

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC Y DIÓXIDO DE TITANIO PARA  
CONTROL DE *Bactericera cockerelli* Sulc. (HEMIPTERA: TRIOZIDAE) EN  
TOMATE

Tesis

Que presenta JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ

como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC Y DIÓXIDO DE TITANIO PARA  
CONTROL DE *Bactericera cockerelli* Sulc. (HEMIPTERA: TRIOZIDAE) EN  
TOMATE

Tesis

Que presenta JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ como requisito parcial  
para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN PARASITOLOGÍA  
AGRÍCOLA

Una firma manuscrita en azul que parece decir 'Hernández'.

Dr. Agustín Hernández Juárez  
Director (UAAAN)

Una firma manuscrita en azul que parece decir 'Betancourt'.

Dra. Rebeca Betancourt Galindo  
Director Externo

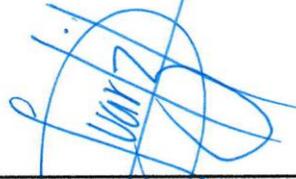
Saltillo, Coahuila

Diciembre 2020

NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC Y DIÓXIDO DE TITANIO PARA  
CONTROL DE *Bactericera cockerelli* Sulc. (HEMIPTERA: TRIOZIDAE) EN  
TOMATE

Tesis

Elaborada por JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ como requisito parcial  
para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Parasitología Agrícola con la  
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Agustín Hernández Juárez  
Asesor principal



Dra. Rebeca Betancourt Galindo  
Asesor



Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe  
Asesor



Dr. Ernesto Cerna Chávez  
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por permitirme cumplir una meta más en la vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), que me abrió sus puertas nuevamente para la culminación de un postgrado.

Al Dr. Agustín Hernández Juárez, por su eficaz labor como director de tesis y por la confianza otorgada para la realización de este trabajo.

Al comité de asesores: Dra. Rebeca Betancourt Galindo, Dr. Ernesto Cerna Chávez, Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe y Dr. Alberto Sandoval Rangel, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Agradecimiento a la QFB. Bertha Puente Urbina del CIQA quien me brindó el apoyo para la preparación de las nanopartículas de ZnO y dispersión de las mismas.

A todos los maestros del Departamento de Parasitología por sus conocimientos compartidos.

A mis compañeros de generación, Ana María, Carolina, Omar y Jonathan por los momentos compartidos durante nuestra estancia en la universidad.

A todos aquellos que intervinieron de alguna manera en la realización de este proyecto.

***A todos y cada uno de ustedes muchas gracias.***

## **DEDICATORIA**

### **A mis padres:**

Sr. José Gutiérrez Solano

Sra. Paula Ramírez Chávez

Por todos sus consejos y enseñanzas que me han brindado, ustedes me formaron como una persona de bien, cada situación, cada palabra, todo lo eh usado como una lección de vida.

### **A mis hermanos:**

Cándido, Orfe, Cheya, Belin, Adán, Luis Enrique y Jorge Miguel.

### **A mis sobrinos:**

Alessandro, Kevin, y Paola Guadalupe.

Gracias a ustedes eh aprendido afrontar los retos que se me presentan, sé que siempre pasamos por situaciones difíciles, pero sabemos salir adelante, también gracias por apoyarme siempre por confiar en mí y por motivarme a cumplir mis metas.

Muy especial a Tommy, quien forma parte de mi vida y con quien comparto mis logros, por tu cariño, comprensión y confianza, por apoyarme en los momentos difíciles.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA.....	v
LISTA DE CUADROS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	4
HIPÓTESIS.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
Importancia del tomate en México .....	5
Impacto de las plagas en el cultivo de tomate .....	6
<i>Bactericera cockerelli</i> .....	6
Biología y hábitos .....	6
Ciclo de vida de <i>Bactericera cockerelli</i> .....	7
Permanente del tomate .....	9
Nanotecnología .....	9
Nanotecnología en la agricultura .....	9
Interacción de las nanopartículas con las plantas .....	10
Nanopartículas .....	11
Nanopartículas de óxido de zinc .....	11
Nanopartículas de dióxido de titanio .....	12
Nanotecnología en el control de insectos .....	12
Modo de acción de las nanopartículas contra insectos .....	14

