

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA



Efecto Insecticida de Nanopartículas Metálicas para el Control de *Bactericera cockerelli*
Sulc. (Hemiptera: Triozidae) Bajo Condiciones de Laboratorio

Por:

ISIDRO DAMIAN HERNANDEZ ROSAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITOLÓGO

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA

Efecto Insecticida de Nanopartículas Metálicas para el Control de *Bactericera cockerelli*
Sulc. (Hemiptera: Triozidae) Bajo Condiciones de Laboratorio

Por:

ISIDRO DAMIAN HERNANDEZ ROSAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de
INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Aprobada por el Comité de Asesoría:



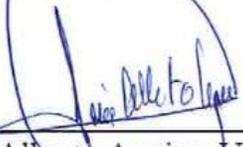
Dr. Agustín Hernández Juárez
Asesor Principal Interno



M.C. Vidal Zavala Zapata
Asesor Principal Externo



Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón
Coasesor



Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2023

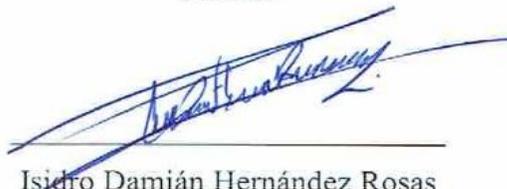
Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Isidro Damián Hernández Rosas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mi formación académica a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que fue una segunda casa para mí, la cual me brindó varios conocimientos y aprendizajes en mi camino para completar mi meta de ser Ingeniero Agrónomo. En especial agradezco al Departamento de Parasitología y sus docentes que estuvieron al pendiente de mí y me instruyeron paso a paso en su debido momento.

Al Dr. Agustín Hernández Juárez por brindarme su confianza y apoyo en todo momento para la realización de mi trabajo de tesis, al M.C. Vidal Zavala Zapata por apoyarme durante la realización de la tesis, así como a la Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón y Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe.

También agradezco a mis compañeros de parasitología Letycia, Omar y Erick que me apoyaron en algunas actividades para la tesis y me estuvieron acompañando. Además de mis amigos Alejandro y José que estuvieron conmigo en todo momento.

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de tesis a mis padres Ruperto Hernández Bonilla y Teresa Rosas Cruztitla quienes me criaron, educaron y me han apoyado hasta este momento de mi vida. A mis tíos que estuvieron de igual manera apoyándome en mi formación universitaria Roque, Nayeli, Lilibeth y Julieta. A mi amiga Hermila que me alentó a seguir adelante y no darme por vencido.

A mis amigos de la universidad quienes me apoyaron y estuvieron conmigo en momentos malos y buenos, con quienes conviví durante todo el tiempo de la universidad e hicieron más gratos todos los momentos que pasé.

Al Departamento de Parasitología que día a día se esmera en formar a todos los alumnos que entramos en la carrera para tener un mejor futuro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XII
INTRODUCCIÓN	1
Justificación	3
Objetivo	3
Hipótesis	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Nanotecnología	4
Nanopartículas en la agricultura	4
Nanofertilizantes.....	5
Nanoplaguicidas	5
Interacción entre Nanopartículas y Plantas.....	6
Efecto Insecticida de las Nanopartículas metálicas	7
Modo de Acción de las Nanopartículas Metálicas sobre Insectos.....	8
Nanopartículas de Oro en el control de Insectos	12
Nanopartículas de Plata en el Control de Insectos.....	13
<i>Bactericera cockerelli</i>	14
Origen	14
Taxonomía de <i>Bactericera cockerelli</i>	14
Generalidades	15
Distribución	15
Ciclo de vida de <i>Bactericera cockerelli</i>	16
Importancia como plaga	18
Principales hospederos y daño.....	19
Estrategias de control de <i>Bactericera cockerelli</i>	20
MATERIALES Y METODOS	23
Ubicación del experimento	23
Colonia de <i>Bactericera cockerelli</i>	23

Material vegetativo para colonia y bioensayos	23
Síntesis y caracterización de Nanopartículas de Oro y Plata.....	24
Evaluación de nanoparticulas metalicas sobre <i>Bactericera cockerelli</i> bajo condiciones de laboratorio.....	26
Diseño experimental	27
Análisis de resultados	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
CONCLUSIONES	38
LITERATURA CITADA	39

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Modo de acción representativo de diferentes NPs sobre varios insectos de interés económico (Benelli, 2018).....	10
Cuadro 2. Grupos de insecticidas para el control del psílido de la papa y el tomate (OIRSA, 2015).	21
Cuadro 3. Porcentaje de mortalidad y concentraciones letales (50 y 95) en ninfas de <i>B. cockerelli</i> por nanopartículas de oro en condiciones de laboratorio.....	31
Cuadro 4. Porcentaje de mortalidad y concentraciones letales (50 y 95) en ninfas de <i>B. cockerelli</i> por nanopartículas de plata en condiciones de laboratorio.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las vías de absorción y translocación de NPs en las plantas. (A). Transporte por medio de la raíz. (B). Transporte por medio del follaje (Jitao <i>et al.</i> , 2019)..	7
Figura 2. Diferente modo de acción de diversos tipos de NPs sobre insectos. Los puntos rojos señalan los daños mayores (Benelli, 2018).....	9
Figura 3. Taxonomía de <i>Bactericera cockerelli</i> (Vereijssen, 2022).....	14
Figura 4. Distribución mundial de <i>B. cockerelli</i> (EPPO, 2022).	15
Figura 5. Ciclo de vida de <i>B. cockerelli</i> (Lasso <i>et al.</i> , 2021).....	18
Figura 6. Jaulas y material vegetativo utilizado para establecer la colonia de <i>B. cockerelli</i>	24
Figura 7. Proceso de la síntesis de las NPs de plata.	25
Figura 8. Proceso de la síntesis de las NPs de oro.	26
Figura 9. Evaluación de nanopartículas acorde al diseño experimental.	27
Figura 10. Análisis de resultados en ninfas de <i>B. cockerelli</i>	28
Figura 11. (A). Micrografía de TEM de las NPs de plata. (B) EDX de las NPs de plata.....	29
Figura 12. Correlación entre el color y tamaño de la nanopartícula de oro.....	30
Figura 13. Disoluciones con nanopartículas de oro de distintos tamaños. Imagen obtenida de Ruvalcaba <i>et al.</i> (2020) Nanopartículas de oro a partir de extracto de damiana (<i>Turnera diffusa</i>).	30
Figura 14. Mortalidad de ninfas de segundo estadio de <i>B. cockerelli</i> . (A-D): Daños por necrosis, deshidratación y apoptosis causas por NPs de plata. (E-H): Daños por deshidratación, apoptosis y constricción.	36

RESUMEN

La paratrioza *B. cockerelli* Sulc., es un insecto de importancia económica por los daños provocados en diversos cultivos. En México se encuentra distribuida en varias zonas productoras de solanáceas. El insecto ocasiona dos tipos de daño, daño directo por alimentación y daño indirecto, el más problemático debido a que transmite fitoplasmas como *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CL_{so}), patógeno responsable de causar la punta morada de la papa o zebra chip, permanente del tomate y variegado del chile. Su control está centrado en el uso de insecticidas convencionales, pero debido al daño al ambiente, salud humana y al desarrollo de resistencia en los insectos, y a los cambios en la normativa de los plaguicidas, se están buscando alternativas que minimicen esta problemática. Un nuevo enfoque de interés para el control de plagas en la agricultura es el uso de nanopartículas (NPs) de base metálica, por las propiedades tóxicas que presentan sobre los insectos. Esta investigación se realizó con el objetivo de evaluar el efecto insecticida de NPs metálicas de oro y plata sobre ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli*, bajo condiciones de laboratorio en tomate tipo bola variedad Floradade. Se establecieron seis concentraciones, además del testigo (1000, 800, 500, 400, 300, 150 y 0 ppm) por cada nanopartícula. El método que se utilizó fue de inmersión de folíolos infestados con ninfas. La evaluación de la mortalidad se llevó a cabo a las 24, 48 y 72h. La aplicación de nanopartículas metálicas de plata y oro presentan efecto insecticida significativo sobre ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* con mortalidades de 99 y 100% a 800 ppm respectivamente, a 72 h de evaluación. El empleo de estas nanopartículas son una alternativa innovadora y prometedora que puede ser eficaz para el manejo de *B. cockerelli* y podrían llegar a ser una opción para su desarrollo y posterior integración en un sistema de manejo integrado de plagas.

Palabras clave: *B. cockerelli*, efecto insecticida, nanopartículas, oro, plata.

INTRODUCCIÓN

La paratrioza *Bactericera cockerelli* Sulc. es un hemíptero que pertenece a la familia Triozidae (Burckhardt y Lauterer, 1997). Coloquialmente el insecto se conoce como pulgón saltador, psílido de la papa, psílido del tomate, salerillo o paratrioza y es un insecto de importancia económica por los daños provocados en diversos cultivos (Munyanza, 2010). En México se encuentra distribuido en regiones productoras de cultivos de solanáceas como papa, tomate, chile y tomate de cáscara. Dentro de las principales zonas productoras se encuentran Villa de Arista, San Luis Potosí, Yurécuaro, Michoacán, la Comarca Lagunera, Durango y Coahuila, San Quintín, Baja California, así como en Morelos, Puebla, Guanajuato, Nayarit, Sinaloa y Estado de México (Crespo *et al.*, 2012).

El insecto ocasiona dos tipos de daños, el daño directo se caracteriza por presentar plantas cloróticas con poco crecimiento radicular, malformación en hojas, nudos más cortos, ocasionando la muerte de la planta (OIRSA, 2015). Daño indirecto atribuido a la capacidad del insecto para transmitir toxinas (aun no identificadas) y fitoplasmas *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CLso). A CLso se le atribuye como causante de la punta morada de la papa o Zebra chip, permanente del tomate y variegado del chile, provocando achaparramiento de la planta, tubérculos aéreos, hojas moradas en algunas variedades, en los tubérculos los tejidos internos presentan un moteado necrótico, así como plantas pequeñas, enrollamiento de hojas, aborto de flores y clorosis respectivamente (OIRSA, 2015).

El control de estas enfermedades está enfocado en el manejo del vector *B. cockerelli*, para esto se pueden utilizar barreras mecánicas, trampas amarillas, plaguicidas biorracionales, pero en sí, su manejo está asentado principalmente en la aplicación de insecticidas convencionales (Vereijssen, 2022).

Aunque el uso de insecticidas convencionales es la opción con mayor eficacia, no solo para esta plaga si no para otras, su uso puede conllevar en riesgos a la salud para el humano, además, algunos de ellos pueden seguir presentes en el suelo y agua por varios años (ONU, 2022). Entre los problemas a la salud humana que pueden ocasionar a largo plazo son la esterilidad, cáncer o problemas en la descendencia (Reyes, 2018).

Debido a esto y a los cambios en la normatividad de los plaguicidas, se han buscado alternativas a su uso, entre las alternativas están el uso de extractos vegetales, productos biorracionales, bioplaguicidas y plaguicidas sintéticos de bajo impacto ambiental (Rita *et al.*, 2021).

Un nuevo enfoque de interés para el control de plagas en la agricultura es el uso de nanopartículas que se obtienen por medio de la nanotecnología, la cual se basa en la manipulación de la materia a escala casi atómica con el fin de crear nuevas estructuras materiales y aparatos. Las nanopartículas por su parte son partículas con dimensiones entre 1 a 100 nanómetros, las cuales tienen propiedades únicas que afectan sus reacciones físicas, químicas y biológicas, las propiedades que presentan son cambios en conductividad eléctrica, actividad de superficie y reactividad (Stadler *et al.*, 2010).

Un claro ejemplo del efecto de las nanopartículas como plaguicidas en la agricultura es la alúmina nanoestructurada (NSA). Esta fue evaluada sobre adultos del gorgojo del arroz *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae) bajo condiciones de laboratorio en forma de polvo, los resultados que se obtuvieron en cuanto al efecto insecticida en comparación con los testigos que hay en el mercado fueron mayores, además se encontró que presentan actividad insecticida por contacto e ingestión, así como efectos en la progenie (López, 2018). Otro ejemplo es el uso de nanopartículas de óxido de zinc de morfología cristalina y semiesférica de 23.44 nm evaluadas sobre ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* en laboratorio, reportadas con actividad insecticida hacia esta plaga por la vía del contacto (Gutiérrez-Ramírez *et al.*, 2021).

Justificación

El uso irracional de agroquímicos genera daño al ambiente y a la salud de los productores, además de la pérdida de efectividad como estrategia de control y desarrollo de resistencia en los insectos plaga. En consecuencia, se buscan alternativas para el control de plagas, que sean amigables con el ambiente, de bajo impacto en la salud humana, económicas y efectivas en un manejo integral de plagas.

Objetivo

Evaluar el efecto insecticida de nanopartículas metálicas sobre *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) bajo condiciones de laboratorio.

Hipótesis

La aplicación de nanopartículas metálicas será efectiva sobre *Bactericera cockerelli* con una mortalidad de al menos un 80%.

REVISIÓN DE LITERATURA

Nanotecnología

La nanotecnología (NT) consiste en manipular la materia a una escala casi atómica para diseñar nuevas estructuras, materiales y aparatos (NIH, 2023). Se esperan grandes avances científicos sobre esta tecnología en diversos sectores como la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura sostenible, entre otros. La NT aún no tiene una definición específica, sin embargo, se basa en estructuras, aparatos y sistemas diseñados que tienen un tamaño de entre 1 y 100 nanómetros (Liu, 2006). Los materiales que tienen este tamaño se comportan de formas únicas que afectan las reacciones físicas, químicas y biológicas. La investigación, el desarrollo y la utilización de dichas propiedades es parte primordial de las nuevas tecnologías (NIOSH, 2017).

