicon nanoparticles (SiNPs): challenges and perspectives for sustainable agriculture. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 102161. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102161>.
- Zannat, R., Rahman, M. M. y Afroz, M. (2021). Application of nanotechnology in insect pest management: a review. *SAARC Journal of Agriculture*, 19(2): 1-11. <https://doi.org/10.3329/sja.v19i2.57668>.
- Zayed, G. M. M., Hussain, H. B. H. y Soliman, M. E. S. (2020). Aluminum and silica oxides nanoparticles as a new approach for control the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) on wheat grains. *Egyptian Journal of Plant Protection Research Institute*. (2020): 3(1): 281-289. <http://www.ejppri.eg.net/pdf/v3n1/25.pdf>.
- Ziaee, M. y Ganji, Z. (2016). Insecticidal efficacy of silica nanoparticles against *Rhyzopertha dominica* F. and *Tribolium confusum* Jacquelin du Val. *Journal of Plant Protection Research*, 56(3): 250-256. <https://doi.org/10.1515/jppr-2016-0037>.