<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	17
<b>Ubicación del experimento</b> .....	17
<b><i>Bactericera cockerelli</i></b> .....	17
<b>Material vegetativo</b> .....	17
<b>Nanopartículas de Óxido de Zinc y Dióxido de Titanio</b> .....	17
<b>Evaluación de nanopartículas de óxido de zinc y dióxido de titanio sobre <i>Bactericera cockerelli</i> bajo condiciones de laboratorio</b> .....	18
<b>Evaluación de nanopartículas de óxido de zinc y dióxido de titanio sobre <i>Bactericera cockerelli</i> bajo condiciones de invernadero</b> .....	20
<b>Análisis de datos</b> .....	21
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	22
<b>CONCLUSIONES</b> .....	33
<b>REFERENCIAS</b> .....	34

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Concentraciones de nanopartículas evaluadas para el control de <i>Bactericera cockerelli</i> bajo condición de laboratorio e invernadero. ....	20
<b>Cuadro 2.</b> Medias de la mortalidad de <i>B. cockerelli</i> por NPs ZnO en laboratorio. ....	22
<b>Cuadro 3.</b> Medias de la mortalidad de <i>B. cockerelli</i> por NPs TiO <sub>2</sub> en laboratorio. ....	23
<b>Cuadro 4.</b> Medias de la mortalidad de <i>B. cockerelli</i> por la combinación de NPs ZnO y TiO <sub>2</sub> en laboratorio. ....	24
<b>Cuadro 5.</b> Medias de la mortalidad de <i>B. cockerelli</i> por nanopartículas de óxido de zinc en tomate bajo invernadero. ....	25
<b>Cuadro 6.</b> Medias de la mortalidad de <i>B. cockerelli</i> por nanopartículas de dióxido de titanio en tomate bajo invernadero. ....	26
<b>Cuadro 7.</b> Medias de la mortalidad de <i>Bactericera cockerelli</i> por la combinación de nanopartículas de óxido de zinc-dióxido de titanio en tomate bajo invernadero. ....	27

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Conocimientos actuales sobre el modo de acción tóxico de nanopartículas contra insectos. .... 16
- Figura 2.** Micrografías de microscopía electrónica de transmisión, A) Nanopartículas de óxido de zinc y B) Nanopartículas de dióxido de titanio..... 18

## RESUMEN

NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC Y DIÓXIDO DE TITANIO PARA CONTROL DE *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) EN TOMATE

Por

JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ JUÁREZ - ASESOR

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2020

El psilido de la papa/tomate *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) afecta la productividad del cultivo de tomate *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae), ocasionado por alimentación directa e indirecta al ser vector de *Candidatus Liberibacter solanacearum*, agente causal de la enfermedad permanente del tomate. El progreso de la nanotecnología ha generado nuevas alternativas de control, el uso de nanopartículas (NPs) incide en el crecimiento, estructura celular y funciones fisiológicas y bioquímicas de la planta. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto insecticida de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO), dióxido de titanio (NPs TiO<sub>2</sub>) y su combinación sobre ninfas de *B. cockerelli* en tomate bajo condiciones de laboratorio e invernadero. La investigación en laboratorio se realizó con el método de bioensayo de inmersión de hoja bajo un diseño completamente al azar, con seis concentraciones por cada nanopartícula y su combinación, en invernadero por aspersión directa en planta bajo un diseño en bloques al azar con tres concentraciones por cada nanopartícula y su combinación; en ambos diseños se agregó un testigo sin NPs y en todos los casos con seis repeticiones cada una. La mortalidad se evaluó cada 24 horas durante cuatro días. Ambas NPs bajo condición de laboratorio e invernadero mostraron toxicidad sobre ninfas de *B. cockerelli*. En laboratorio las NPs causaron significativamente 88, 99 y 100% de mortalidad a 96 horas después de la aplicación (dda) de NPs ZnO, NPs TiO<sub>2</sub> y su combinación respectivamente. La aspersión directa en plantas, aunque significativa; presentó baja mortalidad con 27, 32, 23% a 96 horas dda de NPs ZnO, NPs TiO<sub>2</sub> y su combinación respectivamente. Estos resultados son un primer avance del control de *B. cockerelli* con NPs, las cuales son muy prometedoras para su desarrollo, requiriendo mayor investigación, aumento de concentración principalmente para pruebas de semicampo y campo, lo que posibilita su futura integración en un manejo de plagas, aunado a que comparado con los insecticidas tradicionales son relativamente seguras para los humanos y medio ambiente.