Nanopartículas en la agricultura

La nanotecnología es un avance tecnológico-científico que puede modificar sectores de la agricultura facilitando herramientas para la detección molecular de estrés biótico y abiótico, la detección de enfermedades fitopatógenas de una manera más oportuna, al igual de mejorar la capacidad de las plantas al absorber el agua, nutrientes y pesticidas (Lira *et al.*, 2018a). Además, las nanopartículas se emplean para mejorar la eficiencia de los plaguicidas al aplicar en el campo menores dosis (Lira *et al.*, 2018b). A su vez, otorgan ventajas cuando se encapsulan los ingredientes activos, obteniendo una vida útil más larga, menor lixiviación del suelo y menor volatilización, reduciendo así la toxicidad al igual que la contaminación (Lira *et al.*, 2018a). Por otra parte, por medio de la nano y biotecnología, se está investigando para hacer más eficiente el control de los cultivos, así mismo para el mejoramiento genético de las plantas; al producir nuevas variedades que sean tolerantes y/o resistentes a factores bióticos y abióticos (Lira *et al.*, 2018b).

Un avance que cabe resaltar de la nanotecnología en la agricultura es el encapsulamiento de activos como fertilizantes, herbicidas, fungicidas, insecticidas y nutrientes, los cuales pueden ser añadidos en matrices de liberación lenta o controlada en materiales naturales como es el

caso de la zeolita. Estos se denominan nanofertilizantes, nanoplaguicidas, nanosensores y nanoherbicidas (Lateef *et al.*, 2016).

Los materiales que se utilizan para la agricultura pueden ser naturales y/o sintetizados como las nanopartículas metálicas de Ag, Cu, Fe, Mg, Zn, así como las derivadas del carbón (nanotubos de carbón, grafeno) (Lira *et al.*, 2018b).

Nanofertilizantes

Los nanofertilizantes están recibiendo más interés en comparación con los fertilizantes convencionales, esto debido a que son más rentables y amigables con los ecosistemas (Lira *et al.*, 2018b). Diversos estudios indican que las nanopartículas (NPs) promueven la elongación, activan la biosíntesis, ayudan en la germinación y favorecen procesos metabólicos (Méndez *et al.*, 2016).

Un claro ejemplo es la investigación de Méndez *et al.* (2016), en el que usaron NPs de zinc puras y con plata para ver su efecto sobre plantas de chile, estas NPs en comparación al testigo presentaron un mayor incremento en cuanto a crecimiento apical, área foliar y biomasa seca total.

Nanoplaguicidas

Los nanoplaguicidas abarcan ingredientes activos de plaguicidas con un tamaño muy diminuto, así como nanoestructuras que poseen propiedades plaguicidas. Dichos nanoplaguicidas pueden mejorar factores como la dispersión, humectabilidad, estabilidad, solubilidad o biodegradabilidad de las formulaciones agrícolas (Castro, 2017).

Casos específicos de NPs metálicas proveen opciones más amigables con los ecosistemas para un manejo sustentable en cuanto al control de fitopatógenos (Lira *et al.*, 2018b). Entre estas NPs se encuentran las de plata, oro, selenio, sílice, etc. (Alghuthaymi *et al.*, 2015).

Por otro lado, las nanopartículas que poseen un efecto herbicida específico se pueden encapsular e incorporar dentro de nanotubos de carbón, para su posterior liberación en un sitio específico en las raíces de las malezas, en el cual las nanocápsulas llegan a tejidos vegetales inhibiendo aspectos fisiológicos que conllevan a la muerte de la planta (Lira *et al.*, 2021).

De igual manera se ha observado influencia por parte de las NPs sobre los insectos, un claro ejemplo es el uso de la alúmina nanoestructurada (NSA) utilizada para el control de *S. oryzae*, la NSA mostro una mayor efectividad en comparación a los testigos en cuanto a la mortalidad en los insectos al afectar la capa de cera de los insectos haciendo que estos murieran por deshidratación (Stadler *et al.*, 2010).

Interacción entre Nanopartículas y Plantas

Las NPs son promotoras o inhibidoras del crecimiento de las plantas, dicho crecimiento o inhibición está relacionado de acuerdo con distintas características de las NPs como la concentración, tamaño, propiedades, función fisiológica y bioquímica que realiza en la planta, y si actúa como micronutriente tal es el caso del cobre, zinc, entre otros; además, se debe tomar en cuenta las características tanto fisiológicas como morfológicas que posee la planta (Chen, 2018).

En el caso del zinc algunos estudios señalan que NPs de ZnO a concentraciones elevadas (1000 mg L^{-1}) causan fitotoxicidad en inhibición de la germinación, por otro lado, las dosis bajas ($< 50 \text{ mg L}^{-1}$) han demostrado efectos significativos en el crecimiento y desarrollo; reflejado en una mayor biomasa seca y área foliar (Kyung-Seok, 2014).

El modo de absorción y translocación de las NPs en las plantas se ve reflejado de forma diferente cuando se aplican al follaje y cuando son aplicadas al suelo (Fig. 1). Cuando las NPs se aplican al follaje se absorben por medio de los estomas de las hojas y su translocación o transporte hacia el tallo y raíces es por el floema (Jitao *et al.*, 2019).

Por otro lado, cuando las NPs son aplicadas al suelo o en el agua de riego son absorbidas por las raíces y son translocadas principalmente por el apoplasto del xilema hacia las partes aéreas de las plantas (Jitao *et al.*, 2019). Otra vía de absorción de las NPs cuando se aplican al suelo es vía simplasto de una célula a otra por medio de los plasmodesmos o acuaporinas. Además, cabe resaltar que solo las NPs menores a 20 nm pueden pasar por las paredes celulares (Jitao *et al.*, 2019).

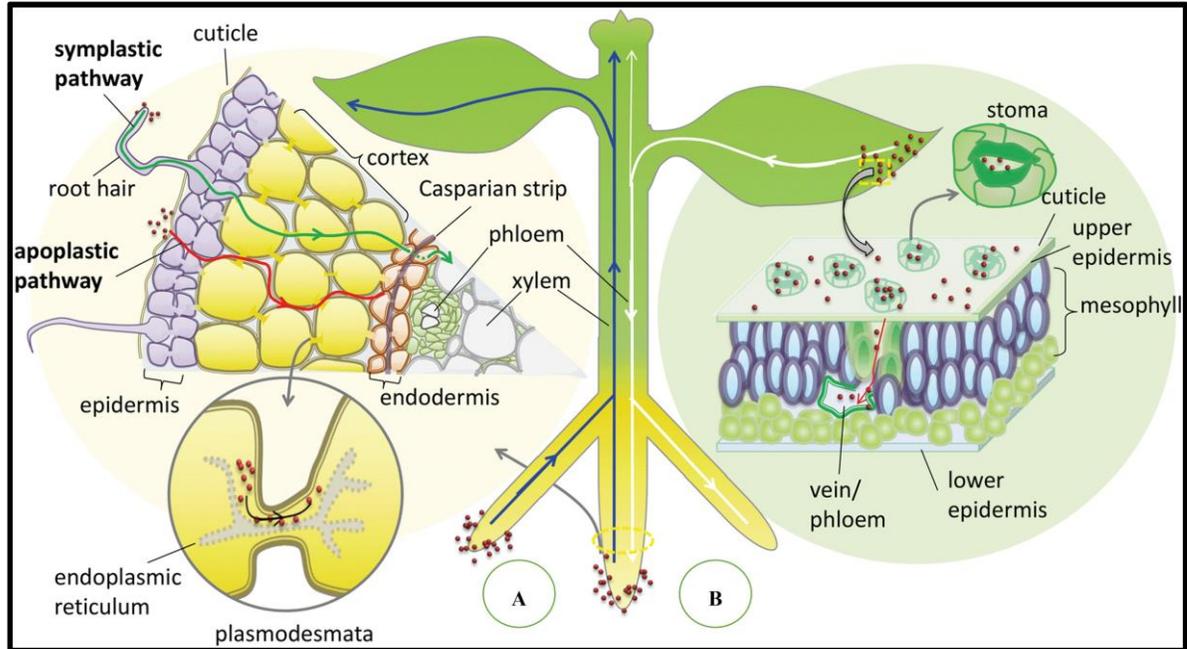


Figura 1. Esquema de las vías de absorción y translocación de NPs en las plantas. (A). Transporte por medio de la raíz. (B). Transporte por medio del follaje (Jitao *et al.*, 2019).

Adicionalmente, se debe tomar en cuenta el método de aplicación de las nanopartículas, debido que al aplicar de manera foliar se tienen pérdidas de hasta un 14.7% al usar nebulizador y de hasta un 32.5% cuando se realizan aplicaciones mediante un pulverizador convencional (Tarafdar *et al.*, 2012).

Efecto Insecticida de las Nanopartículas metálicas

El efecto insecticida de las NPs es diferente acorde a la base nanométrica utilizada. Para el caso de NPs inorgánicas el efecto insecticida se puede mostrar como una inducción de estrés oxidativo y necrosis celular. Por otra parte, en las NPs orgánicas el efecto insecticida es reflejado en un crecimiento retardado o en apoptosis. A su vez el efecto insecticida de los nanocompuestos se observa como una actividad enzimática alterada y daño a órganos internos (Saranya *et al.*, 2020).

El estrés oxidativo es causado por un desequilibrio en la producción de especies reactivas en un organismo y su capacidad antioxidante; el desequilibrio puede conducir a una formación excesiva de especies reactivas de oxígeno (Benelli, 2018).

La muerte celular es atribuida comúnmente a necrosis o apoptosis; la primera se caracteriza como accidental y patológica, la segunda es considerada como un mecanismo controlado, programado y fisiológico que está regulado por genes específicos y una activación de moléculas específicas. La apoptosis intrínseca se activa en respuesta a numerosos tipos de estrés celular, incluido el daño del ADN, el estrés oxidativo, la sobrecarga de calcio citosólico y el estrés del retículo endoplasmático en función de la acumulación de proteínas desplegadas (Benelli, 2018).

Un ejemplo en cuanto a la efectividad acorde a la base de las nanopartículas es el de Goswami *et al.* (2010) quienes evaluaron varias NPs sobre *S. oryzae*, estas fueron óxido de titanio, aluminio, silicio y zinc; sus resultados mostraron que las NPs de óxido de aluminio y silicio tuvieron mayor efectividad en comparación a las de óxido de titanio y zinc.

Otros estudios también muestran diferencias en cuanto a la base utilizada, esto significa que la eficacia insecticida es influenciada de manera significativa por los tamaños, formas y cargas de las NPs (Saranya *et al.*, 2020).

Modo de Acción de las Nanopartículas Metálicas sobre Insectos

Las publicaciones del posible modo de acción de las NPs contra insectos y ácaros es reducida, así como poco concreta, una hipótesis aprobada para distintos tipos de NPs es que causa un estrés oxidativo en los artrópodos, por otro lado, se plantea que actúen a nivel intracelular reduciendo la permeabilidad de la membrana afectando la función celular y así, provocando una muerte celular (Benelli, 2018) (Figura 2).

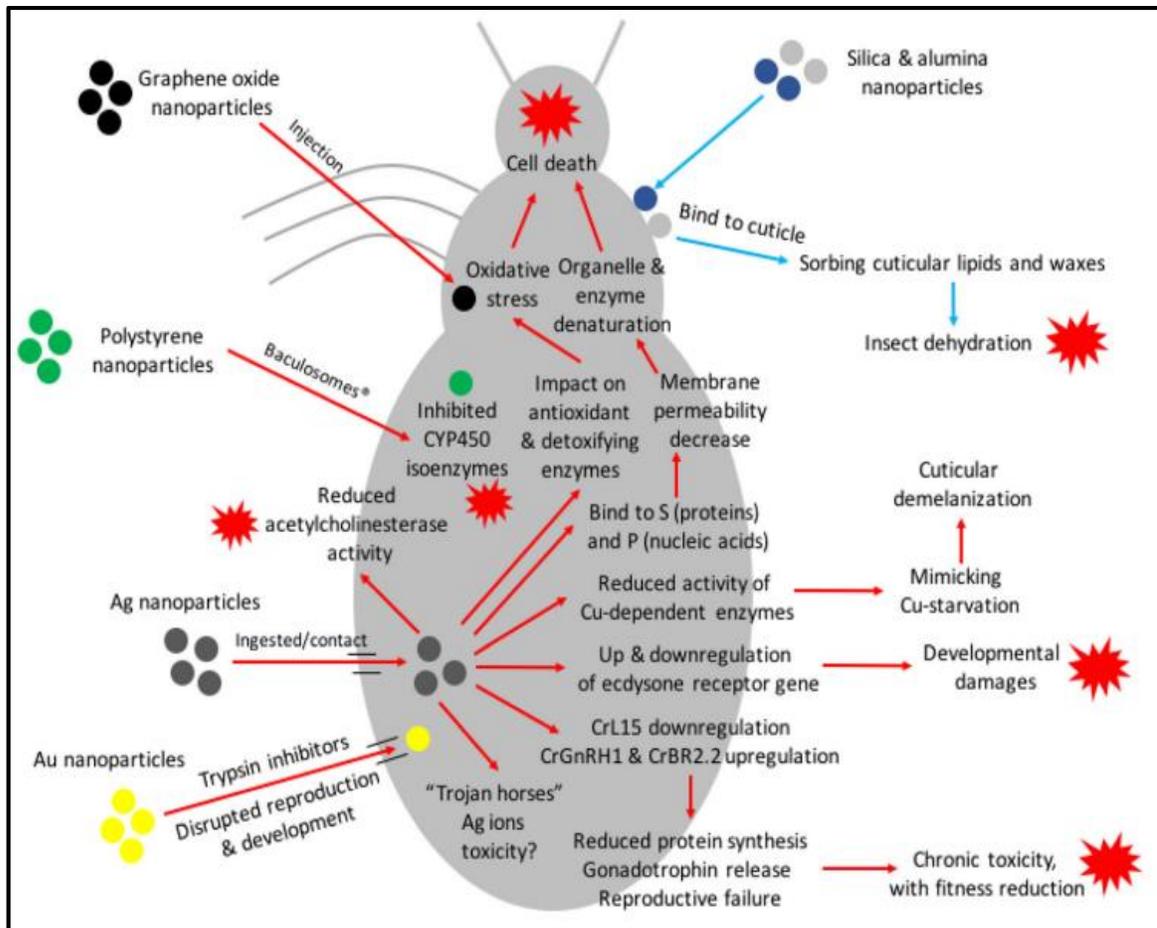


Figura 2. Diferente modo de acción de diversos tipos de NPs sobre insectos. Los puntos rojos señalan los daños mayores (Benelli, 2018).

Las únicas nanopartículas metálicas de las que se reconoce su modo de acción específico contra los insectos son las de sílice, alúmina, plata y óxido de grafeno (Benelli, 2018). Las NPs de óxido de plata influyen considerablemente en las enzimas antioxidantes y desintoxicantes de los insectos; esto desencadena en un estrés oxidativo y muerte celular del insecto (Nair y Choi, 2011). Por otro lado, las nanopartículas de oro intervienen como inhibidores de la tripsina (Patil *et al.*, 2016) e interrumpen el desarrollo y la reproducción del insecto (Small *et al.*, 2016). A su vez las NPs de sílice y alúmina se fijan a la cutícula del insecto para la posterior absorción de cera y lípidos lo cual provoca una deshidratación (Benelli, 2018). En el cuadro 1 se muestran algunos trabajos de investigación con su respectiva nanopartícula y modo de acción.

Cuadro 1. Modo de acción representativo de diferentes NPs sobre varios insectos de interés económico (Benelli, 2018).

Nanomaterial probado (dosis o concentración)	Insecto objetivo	Daños morfológicos y/o modo de acción
Varias nanopartículas de Ag, Au y ZnO por síntesis verde o microbiana	<i>Aedes aegypti</i> y <i>Anopheles stephensi</i> <i>Aedes albopictus</i> y <i>Culex pipiens</i> Pallens	Daños en el intestine medio, las células epiteliales y la corteza, con acumulación de nanopartículas en el intestine medio. Constricción en la región abdominal, cambios en la forma del tórax, daños en el intestine medio y pérdida de pelos laterales
Nanopartículas de Ag preparadas con extracto de <i>Cassia fistula</i> (CL₅₀ = 3.6 y 1.7 mg/L, respectivamente)	<i>Aedes albopictus</i> y <i>Culex pipiens</i> Pallens	Las larvas de cuarto estadio mostraron una disminución de los niveles de proteína total; las Ag-NPs también redujeron la actividad de la alfa y beta carboxilesterasa
Nanopartículas de Ag fabricadas usando ácido salicílico y ácido 3,5-dinitrosalicílico (1 a 12 ppm)	<i>Aedes albopictus</i>	Las larvas de cuarto estadio mostraron una disminución en el total de proteínas, esterasa, acetilcolina esterasa y enzimas fosfatasas.
Nanopartículas de Ag (0.2, 0.5 y 1 mg/L)	<i>Chironomus riparius</i>	Los genes GTS están regulados hacia arriba o hacia abajo según la concentración probada y a la duración de la exposición, la expresión más alta de ARNm fue en delta3 Clase GST Sigma4 Epsilon1
Nanopartículas de Ag (< 50 mg/L)	<i>Drosophila melanogaster</i>	Pérdida de pigmentos cuticulares de melanina, reducción de la capacidad de vuelo vertical, reducción de la actividad de las enzimas dependientes de cobre
Nanopartículas de oro (87.44 mg/g aplicado en la dieta)	<i>Blattella germanica</i>	Alteración en la reproducción y el desarrollo
Nanopartículas de Au fabricadas utilizando látex	<i>Aedes aegypti</i> , escarabajos y cochinillas	Inhibición de la tripsina

de <i>Jatropha curcas</i> (500–1000 µl)		
Grafito y nanotubos de paredes múltiples (3.3 and 3.1 mg, respectivamente)	<i>Drosophila melanogaster</i>	Fuerte adherencia de los nanomateriales a partes del cuerpo de la mosca, lo que conduce al deterioro de funciones motoras y mortalidad en insectos

Au=oro, Ag=plata, ZnO=óxido de zinc

El estrés oxidativo es causado por un desequilibrio en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) en un organismo y su capacidad antioxidante; el desequilibrio puede conducir a una formación excesiva de especies reactivas de oxígeno (Benelli, 2018).

Se han planteado tres formas de como las NPs inducen ROS en los organismos: 1) las propiedades que posee la superficie de la NP o sus mismas propiedades redox activas inherentes; 2) la continua estancia de las NPs en sistemas biológicos induciendo a una disponibilidad continua; 3) la interacción física de las NPs con compuestos celulares que actúan en procesos redox (Peterson y Nelson, 2010).

La muerte celular es atribuida comúnmente a necrosis o apoptosis; la primera se caracteriza como accidental y patológica, la segunda es considerada como un mecanismo controlado, programado y fisiológico que está regulado por genes específicos y una activación de moléculas específicas. La apoptosis intrínseca se activa en respuesta a numerosos tipos de estrés celular, incluido el daño del ADN, el estrés oxidativo, la sobrecarga de calcio citosólico y el estrés del retículo endoplasmático en función de la acumulación de proteínas desplegadas (Benelli *et al.*, 2018).

Un claro ejemplo de esto es la investigación de Mao *et al.* (2018), los cuales encontraron efectos adversos de nanopartículas de plata derivados de una acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en los tejidos de *Drosophila melanogaster* Meigen (Diptera: Drosophilidae) que conducían a apoptosis, daño de ADN y autofagia.

Nanopartículas de Oro en el control de Insectos

Los estudios sobre NPs de Au son pocos, sin embargo, los pocos estudios que hay muestran efectividad en el control de insectos. Un caso es el de las NPs de Au fabricadas a partir de látex, las cuales frenan el potencial catalítico de la tripsina (es una enzima clave para los insectos que se encarga de la digestión, la resistencia a insecticidas y a varias enfermedades) y otras proteasas (Patil *et al.* 2016).

Esto es llevado a cabo por la formación del complejo tripsina – AuNP; este complejo es el responsable de disminuir la actividad catalítica de la tripsina, al llevarse a cabo interacciones covalentes, electrostáticas y uniones al grupo SH del aminoácido (Patil *et al.* 2016).

Por otro lado, se evaluó la efectividad de las NPs de Au contra *Spodoptera litura* (F.) (Lepidoptera: Noctuidae) implementándolas en su dieta, para esto utilizaron larvas de segundo estadio las cuales sometieron al tratamiento durante 30 segundos, los resultados arrojaron una efectividad del 50% de mortandad en concentraciones superiores de 500 ppm, por otro lado, así como se elevaba la dosis aumentaba la mortalidad y la CL₅₀ incrementaba conforme al desarrollo de las larvas (Chakravarthy *et al.*, 2012).

Otra referencia es el estudio realizado sobre *Blattella germanica* (L.) (Blattodea: Blattellidae) con NPs de Au a través de alimentos, estas provocaron una reducción en la viabilidad de la ooteca de las hembras de *B. germanica* en aproximadamente un 25%, así mismo redujeron el número de ninfas nacidas en un 32.8% con respecto a los controles aplicados. También se observó una reducción en el desarrollo post-embrionario del 35.8% en la cantidad de ninfas que lograron mudar al segundo y tercer estadio, además, de una reducción de su tiempo de vida (Small *et al.*, 2016).

Así mismo se estudió la aplicación de NPs de Au a hembras adultas de *Trachyderma hispida* (Forskål) (Coleoptera: Tenebrionidae) por medio de la inyección de las nanopartículas, esto resultó en una alteración celular en el tejido ovárico de *T. hispida*, en comparación con los controles, se obtuvo una disminución significativa en las funciones enzimáticas antioxidantes de la glutatión peroxidasas en los escarabajos tratados (El-Ashram *et al.*, 2020). Además de observar un incremento en la apoptosis de las células ováricas en los escarabajos que fueron tratados. Dichas anomalías mencionadas pueden reprimir la fecundidad de *T. hispida* y

provocar un decrecimiento en las futuras poblaciones de los escarabajos (El-Ashram *et al.*, 2020).

Nanopartículas de Plata en el Control de Insectos

Las nanopartículas de plata han sido estudiadas en el control de lepidópteros, se han hecho estudios en *S. litura* y *Achaea janata* (L.) (Lepidoptera: Erebididae) en cuanto a su crecimiento y las respuestas de alimentación (Yasur y Rani, 2015). Las aplicaciones de las AgNPs se realizaron a través de la alimentación de los insectos por medio de hojas de ricino, como resultado de la aplicación de las AgNPs se redujo el peso corporal de las larvas y pupas, su aplicación afectó la actividad de las enzimas desintoxicantes en el intestino de las larvas (Yasur y Rani, 2015). También se vio reflejado que la exposición de las larvas a las nanopartículas de Ag provoca un estrés oxidativo, que es contrarrestado por enzimas antioxidantes (Yasur y Rani, 2015).

De igual manera, las nanopartículas de plata han sido utilizadas para el control de insectos vectores como mosquitos. En este caso para el control de estos se utilizó nanoplata en conjunto con deltametrina. Como resultado se encontró plata en la hemolinfa de los mosquitos que fueron sometidos a la combinación entre la nanoplata y el piretroide. Esto significa que la plata no inactivó la función principal del insecticida y, además, fue efectivo para matar a los mosquitos a bajas concentraciones (Sooresh *et al.*, 2011).

Por otro lado, también se ha realizado estudios en coleópteros, un ejemplo es el estudio realizado a *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) al aplicar nanopartículas de plata en conjunto con malatión; para esto las nanopartículas de plata se indujeron a *T. castaneum* por medio de la ingestión mediante granos de trigo. Los resultados que se observaron fueron que la mortalidad se correlacionó al aumento de las concentraciones, de igual manera la mortalidad aumentó conforme a la exposición. También se observó una disuasión de la oviposición y un efecto repelente mayor al 50% contra *T. castaneum* (Alisha y Thangapandiyam, 2019).

Recientemente se han evaluado las NPs de Ag sobre *S. litura*, *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae), *Aedes aegypti* (L.) y *Culex quinquefasciatus* Say (Diptera: Culicidae). Los resultados fueron muy aceptables obteniendo más del 80% de efectividad en la reducción de la actividad alimentaria para todos los casos, una actividad

larvicida arriba del 75% de mortalidad para todos los casos; además las larvas restantes presentaban reducción de tamaño, así como deformidades y estas no continuaron su desarrollo. También se observó una alteración enzimática de las proteasas y de la glutatión s-transferasa, lo cual provocó el daño de las células de los insectos tratados (Manimegalai *et al.*, 2021).

Bactericera cockerelli

Origen

El primer registro de la especie *B. cockerelli* sucedió en 1909, por medio de la investigación de Sulc, utilizando insectos colectados por el Dr. Cockerell, docente de la universidad de Colorado, en los Estados Unidos de América (OIRSA, 2015). El centro de origen de *B. cockerelli* son los Estados Unidos de Norte América (Vereijssen, 2022). Se reportó como plaga clave en el cultivo de papa, pero posteriormente fue afectando los cultivos de tomate y pimiento (Villegas, 2017).

Acorde a lo que escribió Villegas (2017) y Garzón (2005) en sus respectivos artículos de divulgación, *B. cockerelli* se reportó en México desde el año 1947 en los estados de Durango, Tamaulipas y Michoacán, después de un tiempo, se observó su presencia los estados en México y Guanajuato.

Taxonomía de *Bactericera cockerelli*

Reino: Metazoo

División: Arthropoda

Clase: Insecta

Orden: Hemiptera

Familia: Triozidae

Género: *Bactericera*

Especie: *Bactericera cockerelli* (Sulc) 1909

Figura 3. Taxonomía de *Bactericera cockerelli* (Vereijssen, 2022).

Generalidades

La paratrioza *B. cockerelli* es un insecto del orden Hemiptera, en México se le denomina como psílido de la papa o tomate, pulgón saltador, salerillo o paratrioza; este insecto tiene la capacidad de tener varias generaciones cada año (Vereijssen, 2022). Este psílido puede ser hospedante de hasta 20 familias de plantas, puede ovipositar y terminar su desarrollo en más de 40 especies diferentes (Butler y Trumble, 2012a).

Debido al amplio número de hospedantes y su distribución en todo el mundo, existe la posibilidad de que pueda quedarse en diferentes tipos de climas además de soportar heladas (Whipple *et al.*, 2012).