**Palabras clave:** *Candidatus Liberibacter solanacearum*, Nanotecnología, Permanente del Tomate, paratrioza.

## ABSTRACT

NANOPARTICLES OF ZINC OXIDE AND TITANIUM DIOXIDE FOR CONTROL  
OF *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) ON TOMATO

By

JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ

MASTER OF SCIENCE IN AGRICULTURAL PARASITOLOGY

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ JUÁREZ – ADVISOR

Saltillo, Coahuila

December 2020

The potato / tomato psyllid *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) affects the productivity of the tomato crop *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae), caused by direct and indirect feeding as it is a vector of Candidatus *Liberibacter solanacearum*, the causal agent of permanent tomato disease. The progress of nanotechnology has generated new control alternatives, the use of nanoparticles (NPs) affects the growth, cell structure and physiological and biochemical functions of the plant. The objective of this study was to evaluate the insecticidal effect of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs), titanium dioxide (TiO<sub>2</sub> NPs) and their combination on *B. cockerelli* nymphs in tomato under laboratory and greenhouse conditions. The laboratory research was carried out with the leaf immersion bioassay method under a completely random design, with six concentrations for each nanoparticle and its combination, in a greenhouse by direct plant spraying under a random block design with three concentrations per each nanoparticle and its combination; in both designs a control without NPs was added and in all cases with six repetitions each. Mortality was assessed every 24 hours for four days. Both NPs under laboratory and greenhouse conditions showed toxicity on nymphs of *B. cockerelli*. In the laboratory, NPs significantly caused 88, 99 and 100% mortality at 96 hours after the application (dda) of NPs ZnO, NPs TiO<sub>2</sub> and their combination respectively. The direct aspersion in plants, although significant; presents low mortality with 27, 32, 23% at 96 hours a day of ZnO NPs, TiO<sub>2</sub> NPs and their combination respectively. These results are a first advance in the control of *B. cockerelli* with NPs, which are very promising for its development, requiring further investigation, increased concentration mainly for semi-field and field tests, which enables its future integration in pest management, in addition to the fact that compared to traditional insecticides they are relatively safe for humans and the environment.

**Key words:** Candidatus *Liberibacter solanacearum*, Nanotechnology, Tomato Permanent, paratrioza.

## INTRODUCCIÓN

México es de los principales productores del cultivo de tomate *Solanum lycopersicum* (L.) (Solanaceae), con una producción de 3, 780,950 ton., y un valor de la producción de \$ 31,150,517(MXN), con una participación en el mercado del 25% de las exportaciones mundiales, ocupando el segundo lugar en cuanto a productos agrícolas con mayor exportación (SIAP, 2020). El tomate es una hortaliza de gran importancia, se considera una fuente importante de vitaminas, minerales, proteínas, fibra y es una de las principales fuentes de licopeno, el cual posee efectos antioxidantes y antiinflamatorios (Castagna *et al.*, 2013), siendo considerada la fruta como un alimento básico funcional que cumple con los requisitos nutricionales.

El psilido de la papa/tomate *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) es una de las plagas más importantes que ataca solanáceas (Garzón *et al.*, 2005); causa daño directo mediante la alimentación y extracción de la savia (Munyanza *et al.*, 2007) el daño indirecto y el más importante es la transmisión de la bacteria *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CLs) (Garzón-Tiznado *et al.*, 2009; Munyanza *et al.*, 2009), agente causal de la enfermedad denominada zebra chip en el cultivo de papa *Solanum tuberosum* L. (Solanaceae) (Secor *et al.*, 2008; Liefting *et al.*, 2009) y permanente del tomate (PT) (Garzón-Tiznado *et al.*, 2009).

Los principales síntomas del PT son enrollamiento de las hojas, adquiriendo una estructura quebradiza con un color verde intenso, los folíolos apicales se tornan cloróticos con márgenes de color morado, aborto de flores, reducción del crecimiento y en general las plantas se debilitan, lo que acrecienta su susceptibilidad al ataque de otras enfermedades (Garzón-Tiznado *et al.*, 2009); esta enfermedad ha ocasionado pérdidas en el cultivo de tomate de hasta un 80% en la producción (Liu *et al.*, 2006).

El control de este insecto se realiza principalmente mediante la aplicación de insecticidas químicos, que en estados como Coahuila y San Luis Potosí se

realizan hasta doce aplicaciones durante la temporada de los cultivos de tomate y papa con thiacloprid, imidacloprid y otros insecticidas químicos (Vega-Gutiérrez *et al.*, 2008) con desconocimiento de la tolerancia o resistencia que se pueda generar por un mal manejo (Cerna *et al.*, 2015). Este control a resultado poco efectivo, aunque no necesariamente por resistencia del insecto, sino por uso deficiente de los insecticidas (Vega-Gutiérrez *et al.*, 2008). Se han sugerido otras estrategias de control, como la resistencia vegetal (Casteel *et al.*, 2006), la implementación de control biológico usando insectos depredadores y parasitoides (CABI 2015) y uso de hongos entomopatógenos (Villegas-Rodríguez *et al.*, 2014).

La nanotecnología, actualmente es considerada de mucha importancia para diferentes sectores (Patel *et al.*, 2002; Shaker *et al.*, 2017), particularmente en la elaboración, caracterización y aplicación de materiales de dimensiones nanométricas, con tamaños entre 1-100 nanómetros (nm) (Ali *et al.*, 2014). Existen diferentes compuestos para la elaboración de nanomateriales, como las nanopartículas (NPs) metálicas; de las cuales, las más utilizadas son las elaboradas con oro, plata, cobre, hierro, aluminio, cobalto, titanio y zinc (Khot *et al.*, 2012). Las NPs con propiedades químicas únicas se usan en aplicaciones industriales y agrícolas. El uso de estas, incide en el crecimiento de las plantas, la estructura celular y las funciones fisiológicas y bioquímicas (Rico *et al.*, 2015), presentando un potencial para el control de plagas (Biswal *et al.*, 2012; El-bendary y El-Helaly, 2013), como alternativa a los insecticidas químicos, donde estas se consideran seguras para los humanos en comparación con los insecticidas sintéticos (Keratum *et al.*, 2015; Salem *et al.*, 2015).

Las nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) son utilizadas en diferentes áreas como la industria de cosméticos, textiles, medicina, electricidad y en la agricultura (Chang *et al.*, 2012; Mekewi *et al.*, 2012). En el sector agrícola, por su uso potencial como nanofertilizantes, promoviendo el crecimiento y desarrollo de las plántulas, propiedades fungicidas y bactericidas en el desarrollo de diferentes cultivos de interés económico (Chang *et al.*, 2012; Esparza, 2015; Méndez *et al.*,

2016), así como por sus efectos insecticidas sobre el gorgojo del arroz *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) (Hamza, 2012; Keratum *et al.* 2015), gusano rosado del algodón *Pectinophora gossypiella* Saunders (Lepidoptera: Gelechiidae) (Derbalah *et al.*, 2014) y contra larvas de *Culex quinquefasciatus* Say (Diptera: Culicidae) (Mostafa *et al.*, 2018)

Las nanopartículas de dióxido de titanio (NPs TiO<sub>2</sub>) en el área agrícola han mostrado un incremento en la actividad de varias enzimas y promueven la absorción del nitrato, acelerando la transformación del nitrógeno inorgánico a orgánico haciéndolo más asimilable, aumentando el crecimiento vegetativo (Capaldi *et al.*, 2015), además de que presentan actividad fungicida y bactericida contra diversos hongos y bacterias fitopatógenos importantes (Boxi *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2013) y actividad insecticida contra larvas de *Spodoptera littoralis* Boisd. (Lepidoptera: Noctuidae) (Shaker *et al.*, 2017).

Actualmente, se buscan alternativas de control de plagas amigables con el ambiente que sean económicas y eficientes en un manejo integral de plagas.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de nanopartículas de óxido de zinc y dióxido de titanio sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de laboratorio e invernadero en tomate.

## **HIPÓTESIS**

Al menos una nanopartícula será efectiva en la mortalidad de *Bactericera cockerelli* en al menos un 80% de control.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Importancia del tomate en México