Distribución

La distribución de *B. cockerelli* es muy amplia, se encuentra en la parte del centro y occidental de América del Norte (Butler y Trumble 2012b), en varios estados de México, a su vez en Canadá se encuentra en los estados de Alberta, Columbia Británica, Ontario y Saskatchewan (Vereijssen, 2022), de igual manera está presente en Centroamérica (CABI, 2020) y parte de América del sur (Caicedo et al. 2020), así mismo *B. cockerelli* se encuentra en Nueva Zelanda y Australia (Wan *et al.*, 2020).

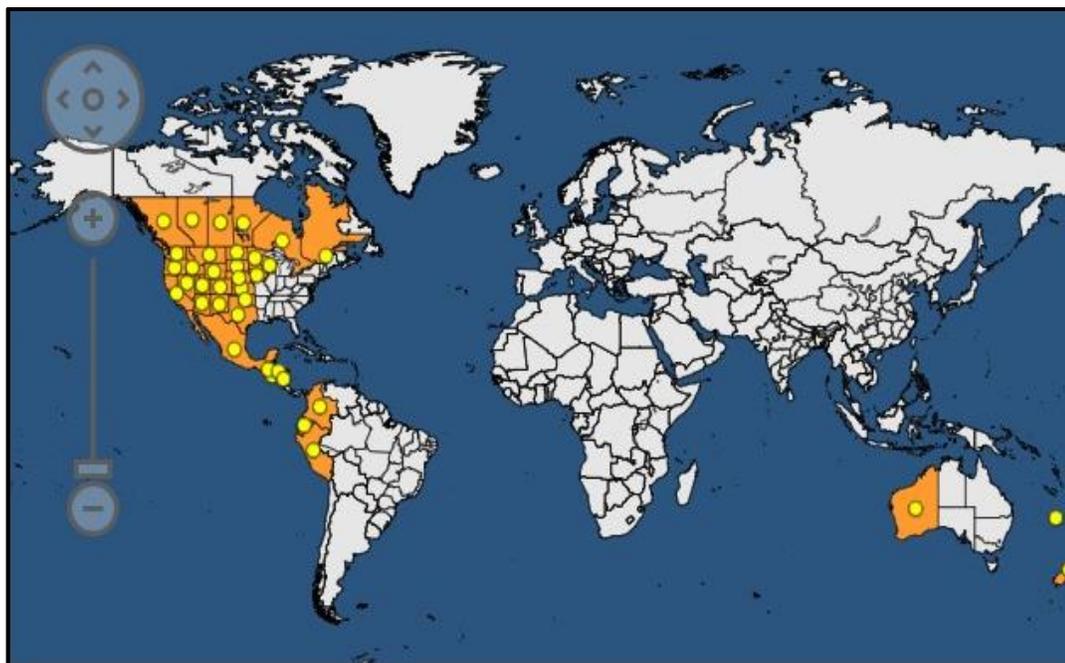


Figura 4. Distribución mundial de *B. cockerelli* (EPPO, 2022).

En México se ha encontrado en los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, Baja California, Estado de México, Guanajuato, Aguascalientes, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Puebla, San Luis Potosí, Sonora y Sinaloa, en cultivos de papa, tomate y chile (EPPO, 2022). Además, se tienen estudios que indican que las poblaciones de *B. cockerelli* en los estados de Guanajuato, Morelos y México son genéticamente diferentes a las que se encuentran en Sinaloa, Michoacán y Oaxaca (López *et al.*, 2013).

Ciclo de vida de *Bactericera cockerelli*

Huevos

Tienen una estructura ovalada, con una tonalidad amarillo claro al inicio y una posterior coloración anaranjado-amarillento (OIRSA, 2015), son colocados de uno en uno normalmente en el envés de la hoja y próximos al borde (Vereijssen, 2022), las hembras pueden colocar un gran número de huevecillos por hoja, entre 300 a 500 por ciclo (INTAGRI, 2016).

Estadios ninfales

B. cockerelli muestra cinco estadios ninfales con forma oval, dorsoventralmente constreñidos, con ojos bien determinados (OIRSA, 2015), no se presenta mucha diferencia entre cada estadio; la dimensión de las almohadillas de las alas en crecimiento ira aumentando en cada estadio (Vereijssen, 2022), normalmente las ninfas se encontraran en el envés de las hojas y serán poco móviles (Bravo *et al.*, 2006).

Primer estadio

Las ninfas tienen una tonalidad naranja. Las antenas poseen segmentos basales reducidos y gruesos que se van volviendo más finos hasta terminar en un pequeño segmento con dos setas sensoriales; ojos color naranja poco visibles (OIRSA, 2015). Los paquetes alares están muy reducidos, la segmentación de las patas aun sin diferenciación, así como las del tórax (Marín *et al.*, 1995).

Segundo estadio

De este estadio en adelante ya existe una diferenciación entre cabeza, tórax y abdomen (Marín *et al.*, 1995). La cabeza tiene tonalidad amarillenta; ojos de un color naranja opaco. El tórax refleja un color verde-amarillo; con paquetes alares bien definidos al igual que la

segmentación de las patas (OIRSA, 2015). Su abdomen presenta una pigmentación amarilla (Marín *et al.*, 1995).

Tercer estadio

La cabeza, tórax y abdomen están bien definidos. La cabeza presenta un tono amarillo; ojos de un color rojizo (OIRSA, 2015). No hay cambios en el color del tórax; los paquetes alares son más notorios (Marín *et al.*, 1995). De este estadio se empiezan a notar las glándulas de cera en el contorno del cuerpo (Rojas, 2010).

Cuarto estadio

En este estadio la cabeza y el tórax no presentan cambios, los segmentos de las patas están bien definidos; se puede observar los tarsos y uñas, paquetes alares bien definidos (OIRSA, 2015). El color del abdomen es amarillo; cuatro de los segmentos abdominales iniciales presentan un par de espiráculos y ya hay una constricción más definida entre abdomen y tórax (Marín, 2004).

Quinto estadio

La cabeza y el abdomen muestran un tono verde claro, mientras que el tórax presenta un tono más oscuro. La cabeza presenta antenas seccionadas en dos partes; gruesas en la parte basal y filiformes en la parte apical, sus ojos presentan un tono guinda (OIRSA, 2015). En el tórax; los paquetes alares sobresalen del resto del cuerpo (Marín *et al.*, 1995).

Adulto

Cuando el adulto emerge posee una tonalidad verde-amarillenta; es inactivo y sus alas son blancas; en un lapso de 3 a 4 horas adquieren un color transparente (OIRSA, 2015). En los primeros 2 o 3 días presenta un tono verde opaco o café claro, transcurrido ese lapso el cuerpo pasa de café claro a café oscuro o negro (Vereijssen, 2022). Presenta líneas marcadas de color blanco o amarillo tanto en la cabeza como en el tórax, al igual que en el primer segmento abdominal y terminal; dichas líneas son características distintivas de *B. cockerelli*, en especial la primera banda ancha en el primer segmento del abdomen, al igual que, la mancha en v invertida en la parte final del abdomen (Pletsch, 1947).

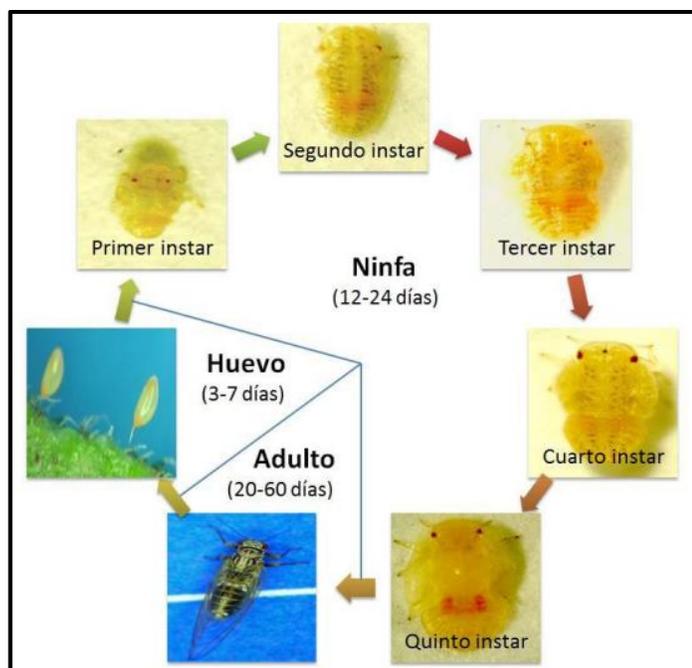


Figura 5. Ciclo de vida de *B. cockerelli* (Lasso *et al.*, 2021).

Importancia como plaga

La paratrioza *B. cockerelli* marco la importancia de los psílidos en el área agrícola en el 2004 al verificar que era vector de la transmisión de fitopatógenos a solanáceas y de ocasionar daños toxiníferos en plantas que hospeda puesto a que antes solo se veían como plagas secundarias (Munyanza *et al.*, 2007).

B. cockerelli es vector de zebra chip y punta morada de la papa, ambas enfermedades son causadas por la bacteria gram- negativa *Candidatus Liberibacter solanacearum* (INIAP 2018; FABUA, 2022). Desde su primer reporte Zebra chip se ha diseminado y actualmente se encuentra presente en distintas partes productoras de papa en el mundo (FABUA, 2022). Por otro lado, transmite la enfermedad denominada permanente del tomate, la cual acaba con la vida de la planta, afecta principalmente cultivos establecidos en el periodo primavera-verano (Garzón *et al.*, 2009).

Existen reportes por pérdidas económicas con un valor de 2 millones de dólares por año en Texas por Zebra chip (Secor, 2009). En Nueva Zelanda hay reportes de pérdidas de hasta 1 millón de dólares neozelandeses en el cultivo de tomate (Liefing *et al.* 2009). Para el caso

de México se reporta puede provocar pérdidas de hasta un 60% en cultivos establecidos de tomate (INTAGRI, 2023).

A causa de este conflicto varios países como México, Nueva Zelanda, Australia y Puntos de Europa, tienen localizada a *B. cockerelli* como plaga cuarentenaria al igual que a *Candidatus Liberibacter solanacearum*, por este motivo se emiten giros para el control de riesgo mobiliario de productos agrícolas relacionados (OIRSA, 2015).

Principales hospederos y daño

Hospederos

Bactericera cockerelli se centra específicamente en Solanáceas, además de afectar y terminar su ciclo de vida en una amplia gama cultivos; como la papa, tomate, pimiento, berenjena y tabaco, y malas hierbas tales como *Convolvulus arvensis* L. e *Ipomoea batatas* (L.) Lam. (Convolvulaceae) (EPPO, 2023). Cabe resaltar que las malezas ayudan al psílido a completar todo su ciclo de vida cuando no hay plantas cultivadas (Vereijjssen, 2020).

En total hay 20 familias distintas de plantas que pueden albergar a *B. cockerelli*, súmese que Wan *et al.* (2020) reportaron que, en Eurasia, África del sur y del norte, América del sur y Australasia existen tanto regiones climáticas adecuadas, así como huéspedes potenciales para *B. cockerelli*.

Daños

B. cockerelli no causa daños en bajas densidades, los daños se presentan en poblaciones altas, Liu y Trumble (2006) reportaron que a una densidad de 8 o más ninfas por planta se empieza a observar clorosis, hojas distorsionadas y altura reducida de la planta, además que estos insectos presentan preferencias en cuando a la variedad establecida.

Las ninfas provocan daños directos al alimentarse de la planta transmitiendo toxinas; debido a su alimentación hay avistamiento de savia en las hojas lo cual conlleva a la proliferación de hongos que pueden perjudicar la fotosíntesis (OIRSA, 2015). Los daños indirectos vienen por la transmisión de fitoplasmas; una vez que el insecto es portador del fitoplasma, tarda solamente 15 minutos en transmitir el virus a una planta (Garzón *et al.*, 2009).

1) Directos

Este daño es producido solamente por las ninfas al momento de su alimentación por transmisión de toxinas; las plantas afectadas se observan cloróticas y raquílicas, provocando una reducción del rendimiento y frutos de poca calidad comercial. Para el cultivo de tomate, papa y chile los daños causados pueden terminar con el ciclo del cultivo si la infestación se da antes de la floración (Garzón, 2002; OIRSA, 2015).

2) Indirectos

Estos están relacionados a *B. cockerelli* con las enfermedades tales como la punta morada de la papa (PMP), Zebra chip y permanente del tomate (OIRSA, 2015).

Los síntomas de la PMP se enfatizan por plantas pequeñas, abscesos del tallo en los lugares de penetración de las hojas, producción de tubérculos aéreos, y tonalidades moradas en las hojas (Rubio *et al.*, 2006). Los síntomas ocasionados por zebra chip se observan a través de todo el tubérculo, las lenticelas del tallo subterráneo son más pronunciadas, hay estolones colapsados, fracturas del anillo vascular con tonalidad café y necrosis de los tejidos internos (Munyanza *et al.*, 2007).

En cuanto al permanente del tomate, los síntomas que presenta son plantas pequeñas, clorosis de brotes apicales, enrollamiento de las primeras hojas; estas muestran un tono verde brillante, y una necrosis en la muerte de la planta (Delgado *et al.*, 2020). Además, las plantas se secan por fungosis en la raíz la cual es por falta de nutrición en la planta (Garzón *et al.*, 2009).