El tomate *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae) es una de las hortalizas de mayor consumo en todo el mundo (Al-Amri, 2013), los frutos de tomate varían en tamaño, forma y color, su consumo supera a todos los demás vegetales, después de la papa *Solanum tuberosum* L. (Solanaceae), siendo una fuente importante de minerales como el potasio y el magnesio (Pathak y Stoddard, 2018). La demanda de alimentos de alta calidad nutricional está aumentando debido a la creciente conciencia de los consumidores acerca de la relación entre los alimentos y la salud y las oportunidades comerciales que ofrecen estos productos (Ilahy *et al.*, 2009). El tomate es el segundo cultivo más importante en el mundo (Akhtar *et al.*, 2016). México es de los principales productores del cultivo de tomate, con una producción de 3,780,950.01ton., y un valor de la producción de \$ 31,150,517.30, siendo el principal proveedor, con una participación en el mercado de 25 % de las exportaciones mundiales, ocupando el segundo lugar en cuanto a productos agrícolas con mayor exportación (SIAP, 2020). El tomate es una hortaliza de gran importancia, se considera una fuente importante de vitaminas, minerales, proteínas, fibra y es una de las principales fuentes de licopeno, el cual posee efectos antioxidantes y antiinflamatorios (Castagna *et al.*, 2013) por lo que la fruta se considera un alimento básico funcional que cumple con los requisitos nutricionales. La actividad antioxidante de los frutos de tomate se clasifica en hidrofílicos (ácido ascórbico y compuestos fenólicos) y lipofílicos (licopeno y  $\beta$  caroteno) (Raiola *et al.*, 2014), cuya actividad antioxidante total de los frutos de tomate influenciada principalmente por los antioxidantes hidrofílicos, que ha demostrado una contribución importante a la actividad antioxidante (García-Valverde *et al.*, 2013).

## **Impacto de las plagas en el cultivo de tomate**

Se prevé que la población mundial crecerá aproximadamente a 8 mil millones de personas en el 2025 y 9 mil millones en el año 2050, esto ha obligado a aumentar la productividad agrícola para alimentar una población mundial en rápido crecimiento (Singh, 2014). Por otra parte, la seguridad alimentaria se ve amenazada por las pérdidas de cultivos debido a plagas y ataques de patógenos, estos agentes bióticos incluyen virus, bacterias, hongos e insectos (Bebber y Gurr, 2015). La producción de tomate ha sido limitada por la incidencia de insectos plaga entre los cuales destacan: mosca blanca (*Bemisia tabaci* Gennadius, *Trialeurodes vaporariorum* West) (Aleyrodidae), áfidos (*Myzus persicae* Sulzer y *Aphis gossypii* Glover) (Aphididae) y psílidos (*Bactericera cockerelli*), vectores de enfermedades virales que afectan hasta el 100% del cultivo (Bravo, 2002).

### ***Bactericera cockerelli***

El psílido de la papa y tomate *B. cockerelli* ha sido una de las principales plagas de cultivos de solanáceas durante los últimos años. *B. cockerelli* ocasiona daños directos a la planta al succionar la savia e indirectos al transmitir fitoplasmas (Munyanza *et al.*, 2007). Dichos fitoplasmas producen la enfermedad punta morada en papa o permanente del tomate en jitomate (Garzón *et al.*, 2005). Sus síntomas se deben a la interferencia que tienen los fitoplasmas con el transporte de nutrientes, a los daños mecánicos ocasionados por la alimentación, y a las toxinas que inyectan los adultos al alimentarse (Munyanza *et al.*, 2007).

### **Biología y hábitos**

El rango óptimo de temperatura es de 21-27 °C, temperaturas superiores a 32 °C e inferiores a 15 °C afectan el desarrollo y sobrevivencia de *B. cockerelli*, porque reduce la puesta de huevos y la eclosión, 27 °C es la temperatura óptima para el psílido. Las ninfas de *B. cockerelli* toman normalmente una posición debajo de las hojas en las plantas donde el follaje es denso, pero unas cuantas pueden ser encontradas por el haz, su cuerpo es plano como escamas y su color verde

dificulta observarlas, cuando están jóvenes se localizan cerca del sitio donde fueron depositados los huevecillos y permanecen inactivas durante los primeros estadios (Munyanza, 2010). Este insecto generalmente deposita sus huevecillos por el envés y bordes de las hojas, pero si la incidencia es muy alta, también lo hace en las flores. Una hembra madura puede poner en promedio 500 huevos en un período de 21 días, aunque se tienen datos de que llegan a ovipositar hasta 1,500 en su ciclo de vida. *B. cockerelli* causa dos tipos de daño directo al succionar la savia de las plantas, esto cuando se encuentra en el estado de ninfa, por otra parte, el daño indirecto lo ocasiona al transmitir fitoplasmas esto por las ninfas y adultos (Vega *et al.*, 2008).