Estrategias de control de *Bactericera cockerelli*

Detección y monitoreo

Para esto se pueden emplear trampas amarillas y verde fosforescentes en contra de los adultos, en el caso de las ninfas, el muestreo se hace en el follaje dos veces a la semana en la parte baja de la planta (OIRSA, 2015), esto con el fin de estimar la población, puesto que el umbral económico es de 1 ninfa por planta (MAG, 2010).

Control químico

Existen varias moléculas en el mercado que pueden ser efectivas contra *B. cockerelli*, pero dicha efectividad dependerá de la cobertura de aplicación, técnica de aplicación,

concentración de la mezcla y pH del agua (CESAVEM, 2014). Se debe tomar en cuenta la adaptabilidad del psílido a los insecticidas, si no se hace una rotación, el insecto generara resistencia (DICTA, 2016).

A continuación, se muestran los ingredientes activos disponibles para el control de *B. cockerelli*.

Cuadro 2. Grupos de insecticidas para el control del psílido de la papa y el tomate (OIRSA, 2015).

	GRUPO Y MODO DE ACCIÓN	SUBGRUPO O I. a.
1A	Inhibidores de la Acetil colinesterasa	Carbamatos
1B		Organofosforados
2A	Bloqueadores del receptor de los canales de cloro GABA	Endosulfan
3A	Moduladores de los canales de sodio	Piretroides
4A	Agonistas de los receptores nicotínicos de la acetil colina	Neonicotinoides
4D		Flupyradifurone
5	Moduladores de los receptores alostérico nicotínico de la acetil colina	Spinosinas
6	Moduladores de los canales de cloro	Avermectinas
7C	Mímicos de la hormona juvenil	Pyriproxifen
9	Moduladores de los órganos cordotonales	Pymetrozine
23	Inhibidorres de la síntesis de lípidos	Derivado del ácido tetrónico
28	Moduladores de los receptores de ryanodina	Diamidas
29	Moduladores de los órganos cordotonales	Flonicamid
UN	Compuestos de modo de acción desconocido	Azadiractina

I.a.=Ingrediente activo

Cabe resaltar que cada país deberá hacer uso de los ingredientes activos que no incumplan con sus normas de seguridad (OIRSA, 2015).

Control cultural

Dentro de este método de control, se establecen fechas de siembra o trasplante para bajar las poblaciones, producción de plántula o semilla libre de la plaga, destrucción de residuos y se deben remover malezas y plantas voluntarias que puedan ser hospederas (CESAVEM, 2014).

Control biológico

Los entomopatógenos comerciales utilizados para el control de *B. cockerelli* son *Metarhizium anisopliae* (Metschn.) Sorokin (Clavicipitaceae), *Paecilomyces fumosoroseus* (Wize) A.H.S. Br. & G. Sm. (= *Isaria fumosorosea* Wise) y *Beauveria bassiana* (Bals.-Criv.) Vuill. (Cordycipitaceae) (CESAVEN, 2014). Por otro lado, los depredadores comerciales utilizados

son *Chrysoperla* sp. Steinmann (Neuroptera: Chrysopidae), *Geocoris* sp. Fallén (Hemiptera: Geocoridae) e *Hippodamia convergens* Guérin-Ménéville (Coleoptera: Curculionidae). Así mismo el principal parasitoide utilizado es *Tamarixia triozae* (Burks) (Hymenoptera: Eulophidae) (OIRSA, 2015).

Además, se han realizado estudios para identificar que insecticidas se pueden aplicar sinérgicamente con *T. triozae*, pero no se ha detectado compatibilidad al usar los dos métodos de control (Luna *et al.*, 2011).

MATERIALES Y METODOS

Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el Laboratorio de Entomología Molecular y Alternativas de Control de Plagas (LEMyACP) e invernadero del Departamento de Parasitología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México (25° 21' 13"N, 101 °01 '56" O, 1610 msnm).

Colonia de *Bactericera cockerelli*

La colonia de *B. cockerelli* se estableció en plantas de tomate tipo bola variedad Floradade de crecimiento determinado (Fax de Occidente S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México), en jaulas de 60x60x60 cm, libre de patógenos y parasitoides que afecten a los individuos, bajo condiciones de invernadero a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, humedad relativa de $60 \pm 10\%$ (HR), fotoperiodo de 14:10 h luz: oscuridad (L:O) y ventilación automatizada para reducir el calor y renovar el suministro de bióxido de carbono.

Material vegetativo para colonia y bioensayos

Se utilizaron plantas de tomate tipo bola Variedad Floradade de crecimiento determinado; esta variedad es seleccionada debido a su alta susceptibilidad a *B. cockerelli* (Mayo-Hernández *et al.*, 2018). Las semillas se sembraron en charolas de germinación de poliestireno expandido de 200 cavidades en sustrato Peat Moss-Perlita en relación 2:1. Posteriormente a los 30 días después de la siembra las plantas fueron trasplantadas en contenedores de polietileno de 2 L bajo condiciones controladas de invernadero ($25 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 10\%$ HR y fotoperiodo de 14:10 h L: O) (Figura 6).



Figura 6. Jaulas y material vegetativo utilizado para establecer la colonia de *B. cockerelli*.

Síntesis y caracterización de Nanopartículas de Oro y Plata

Las nanopartículas metálicas (oro y plata) fueron sintetizadas en el Departamento de Ciencias Básicas de la UAAAN. La obtención de las nanopartículas se llevó a cabo mediante síntesis verde utilizando cáscara de nuez (*Carya illinoensis*). Primeramente, el extracto se elaboró a partir de la pulverización de la cascara de nuez; posteriormente el polvo resultante fue tamizado para quitar las partículas de mayor tamaño. Una vez teniendo el polvo finamente tamizado se procedió a preparar el extracto, esto en un matraz bola con dos bocas, al cual se le integro un agitador magnético, un termómetro y una bomba de recirculación con su respectivo refrigerante, se le agrego 2g del polvo recuperado y 200 mL de agua destilada, después esta solución se elevó a una temperatura de 80°C con una recirculación consecutiva. Terminado el intervalo de reacción, la dilución se filtró mediante un papel filtro y un embudo, esto se captó en un vaso de precipitado de 300 mL, se dejó enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se guardó en una botella de plástico la cual se etiqueto para llevarla a refrigeración para su posterior utilización. Este extracto fue el que se utilizó en la síntesis de las NPs de plata y oro.

Para la fabricación de las nanopartículas de plata se utilizó un matraz bola con dos bocas al cual se le integro un agitador magnético, un termómetro y una bomba de recirculación con su respectivo refrigerante, en él se agregó 1.69g de nitrato de plata (AgNO_3), 985 mL de agua destilada, y 15 mL del extracto, esta solución se elevó a una temperatura de 80°C con una recirculación consecutiva. Terminado el intervalo de reacción se esperó a que la dilución se

enfriara a temperatura ambiente, una vez alcanzada la temperatura ambiente se vació en una botella de 1000 mL, la cual se cubrió con papel aluminio para evitar que las NPs se degradaran, se etiquetó y se llevó a refrigeración. Finalizado todo el proceso, la dilución obtenida ya era viable para su utilización, no requería algún otro proceso.



Figura 7. Proceso de la síntesis de las NPs de plata.

Para las nanopartículas de oro se utilizó el mismo proceso, solo cambio el reactivo, la cantidad de agua destilada y la cantidad de extracto, en este caso, se utilizó 1.5g de cloruro de oro hidratado (AuCl_4H), 300 mL de agua destilada y 100 mL de extracto. Después de la síntesis, la dilución ya etiquetada y refrigerada en su respectiva botella, se llevó a centrifugar, para recuperar los solutos de oro, una vez centrifugada la dilución se metió a la estufa de secado en tubos cónicos (falcón), cuando ya solo quedo el oro en los tubos y no había presencia de solución acuosa, se procedió a macerar el oro recuperado obteniendo un polvo fino. Dicho polvo se diluyó en agua destilada para que las NPs quedaran listas. En este caso se diluyó 1.5g del polvo en 500 mL de agua, para obtener NPs a 3000 ppm.



Figura 8. Proceso de la síntesis de las NPs de oro.

El tamaño y la morfología de las nanopartículas se caracterizaron mediante un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HR-TEM) Titan 80-300 Kv (FEI), dispersión de Luz (DLS) y análisis por dispersión de rayos X (EDX) en el Centro de Investigación en Química Aplicada en Saltillo, Coahuila.

Evaluación de nanopartículas metálicas sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de laboratorio

En invernadero se introdujeron plantas de tomate en una jaula de 60x60x60 cm y fueron infestadas con adultos de *B. cockerelli* durante 48 horas para que ovipositaran, posteriormente se retiraron los adultos y a la eclosión se dio seguimiento a las ninfas hasta el segundo estadio.

Para evaluar la mortalidad se utilizó el método de prueba 002 de susceptibilidad con base en *Psylla* spp. Geoffroy (Hemiptera: Triozidae) de Insecticide Resistance Action Committee (IRAC, 2022).

La técnica de bioensayo consistió en la inmersión de folíolos infestados con ninfas de segundo estadio durante 5 segundos. Los folíolos tratados se mantuvieron en charolas de

plástico con algodón saturado de agua bajo condiciones controladas de laboratorio ($25 \pm 2^\circ\text{C}$, 70% HR y fotoperiodo de 14:10 h L:O).



Figura 9. Evaluación de nanopartículas acorde al diseño experimental.

Diseño experimental

Se establecieron seis concentraciones, 1000, 800, 500, 400, 300 y 150 ppm por cada nanopartícula, además de un tratamiento testigo sin nanopartículas aplicando solo agua destilada (0 ppm). Para cada concentración se implementaron seis repeticiones con 3 unidades experimentales, considerada una unidad experimental 1 foliolo infestado, con un número de ninfas indefinido, bajo un diseño completamente al azar, cuya variable de respuesta fue la mortalidad de las ninfas, la unidad experimental fueron las ninfas y el factor de mortalidad fueron las concentraciones.

Análisis de resultados

La evaluación de la mortalidad se realizó a las 24, 48 y 72 h después de aplicar los tratamientos. La mortalidad de las ninfas se evaluó con un microscopio estereoscópico binocular. Se registró el número de ninfas sobrevivientes y muertas, expresando en porcentaje. Cada ninfa se consideró muerta, cuando no presentó respuesta al estímulo (este fue realizado con un pincel moviendo ligeramente a las ninfas), apéndices pegados al cuerpo y/o deshidratada.



Figura 10. Análisis de resultados en ninfas de *B. cockerelli*.

Los datos de mortalidad se analizaron a través de un análisis Probit para estimar el valor de la CL_{50} , CL_{95} y el margen de fiabilidad (límite fiducial) al 95% de significancia. La mortalidad en el control fue corregida mediante la fórmula de Abbott (1925) con una mortalidad aceptada en el testigo de 15%. Para determinar el efecto de los tratamientos sobre *B. cockerelli*, los datos se transformaron por raíz cuadrada de arcoseno y posteriormente fueron sometidos a análisis de varianza, bajo un diseño experimental completamente al azar y comparación de medias con una prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0.05$). Los análisis estadísticos fueron realizados en el paquete estadístico SAS/STAT (SAS Institute, 2002) e Infostat (InfoStat, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización de las NPs de plata arroja una morfología en forma semiesférica y un tamaño de 50.2 nm (Fig. 11A). El análisis EDX revela la composición elemental de la síntesis de nanopartículas, lo que sugiere que la plata es el constituyente principal de las partículas obtenidas (Fig. 11B). El pico de absorción es cercano a 3 keV, lo que se debe a la resonancia del plasmón superficial. Los picos de 22 keV y 25 keV corresponden a las energías de unión de AgL, Ag Ka1 y Ag Ka2, respectivamente, mientras que los picos situados a energías de unión de 8,0 y 9,01 keV pertenecen a CuKa y CuKb, respectivamente. Además, se observa una señal de alrededor de 0,7 keV correspondiente al carbono. Los picos de cobre y carbono corresponden a la rejilla de retención de TEM. Sin embargo, las señales de C y Si pueden estar relacionadas con los otros compuestos del extracto. Esto indica que se ha logrado la reducción de iones de plata a plata elemental.

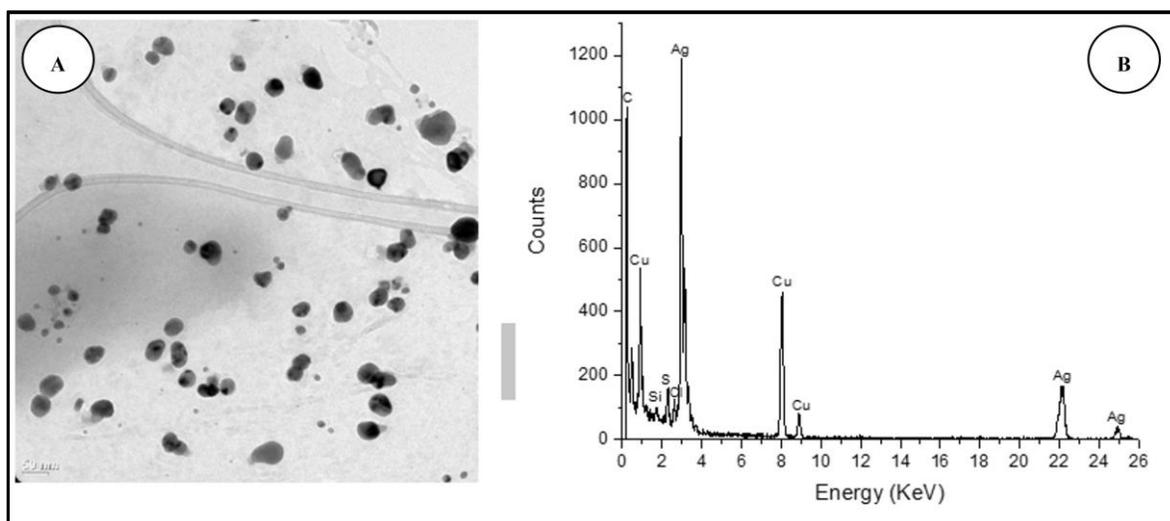


Figura 11. (A). Micrografía de TEM de las NPs de plata. (B) EDX de las NPs de plata.