### **Ciclo de vida de *Bactericera cockerelli***

Presenta cinco estadios ninfales con forma oval, aplanados dorso-ventralmente, con ojos bien definidos. El perímetro del cuerpo presenta estructuras cilíndricas que contienen filamentos cerosos, los cuales forman un halo alrededor del cuerpo (Marín *et al.*, 1995).

Huevecillos: De forma ovoide, de color anaranjado-amarillento, corion brillante, presentan en uno de sus extremos un pequeño pedúnculo, con el cual se adhieren a la superficie de las hojas.

Primer estadio: Las ninfas presentan una coloración anaranjada. Las antenas presentan los segmentos basales cortos y gruesos y se van adelgazando hasta finalizar en un pequeño segmento con dos setas sensoras. Abdomen bien definido con segmentación poco evidente, paquetes alares poco notables. La segmentación en las patas es poco visible. La división del cuerpo no está bien definida.

Segundo estadio: A partir de este estadio, se aprecian claramente las divisiones entre cabeza, tórax y abdomen. Las antenas aún no presentan segmentación diferenciada, se aprecian como dos setas sensoras. Clípeo, labio y estilete se encuentran diferenciados. Paquetes alares desarrollados, patas diferenciadas, abdomen con segmentación poco marcada.

Tercer estadio: Cabeza con antenas con tres placoides diferenciados y setas sensoras, abdomen con los cuatro primeros pares de espiráculos diferenciados, círculos de poros anales y el ano.

Cuarto estadio: Las antenas se estrechan visiblemente hacia su parte media, de ahí es más angosta, terminando en dos setas sensoras, los ojos se hacen evidentes. El tórax con patas segmentadas bien definida y se aprecia en la parte terminal de las tibias posteriores, un par de uñas. Los paquetes alares están bien definidos. La separación entre el tórax y el abdomen es notoria.

Quinto estadio: La segmentación entre cabeza, tórax y abdomen está definida. La cabeza y el abdomen presentan una coloración verde claro y el tórax una tonalidad un poco más oscura. En la cabeza, las antenas están seccionadas en dos partes por una hendidura marcada, la parte basal es gruesa y la parte apical filiforme. El tórax presenta los tres pares de patas con su segmentación bien definida. Los paquetes alares están claramente diferenciados, sobresaliendo del resto del cuerpo. El abdomen es semicircular y presenta un par de espiráculos en cada uno de los cuatro primeros segmentos.

Adulto: Al emerger el adulto presenta una coloración verde-amarillento; es inactivo y de alas blancas que al paso de 3 o 4 horas se tornan transparentes (se conoce como adulto teneral). La coloración del cuerpo pasa de ligeramente ámbar a café oscuro o negro, este cambio se presenta en los primeros 7 a 10 días de alcanzar este estadio.

Adulto hembra: Abdomen con cinco segmentos visibles más el segmento genital, este es de forma cónica en vista lateral, en la parte media dorsal se presenta una mancha en forma de "Y" con los brazos hacia la parte terminal del abdomen.

Adulto macho: Con seis segmentos visibles más el genital, este último segmento se encuentra plegado sobre la parte media dorsal del abdomen; al ver este

insecto dorsalmente se distinguen los genitales con estructuras en forma de pinza que caracteriza a este sexo.

### **Permanente del tomate**

El PT reportado por primera vez en Guanajuato por Garzón (1984), es una enfermedad que se presumía la transmitían organismos tipo fitoplasmas, no obstante estudios recientes determinaron a una nueva especie de *Liberibacter* que causa la enfermedad conocida como PT a la que se denominó *Candidatus Liberibacter psyllaourous* (Hansen *et al.*, 2008). Garzón-Tiznado *et al.*, (2009) determinó la relación existente entre el insecto vector con *Candidatus Liberibacter solanacearum* responsable del PT, encontrando una similitud del ADN del 99% entre el patógeno transmitido por *B. cockerelli* a plantas de tomate, previamente expuesta a contagio.

### **Nanotecnología**

La Nanotecnología es una disciplina de investigación multidisciplinaria que abre una importante gama de oportunidades en diversos campos como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura. Los beneficios de la nanotecnología son enormes para mejorar diversas ramas de la industria (Ram *et al.*, 2014). La nanotecnología es el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras manipulando el tamaño y forma a nanoescala en un rango de 1 hasta 100 nanómetros (Yadollahi *et al.*, 2010), resultando en nuevas estructuras que exhiben propiedades biológicas, físicas, químicas, significativamente mejoradas (Záyago-Lau y Foladori, 2010).