En las NPs de oro se obtuvo una morfología esférica y un tamaño que oscila entre 18-24 nm, de acuerdo con la coloración final de la solución nanoparticulada obtenida (Figs. 12 y 13).

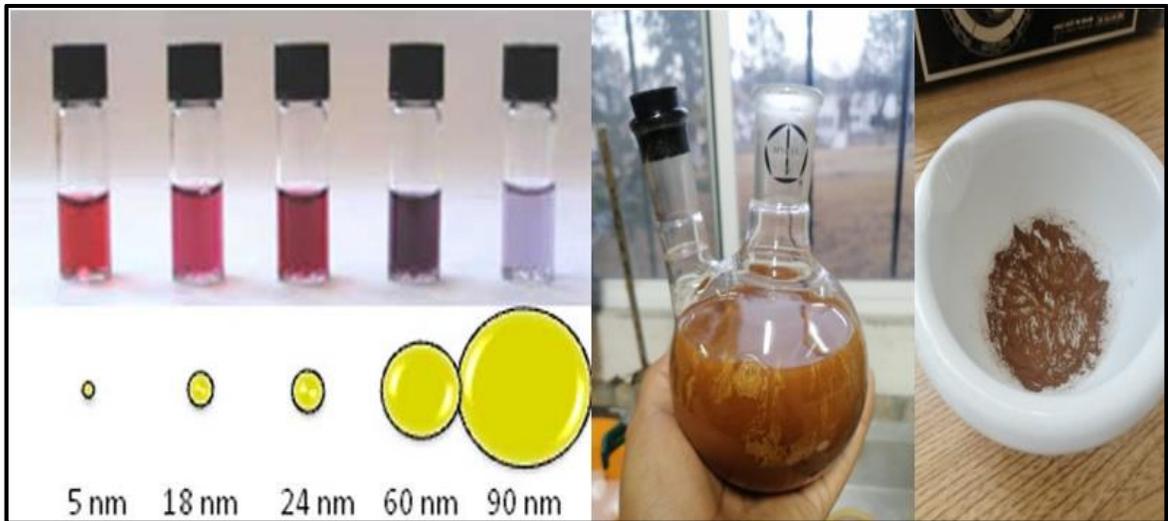


Figura 12. Correlación entre el color y tamaño de la nanopartícula de oro.

Longitud de onda (nm)	Color absorbido	Color complementario (observado)	Tamaño de nanopartícula (nm)
780 - 650	Rojo	Verde azulado	-
650 - 595	Naranja	Azul verdozo	-
595 - 560	Amarillo / Verde	Púrpura	● 85 - 100
560 - 500	Verde	Rojo / Púrpura	● 15 - 85
500 - 490	Verde azulado	Rojo	● 10 - 15
490 - 480	Azul verdozo	Naranja	-
480 - 435	Azul	Amarillo	-
435 - 380	Violeta	Amarillo / Verde	-

Figura 13. Disoluciones con nanopartículas de oro de distintos tamaños. Imagen obtenida de Ruvalcaba *et al.* (2020) Nanopartículas de oro a partir de extracto de damiana (*Turnera diffusa*).

Los resultados indican efecto insecticida significativo ($P < 0.05$) de las NPs de oro sobre ninfas de *B. cockerelli*. En las cinco concentraciones posterior a las 24h de la aplicación se obtuvieron porcentajes de mortalidad superiores a 36% a partir de la concentración de 150 ppm y hasta 58% en la concentración de 800 ppm. A las 48h el porcentaje de mortalidad incremento casi el doble para las cinco concentraciones; se observaron porcentajes superiores al 75% en la concentración inicial de 150 ppm hasta del 87% con 800 ppm. Al concluir el experimento después de 72h, se obtuvo un porcentaje de mortalidad superior al 99% en todas las concentraciones; para este caso, la relación entre la concentración y la mortalidad no fue un factor decisivo en el efecto insecticida, en función del aumento de las concentraciones puesto que la concentración de 150 ppm tuvo el mismo potencial de mortalidad arriba del 99% al igual que la de 800 ppm (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentaje de mortalidad y concentraciones letales (50 y 95) en ninfas de *B. cockerelli* por nanopartículas de oro en condiciones de laboratorio.

Concentración (ppm)	% Mortalidad (media \pm EE) ¹		
	24h	48h	72h
0	1.08 \pm 0.93a	3.96 \pm 1.73a	6.15 \pm 2.00a
150	36.82 \pm 2.91b	75.73 \pm 2.01b	99.14 \pm 0.54b
300	48.94 \pm 2.53c	82.51 \pm 2.87bc	99.81 \pm 0.13b
400	54.99 \pm 3.21 c	82.92 \pm 2.08bc	99.38 \pm 0.40b
500	47.36 \pm 4.05bc	82.64 \pm 2.02bc	98.96 \pm 0.50b
800	58.12 \pm 3.11c	87.33 \pm 1.93c	99.93 \pm 0.12b
g.l	5	5	5
F	47.32	187.46	1841.60
Pr>F	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***
R ²	0.53	0.55	0.1
CL ₅₀ (LF 95%)	453.33 (294.76-1032)	5.55 (NC)	1.02e-44 (NC)
CL ₉₅ (LF 95%)	161678.00 (12696- 6.12e+11)	10014.00 (NC)	1.21e-14 (NC)

Datos para su análisis, transformado por raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columna no son significativamente diferentes (Tukey; $P < 0.05$). *** Indican significancia contraste valor F a $P < 0.001$. Concentración letal, Límites de confianza. N.C.=No calculado por el software estadístico.

La CL₅₀ de NPs de oro para controlar ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* fue de 453.33 ppm a las 24h, 5.55 ppm a las 48h y de 1.02e-44 ppm a las 72h, obteniendo una CL₅₀ dentro

del rango de las concentraciones aplicadas. La CL₉₅ obtenida fue de 161678 ppm, 10014 ppm y 1.21e-14 ppm para las 24h, 48h y 72h respectivamente (Cuadro 3).

Los resultados de las NPs de plata sobre ninfas de *B. cockerelli* demuestran efecto insecticida significativo ($P < 0.05$). En las cinco concentraciones posterior a las 24h de la aplicación se obtuvieron porcentajes de mortalidad superiores al 28% a partir de la concentración de 150 ppm y hasta 59% con 800 ppm. A las 48h, el porcentaje de mortalidad incremento en las cinco concentraciones; se observaron porcentajes superiores al 65% desde la concentración de 150 ppm hasta 82% con la concentración de 800 ppm. Al terminar el experimento a las 72h se obtuvo un porcentaje de mortalidad por encima del 88% en todas las concentraciones, en este caso la relación mortalidad-concentración fue un factor que influyó en el efecto insecticida debido a que al aumentar la concentración se obtuvo un porcentaje de mortalidad mayor, reflejado en la dosis de 800 ppm que alcanzo una mortalidad del 100% mientras las dosis más bajas alcanzaron mortalidades menores (Cuadro 4).

Cuadro 4. Porcentaje de mortalidad y concentraciones letales (50 y 95) en ninfas de *B. cockerelli* por nanopartículas de plata en condiciones de laboratorio.

Concentración	% Mortalidad (media \pm EE) ¹		
	24h	48h	72h
0 ppm	1.08 \pm 0.93 a	3.96 \pm 1.73 a	6.15 \pm 2 a
150 ppm	28.15 \pm 2.5 b	65.64 \pm 2.8 b	97.04 \pm 1.38 c
300 ppm	46.01 \pm 4.66 cd	71.89 \pm 4.56 bc	94.85 \pm 1.92
400 ppm	40.55 \pm 4.92 bc	69.62 \pm 4.40 bc	88.79 \pm 2.88 b
500 ppm	54.69 \pm 2.91 d	80.46 \pm 2.83 c	94.12 \pm 2.27 bc
800 ppm	59.07 \pm 2.34 d	82.82 \pm 2.40c	100 \pm 0 c
g.l	5	5	5
F	40.35	79.82	345.50
Pr>F	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***
R ²	0.72	0.79	0.22
CL ₅₀ (LF 95%)	484.68 (388.15-666.48)	50.32 (1.40-113.72)	0.01 (NC)
CL ₉₅ (LF 95%)	12714.00(4523-144830)	7011.00(2108-1582904)	215.25 (NC)

Datos para su análisis, transformado por raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columna no son significativamente diferentes (Tukey; $P < 0.05$). *** Indican significancia contraste valor F a $P < 0.001$. Concentración letal, [§]Límites de confianza. N.C.=No calculado por el software estadístico.

La CL₅₀ de NPs de plata para controlar ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* fue de 484.67 ppm a las 24h, para las 48h fue de 50.31 ppm y de 0.011 ppm a las 72h; CL₅₀ dentro del rango de las concentraciones aplicadas. La CL₉₅ obtenida fue de 12714 ppm, 7011 ppm y 215.25 ppm para las 24h, 48h y 72h respectivamente (Cuadro 4).

El efecto insecticida de las NPs de oro y plata sobre ninfas de *B. cockerelli* evidencian una significativa toxicidad al contacto directo de estas nanopartículas sobre el insecto, lo que deja de manifiesto que las NPs bajo estudio tienen propiedades para ser utilizadas para proteger el cultivo de tomate de esta plaga. El uso de la nanotecnología se ha convertido en una herramienta prometedora para el control de plagas, principalmente las de óxidos metálicos y en menor grado las de síntesis verde; sin embargo, estas últimas, han demostrado un mayor efecto insecticida, demostrado en esta investigación.

El efecto insecticida de NPs metálicas de óxido de zinc y dióxido de titanio sobre *B. cockerelli* fueron evaluadas por Gutiérrez-Ramírez *et al.* (2021), en sus resultados obtuvieron con NPs de óxido de zinc a 72h de exposición 54.91% de mortalidad en una concentración de 100 ppm y 64.18 % en la concentración de 3000 y con NPs de dióxido de titanio, 93.91% de mortalidad en la concentración de 40 ppm, y 100% en la concentración de 500 ppm.

En comparación a los resultados de la presente investigación con las NPs de oro y plata en las cuales se observó una mortalidad del 99.14% y 97.04% en la concentración más baja (150 ppm) y un 99.93% y 100% en la concentración más alta (800 ppm) respectivamente. Las dos nanopartículas evaluadas mostraron una mayor eficiencia en el mismo tiempo de evaluación y una menor concentración letal en comparación principalmente con las NPs de óxido de zinc. En el caso de las NPs de dióxido de titanio, los porcentajes de mortalidad para las NPs de oro y plata fueron similares a las 72h, aunque con una mayor concentración letal.

Es importante señalar, que en la investigación de Gutiérrez-Ramírez *et al.* (2021) el método utilizado fue síntesis química la cual es un proceso más elaborado y dañino al medio ambiente a diferencia de la síntesis verde que se utilizó en la síntesis de las NPs de oro y plata de este estudio.

Las NPs de oro muestran una mortalidad significativa al entrar en contacto directo sobre ninfas de *B. cockerelli*. Las ninfas tratadas con NPs se caracterizaron por presentar deshidratación y alteración en el cuerpo al incrementar de tamaño, con una posterior desintegración (Figura 11). Efectos similares fueron vistos por El-Ashram *et al.* (2020) al evaluar nanopartículas de oro de 20 nm inyectadas al escarabajo *T. hispida*, ellos observaron una reducción en las funciones enzimáticas antioxidantes y aumento de apoptosis en los tejidos. El tamaño de la nanopartícula que El-Ashram *et al.* (2020) utilizaron es menor a la utilizada en esta de investigación, sin embargo, en un modelo a gran escala realizado en campo, se facilita más que el modo de aplicación sea por contacto que inyectado, además de que con este estudio se demostró que a las NPs de oro a un tamaño entre 18 a 24 nm son efectivas sobre insectos.

La efectividad de las NPs de oro fueron evaluadas sobre larvas de segundo estadio de *S. litura* (F.) por la vía de ingestión, encontrando una efectividad del 50% de mortalidad en concentraciones superiores a 500 ppm (Chakravarthy *et al.*, 2012), también por la misma vía, a través de los alimentos, Small *et al.* (2016) encontraron efectos como reducción de viabilidad de ootecas y efectos sobre la muda y tiempo de vida de ninfas de *B. germanica*.

La aplicación de NPs de oro a hembras adultas de *T. hispida* ocasionaron una alteración celular en el tejido ovárico de este insecto, reprimiendo su fecundidad, además de disminución significativa en las funciones enzimáticas antioxidantes de la glutatión peroxidasas (El-Ashram *et al.*, 2020).

Yasur y Rani (2015) estudiaron el efecto de las nanopartículas de plata en *S. litura* y *A. janata* en el control, crecimiento y respuestas de alimentación. Las aplicaciones redujeron el peso corporal de las larvas y pupas, afecto la actividad de las enzimas desintoxicantes en el intestino de las larvas provocaron estrés oxidativo.

Nanopartículas de plata de síntesis verde a partir de frutos de *Cassia fistula* L. (Caesalpinioideae) se evaluaron sobre pupas y larvas de primer estadio de *Culex pipiens* Pallens y *Aedes albopictus* (Skuse) (Diptera: Culicidae) demostrando ser eficientes con una

CL₅₀ de entre 8.3 mg/L (larvas) y 17.3 mg/L (pupas) para *C. pipiens* y una CL₅₀ de 1.1 mg/L (larvas) y 19.0 mg/L (pupas) para *A. albopictus* (Fouad *et al.*, 2017).

Manimegalai *et al.* (2021) evaluaron NPs de plata de 6.2 nm con un método de ingestión, sintetizadas a partir de *Vernonia anthelmítica* (L.) (Asteraceae) sobre plagas agrícolas como *S. litura* y *H. armigera* quienes encontraron que dichas NPs causaban reducción alimentaria y actividad larvicida superior al 75%, además de una alteración enzimática en las proteasas.

En la presente investigación las NPs de plata de 50.2 nm y modo de aplicación por contacto ocasionaron deshidratación de las ninfas al igual que alteración en el cuerpo al incrementar de tamaño con una posterior desintegración obteniendo un 82%.

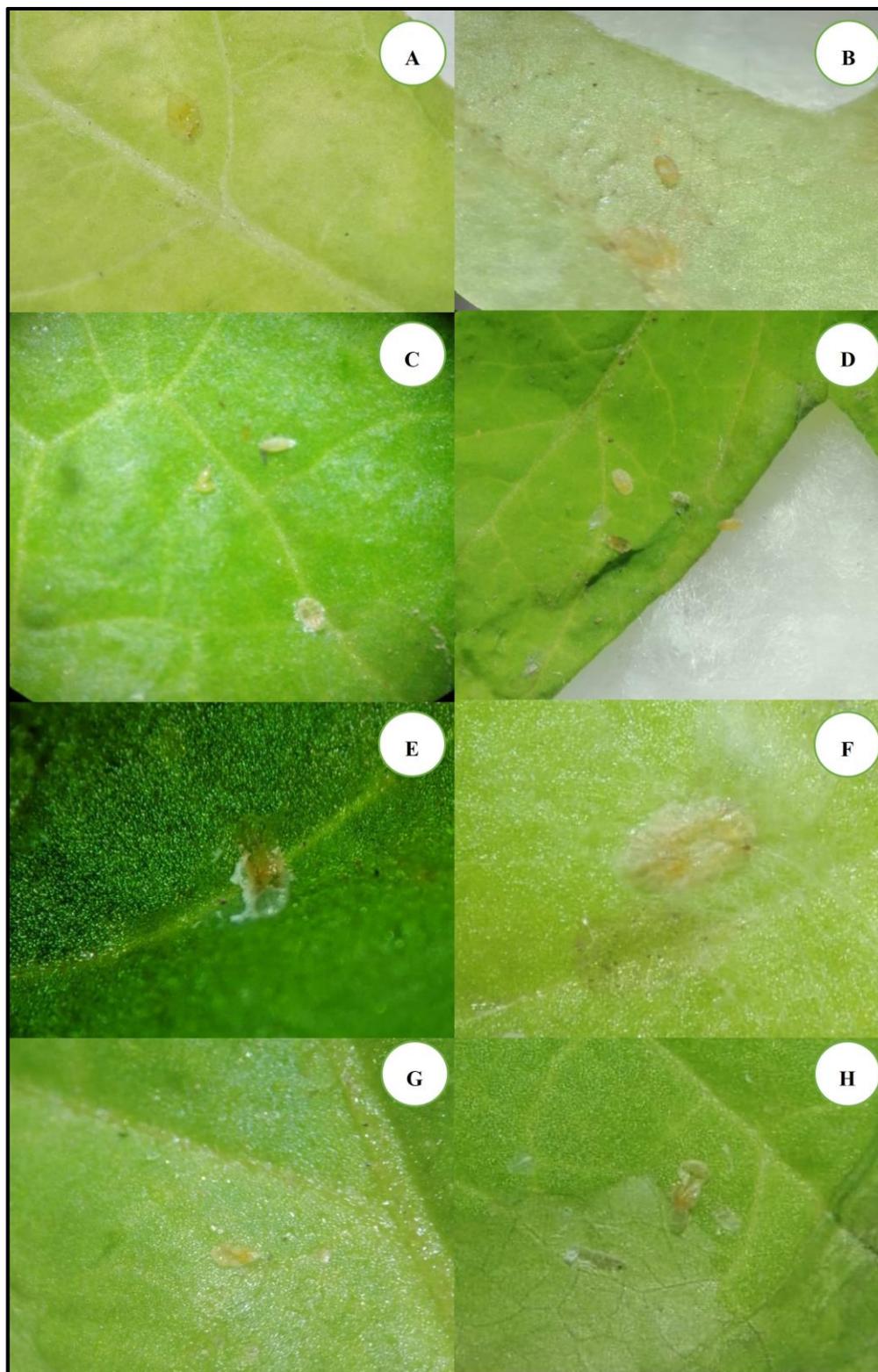


Figura 14. Mortalidad de ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli*. (A-D): Daños por necrosis, deshidratación y apoptosis causados por NPs de plata. (E-H): Daños por deshidratación, apoptosis y constricción.

Conforme la nanotecnología ha avanzado en el área de la agricultura cada vez es mayor el interés en su uso como insecticida, esto derivado de las propiedades tóxicas que adquieren ciertos materiales al llevarse a una escala manométrica (Shahzad y Manzoor, 2019), dichas propiedades se ven influenciadas por el tamaño de la NP, debido a que a menor tamaño hay una mayor disponibilidad aumentando el contacto con las células (Ivask *et al.*, 2014). Esto crea la interrogante de que NP será la que tendrá mayor efectividad y el rango de tamaño en que debe estar, al respecto El-Ashram *et al.* (2020) evaluaron nanopartículas de oro de 20 nm obteniendo resultados sobre *T. hispida* con mortalidad superior al 90%, pero con variación acorde al aumento de la dosis. En este estudio se evaluaron NPs de oro con un tamaño entre 18 a 24 nm obteniendo mortalidad superior al 99% donde la concentración no influyó de manera significativa en la mortalidad, esto significa que el tamaño sí influye en la toxicidad de las nanopartículas, pero también se debe considerar el estado biológico que afecte al cultivo seleccionado y que se desee controlar.

El tamaño al ser un factor que cambia las propiedades de las NPs influirá en la ruta que tomara la NP para causar el efecto insecticida, esto se ve reflejado en el uso de las NPs de plata, las cuales han mostrado diferente efecto insecticida, como disminución de proteínas, acetil colinesterasa (Manimegalai *et al.*, 2021), enzimas antioxidantes (Yasur y Rani, 2015), pérdida de pigmentos (Avalos *et al.*, 2015) y alteración en la reproducción y desarrollo (Alisha y T Thangapandiyam, 2019). El estudio realizado es un claro ejemplo, al aplicar NPs de plata a un tamaño de 50.2 nm ocasionaron deshidratación, así como apoptosis marcada en una necrosis en algunas de las patas de las ninfas que se utilizaron.

La actividad insecticida de las NPs como agentes de control podrían llegar a ser una opción para su desarrollo e integración en un sistema de manejo sostenible de plagas; sin embargo, cabe resaltar que es necesario realizar estudios en invernadero y campo para ver cómo se comportan en ese ambiente. Además, en ese aspecto se debe tomar en cuenta la asimilación de las NPs por la planta para aplicarlas a una concentración que no cause fitotoxicidad.

CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas metálicas de plata y oro presentan actividad insecticida efectiva para controlar ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* bajo condiciones controladas de laboratorio.

El empleo de NPs de plata y oro como insecticida para el control de insectos en cultivos de interés agrícola es una alternativa innovadora y prometedora que puede ser eficaz para el manejo de *B. cockerelli* y podrían llegar a ser una opción para su desarrollo y posterior integración a un sistema de manejo integrado de plagas.

LITERATURA CITADA

- Alghuthaymi, M. A., Almoammar, H., Rai, M., Said-Galiev, É. E., & Abd-Elsalam, K. A. (2015). Myconanoparticles: Synthesis and their role in phytopathogens Management. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 29(2), 221-236. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1008194>
- Alisha, A. A., & 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). <https://doi.org/10.1186/s41936-019-0124-0>
- Ávalos, A., Haza, A. I., Drosopoulou, E., Mavragani-Tsipidou, P., & Morales, P. (2015). *In vivo* genotoxicity assesment of silver nanoparticles of different sizes by the Somatic Mutation and Recombination Test (SMART) on *Drosophila*. *Food and Chemical Toxicology*, 85, 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.06.024>
- 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>
- Bravo, G., Galindo, G. G., & Amador, D. (2006). Tecnología de producción de chile seco. (INIFAP) instituto nacional de investigaciones forestales agrícolas y pecuarias-centro de investigación regional norte centro, campo experimental Zacatecas, 5, 110.
- Burckhardt, D., & Lauterer, P. (1997). A taxonomic reassessment of the trioizid genus *Bactericera* (Hemiptera: Psylloidea). *Journal of Natural History*, 31(1), 99-153. <https://doi.org/10.1080/00222939700770081>
- Butler, C. D., & Trumble, J. T. (2012a). The potato psyllid, *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Trioizidae): life history, relationship to plant diseases, and management strategies. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 5(2), 87-111. <https://doi.org/10.1163/187498312x634266>
- Butler, C. D., & Trumble, J. T. (2012b). Identification and impact of natural enemies of *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Trioizidae) in Southern California. *Journal of Economic Entomology*, 105(5), 1509-1519. <https://doi.org/10.1603/ec12051>
- Caicedo, J., Simbaña, L., Calderón, D. A., Lalangui, K. P., & Rivera-Vargas, L. I. (2020). First report of ‘*Candidatus Liberibacter solanacearum*’ in Ecuador and in South America. *Australasian Plant Disease Notes*, 15(1). <https://doi.org/10.1007/s13314-020-0375-0>
- Castro-Restrepo, D. (2017). Nanotecnología en la agricultura. *Bionatura* (Ibarra - Impresa), 2(3), 384-389. <https://doi.org/10.21931/rb/2017.03.03.9>
- CESAVEM. (2014). Manejo integrado de la paratrioza (*Bactericera cockerelli* Sulc.). <https://cesavem.mx/img/fitosanitariodeljitomate/jitomate2.pdf>
- Chakravarthy, A. K., Bhattacharyya, A., Shashank, P. R., Eepidi, T. T., Doddabasappa, B., & M, S. K. (2012). DNA-tagged Nano gold: a new tool for the control of the armyworm, *Spodoptera litura* fab. (Lepidoptera: Noctuidae). *African Journal of Biotechnology*, 11(38). <https://doi.org/10.5897/ajb11.883>

- Chen, H. (2018). Metal based nanoparticles in agricultural system: behavior, transport, and interaction with plants. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 30(1), 123-134. <https://doi.org/10.1080/09542299.2018.1520050>
- Crespo-Herrera, L. A. (2012). Distribución espacial de *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae) en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* (Brot.)). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000300008
- Delgado, J. C., Beltrán, M., Cerna, E., Uribe, L. A., Landeros, J., Pagaza, Y., & Ochoa, Y. M. (2020). *Candidatus Liberibacter solanacearum* patógeno vascular de solanáceas: Diagnóstico y control. Scielo. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-888X2019000100206&script=sci_arttext
- DICTA. (2016). Manejo de la paratrioza (*Bactericera cockerelli*) en el cultivo de la papa. Repositorio IICA. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/14307/BVE21021271e.pdf>
- El-Ashram, S., Kheirallah, D. A., El-Samad, L. M., & 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), e0241837. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241837>
- EPPO. (2022). *Bactericera Cockerelli* (PARZCO)[Overview]| EPPO Global Database. <https://gd.eppo.int/taxon/PARZCO>
- FABUA. (2022). Papa Manchada o «Zebra chip disease» (CA *Liberibacter solanacearum*) | Herbario Virtual Fitopatología. Herbario Virtual Fitopatología. https://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/?page_id=14667.
- Fouad H, Yang G, El-Sayed AA, Mao G, Khalafallah D, Saad M, Ga'al H, Ibrahim E, Mo J. 2021. Green synthesis of AgNP-ligand complexes and their toxicological effects on *Nilaparvata lugens*. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1):318. <https://doi: 10.1186/s12951-021-01068-z>.
- Garzón, J. A. (2009). Asociación de Hemiptera: Triozidae con la enfermedad «permanente del tomate» en México. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100006
- Garzón, J., Velarde, C., Marín, J., & Cárdenas, O. (2005). Ensayos de transmisión del fitoplasma asociado al «Permanente del tomate» por el psílido *Bactericera cockerelli* Sulc., en México. (4.ª ed., Vols. 672-675). *Entomología Mex.*
- Gutiérrez-Ramírez, J. A., Betancourt-Galindo, R., Aguirre-Uribe, L. A., Cerna-Chávez, E., Sandoval-Rangel, A., Del Ángel, E. C., Chacón-Hernández, J. C., García-López, J. I., & Hernández-Juárez, 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. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081460>
- Infostat - Statistical software. (2017). <https://www.infostat.com.ar/>
- INIAP. (2018). Guía de manejo de la punta morada de la papa. Repositorio INIAP. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5653/1/Gu%C3%ADa%20de%20Manejo%20de%20la%20Punta%20Morada%20de%20la%20Papa%201ra%20edici%C3%B3n.pdf>
- Insecticide Resistance Action Committee. (2020). *Psylla* Spp.- IRAC Test Method. IRAC. <https://irac-online.org/methods/psylla-spp-all-stages/>

- INTAGRI. (2016). Manejo Integrado de Paratrypanosoma | *Intagri S.C.*
<https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/manejo-integrado-de-paratrypanosoma>
- INTAGRI. (2023). La enfermedad del “Permanente del tomate” / *Intagri S.C.*
<https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/la-enfermedad-del-permanente-del-tomate>
- Ivask, A., Kurvet, I., Kasemets, K., Blinova, I., Aruoja, V., Suppi, S., Vija, H., Käkinen, A., Titma, T., Heinlaan, M., Visnapuu, M., Koller, D., Kisand, V., & Kahru, A. (2014). Size-Dependent toxicity of silver nanoparticles to bacteria, yeast, algae, crustaceans and mammalian cells in vitro. *PLOS ONE*, *9*(7), e102108.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102108>
- Jitao, L. V., Christie, P., & Zhang, S. (2019). Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. *Environmental science. Nano*, *6*(1), 41-59. <https://doi.org/10.1039/c8en00645h>
- Kyung-Seok, K., & Kong, I. C. (2013). Toxic effects of nanoparticles on bioluminescence activity, seed germination, and gene mutation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *98*(7), 3295-3303. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5404-x>
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M. N., & Saleem, M. (2016). Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: an environment friendly slow release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*, *232*, 174-183.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.06.020>
- Liefting, L. W., Sutherland, P., Ward, L. I., Paice, K. L., Weir, B. S., & Clover, G. R. G. (2009). A new ‘*Candidatus liberibacter*’ species associated with diseases of solanaceous crops. *Plant Disease*, *93*(3), 208-214. <https://doi.org/10.1094/pdis-93-3-0208>
- Lira, R., Vera, B., & De los santos, G. (2018a). Agronanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna. *Bdigital*. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/12076/cp-29-lira-saldvar-revisin.pdf
- Liu, W. T. (2006). Nanoparticles and their biological and environmental applications. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *102*(1), 1-7. <https://doi.org/10.1263/jbb.102.1>
- Lira, R.H., Méndez, B., de Los Santos, G., & Vera, I. (2018b). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *SCIELO*. Recuperado 3 de abril de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662018000200009#:text=En%20este%20contexto%2C%20la%20nanotecnolog%C3%ADa,de%20enfermedades%20fitopat%C3%B3genas%20y%20el
- Lira, R. H., Vera, I., & De los santos, G. (2021). Agronanotecnología para sistemas modernos de producción alimentaria. *CIQA*. <https://ciqa.mx/Agronanotecnologia.aspx>
- Liu, D., & Trumble, J. T. (2006). Ovipositional preferences, damage thresholds, and detection of the tomato-potato psyllid *Bactericera cockerelli* (Homoptera: Psyllidae) on selected tomato accessions. *Bulletin of Entomological Research*, *96*(2), 197-204.
<https://doi.org/10.1079/ber2005416>
- López, B., Favela, S., Ponce, G., Foroughbackhch, R., & Flores, A. E. (2013). Variación genética en *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Triozidae) de México (2.^a ed., Vols. 1004-1006). *Revista de Entomología Económica*.

- López G., G. P., Stadler, T., & Ferrero, A. A. (2018). Actividad insecticida, eficacia y propiedades antixenóticas de la alúmina nanoestructurada (NSA) en *Sitophilus Orizae* (Coleoptera-Curculionidae), plaga primaria de granos almacenados. CONICET. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/93617>
- Luna, A., Lomeli, J. R., Rodriguez, E., & Huerta, A. (2011). Toxicidad de cuatro insecticidas sobre *Tamarixia triozae* (Burks) (Hymenoptera: Eulophidae) y su hospedero *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae). Scielo. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372011000300001
- MAG. (2010). SFE desarrolla Plan de Acción ante la cercanía de la Paratrioza (*Bactericera cockerelli* Sulc.). <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AF-0045.pdf>
- Manimegalai, T., Raguvaran, K., Kalpana, M., & Maheswaran, R. (2021). Facile synthesis of silver nanoparticles using *Vernonia anthelmintica* (L.) willd. and their toxicity against *Spodoptera litura* (Fab.), *Helicoverpa armigera* (Hüb.), *Aedes aegypti* Linn. and *Culex quinquefasciatus* Say. Journal of Cluster Science, 33(5), 2287-2303. <https://doi.org/10.1007/s10876-021-02151-z>
- Mao, B., Chen, Z., Wang, Y., & Yan, S. (2018). Silver nanoparticles have lethal and sublethal adverse effects on development and longevity by inducing ROS-mediated stress responses. Nature. Recuperado 12 de marzo de 2022, de https://www.nature.com/articles/s41598-018-20728-z?error=cookies_not_supported&code=751cc441-e834-48ef-b194-9eece1e1dd11
- Marín, A. J., Garzón, J. A., Becerra, A., Mejía Avila, C., Bujanos, R., & Byerly, K. F. (1995). Ciclo biológico y morfología del salerillo *Paratrioza cockerelli* (Sulc.) (Homoptera: Psyllidae) vector de la enfermedad «permanente del jitomate» en el bajo. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7237>
- Martín, J. (2004). Biología, ecología e identificación de insectos vectores en cultivo de papa. Memoria de la XXI Semana Internacional del Parasitólogo, Simposium Punta Morada de la Papa, Saltillo, Coahuila, México, 84-96.
- Méndez A., B., Lira S., R., y Vera R., I. (2016). Respuestas Fisiológicas de Plantas Cultivadas en Bioespacios por Efecto de Nanofertilizantes y Zeolita. CIQA. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/333/1/Respuestas%20Fisio%20l%20gicas%20de%20Plantas%20Cultivadas%20en%20Bioespacios%20por%20Efecto%20de%20Nanofertilizantes%20y%20Zeolita.pdf>
- Munyanza, J. E. (2010). Psyllids as vectors of emerging bacterial diseases of annual crops. Southwestern Entomologist, 35(3), 471-477. <https://doi.org/10.3958/059.035.0335>
- Munyanza, J. E., Crosslin, J. M., & Upton, J. E. (2007). Association of *Bactericera cockerelli* (Homoptera: Psyllidae) with «zebra chip», a new potato disease in southwestern United States and Mexico. PubMed. [https://doi.org/10.1603/0022-0493\(2007\)100](https://doi.org/10.1603/0022-0493(2007)100)
- Nair, P. M. G., & Choi, J. (2011). Identification, characterization and expression profiles of *Chironomus riparius* glutathione S-transferase (GST) genes in response to cadmium and silver nanoparticles exposure. Aquatic Toxicology, 101(3-4), 550-560. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.12.006>

- NIH. (2023). Nanotecnología. Genome.gov. <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Nanotecnologia>
- NIOSH. (2017). Nanotecnología. CDC.GOV. <https://www.cdc.gov/spanish/niosh/topics/nanotecnologia.html>
- OIRSA. (2015). El psílido de la papa y tomate *Bactericera* (=Paratrioza) *cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae): ciclo biológico; la relación con las enfermedades de las plantas y la estrategia del manejo integrado de plagas en la región del OIRSA. <https://www.oirsa.org/contenido/Manual%20Bactericera%20Cockerelli%20version%201.3.pdf>
- Patil, C. D., Borase, H. P., Suryawanshi, R. K., & Patil, S. V. (2016). Trypsin inactivation by latex fabricated gold nanoparticles: a new strategy towards insect control. *Enzyme and Microbial Technology*, 92, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.06.005>
- Petersen, E. J., & Nelson, B. C. (2010). Mechanisms and measurements of nanomaterial-induced oxidative damage to DNA. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 398(2), 613-650. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-3881-7>
- Pletsch, D.J., 1947. The potato psyllid, *Paratrioza cockerelli* (Sulc), its biology and control. *Bull. Mont. agric. Exp. Stn*, 44695.
- Revista de ciencia de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Adana. (2018). Toxicity of nanoparticles on insects: A Review. *Dergipark*. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/614363>
- Reyes, C. (2018). Efectos nocivos de los plaguicidas en la salud humana. *Panorama AGROPECUARIO*. <https://panorama-agro.com/?p=2984>
- Rita, Y., Morales, G. (2021). Hub pacifico centro, & Divulgación-CIMMYT. Opciones para sustituir plaguicidas altamente peligrosos. *CIMMYT*. <https://idp.cimmyt.org/opciones-para-sustituir-plaguicidas-altamente-peligrosos/>
- Rojas, P. (2010). Biología de *Tamarixia triozae* (Burks) (Hymenoptera: Eulophidae) parasitoide de *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae). *Koppert*. https://www.koppert.mx/content/mexico/docs/Tesis/2._Biologia_de_tamarixia_triozae_burks_hymenoptera_eulophidae_parasitoide_de_bactericera_cockerell-2010.pdf
- Rubio, O. A., Almeyda, I. H., Ireta, J., Sanchez, J. A., Fernández, R., Borbón, J. T., Díaz, C., Garzón, J. A., Rocha, R., y Cadena, M. A. (2006). Distribución de la punta morada y *Bactericera cockerelli* Sulc. en las principales zonas productoras de papa en México. *Scielo*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0568-25172006000200008&script=sci_arttext
- Ruvalcaba, F., Sánchez, V., Reyes, M., Hernández, L., Angulo, C. (2020). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Grupo de Inmunología y Vacunología. Síntesis verde de nanopartículas de oro a partir de extracto de damiana (*Turnera diffusa*). *PCTI*. <https://pcti.mx/articulos/sintesis-verde-de-nanoparticulas-de-oro-a-partir-de-extracto-de-damiana-turnera-diffusa/>

- Saranya, S., Selvi, A., Babujanarthanam, R., Rajasekar, A., & Madhavan, J. (2020). Insecticidal activity of nanoparticles and mechanism of action. En Springer eBooks (pp. 243-266). https://doi.org/10.1007/978-981-15-1702-0_12
- S.A.S. Institute. 2002. The SAS System for Windows, Release 9.0. SAS, Institute, Cary N. C. U.S.A.
- Secor, G. A., Rivera, V. V., Abad, J., Lee, I., Clover, G. R. G., Liefiting, L. W., Li, X., & De Boer, S. H. (2009). Association of '*Candidatus Liberibacter solanacearum*' with zebra chip disease of potato established by graft and psyllid transmission, electron microscopy, and PCR. *Plant Disease*, 93(6), 574-583. <https://doi.org/10.1094/pdis-93-6-0574>
- Shahzad, K., & Manzoor, F. (2019). 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>
- Small, T., Ochoa-Zapater, M. A., Gallelo, G., Ribera, A., Romero, F. M., Torreblanca, A., & 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>
- Sooresh, A., Kwon, H., Taylor, R. J., Pietrantonio, P. V., Pine, M., & Sayes, C. M. (2011). Surface functionalization of silver nanoparticles: Novel applications for insect vector Control. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3(10), 3779-3787. <https://doi.org/10.1021/am201167v>
- Stadler, T., Buteler, M., y Weaver, D. k. (2010). Nanoinsecticidas: nuevas perspectivas para el control de plagas. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0373-56802010000200001
- Tarafdar, J. C., Xiong, Y., Wang, W., Quinl, D., & Biswas, P. (2012). Standardization of size, shape and concentration of nanoparticle for plant application. *Indian Journals*. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:abr&volume=14&issue=2&article=005>
- Vereijssen, J. (2020). Ecology and management of *Bactericera cockerelli* and *Candidatus Liberibacter solanacearum* in New Zealand. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(2), 333-337. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(19\)62641-9](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(19)62641-9)
- Vereijssen, J. (2022). *Bactericera cockerelli* (tomato/potato psyllid) [Conjunto de datos]. En CABI Compendium. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.45643>
- Villegas-Rodríguez, F., Díaz-Gómez, O., Casas-Flores, S., Monreal-Vargas, C. T., Tamayo-Mejía, F., y Aguilar-Medel, S. (2017). Actividad de dos hongos entomopatógenos, identificados molecularmente, sobre *Bactericera cockerelli*. *Revista Colombiana De Entomología*, 43(1), 27. <https://doi.org/10.25100/socolen.v43i1.6643>
- Wan, J., Wang, R., Ren, Y., & McKirdy, S. (2020a). Potential Distribution and the Risks of *Bactericera cockerelli* and Its Associated Plant Pathogen *Candidatus Liberibacter solanacearum* for Global Potato Production. *Insects*, 11(5), 298. <https://doi.org/10.3390/insects11050298>
- Wan, J., Wang, R., Ren, Y., & McKirdy, S. (2020b). Potential distribution and the risks of *Bactericera cockerelli* and its associated plant pathogen *Candidatus Liberibacter*

solanacearum for global potato production. *Insects*, 11(5), 298.
<https://doi.org/10.3390/insects11050298>

Whipple, S., Bradshaw, J., & Harveson, R. (2012). Tolerancia al frío en psílicos de la patata. (Sesión anual de informes sobre chips cebra de 2012, Vols. 191-193). Workneh, F., Rashed, A., RUSH, CM.

World Health Organization: WHO. (2022, 15 septiembre). Residuos de plaguicidas en los alimentos.
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food>

Yasur, J., & Rani, P. (2015). Lepidopteran insect susceptibility to silver nanoparticles and measurement of changes in their growth, development and physiology. *Chemosphere*, 124, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.029>