### **Nanotecnología en la agricultura**

La nanotecnología proporciona productos con nuevas propiedades fisicoquímicas, brinda grandes oportunidades para la obtención de productos y aplicaciones innovadoras para la agricultura, la ganadería, el tratamiento de aguas y la producción, elaboración, conservación y envasado de alimentos. Para esto se han implementado diversidad de nanomateriales que van desde metales

y óxidos de metales inorgánicos a nanomateriales orgánicos que llevan ingredientes bioactivos (Ávalos *et al.*, 2016). La aplicación de nanomateriales en la agricultura es objeto de intensa investigación y desarrollo, los resultados positivos de aplicación de diversos nanomateriales en la agricultura han fomentado la utilización de esta tecnología (Saharan *et al.*, 2016). La intervención de la nanotecnología en la agricultura tiene perspectivas sobresalientes para mejorar la eficiencia de nutrientes a través nanoformulaciones de fertilizantes, la vigilancia y el control de plagas, el desarrollo de pesticidas de nueva generación, reduciendo la cantidad del producto por aplicar al suelo o al follaje, a dosis significativamente menores que las requeridas convencionalmente, protegiendo al agroecosistema (Xue *et al.*, 2014). El uso de la nanotecnología en poscosecha ayudará a la conservación, envasado de alimentos, el fortalecimiento de las fibras naturales (Mukhopadhyay, 2014). Se considera que los nanodispositivos tendrán la capacidad de detectar infestaciones de plagas y enfermedades en cultivos, la deficiencia de nutrientes, o cualquier otro problema de fitosanidad, mucho antes de que los síntomas sean evidentes (Scott y Chen, 2013). Las NPs son una opción muy prometedora debido a su tamaño, volumen de superficie y sus propiedades físico-químicas (Khot *et al.*, 2012; Kardos *et al.*, 2015).

### **Interacción de las nanopartículas con las plantas**

Las NPs interactúan con las plantas causando muchas alteraciones morfológicas y fisiológicas dependiendo de sus propiedades. La aplicación apropiada del mecanismo fisiológico, bioquímico y molecular de las NPs en la planta conduce a un mejor crecimiento y desarrollo. Su eficacia depende de la concentración y varía de planta a planta (Siddiqui *et al.*, 2015). Las NPs aplicadas al suelo o agua de riego, penetran a través de la epidermis de la raíz y llegan a la corteza vía simplasto y/o apoplasto, posteriormente atraviesan la endodermis y finalmente entran al tejido conductivo del xilema para ser translocadas hasta la parte aérea de la planta (Peng *et al.*, 2015). El tamaño nanométrico de las NPs facilita la penetración a través de las membranas biológicas, en comparación con materiales a escala micrométrica, las NPs tienen mayor facilidad de penetrar la

membrana y pared celular causando cambios morfo-fisiológicos (Sabir *et al.*, 2014). El efecto promotor o inhibidor en el crecimiento de las plantas con las NPs está relacionado con la concentración, tamaño y sus propiedades inherentes, así como la función fisiológica y bioquímica que desempeña la planta, si actúa como micronutriente tratándose de cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), entre otras (Wang *et al.*, 2015).

### **Nanopartículas**

Las NPs siempre han existido ya que se producen de manera natural en el ambiente, por incendios forestales o por erupciones volcánicas, desde la antigüedad se han utilizado en la elaboración de cosméticos o pigmentos (Casals *et al.*, 2008). Las NPs tienen una gran variedad de aplicaciones en la industria, incluyendo electrónica, óptica, textil, así como aplicaciones en dispositivos médicos, biosensores y en remediación medioambiental (Handy y Shaw, 2007). Las NPs ofrecen muchas ventajas ya sea como encapsulante de ingredientes activos, aumentando la capacidad de aplicación dirigida, disminuye la cantidad a usar reduciendo así daños al ambiente, mayor biodisponibilidad para plagas específicas y menor riesgo para los humanos (Lugo *et al.*, 2010).

### **Nanopartículas de óxido de zinc**

Las NPs ZnO son usadas en diferentes áreas de la industria como cosméticos, textiles, medicina, electricidad y en la agricultura (Chang *et al.*, 2012). En el sector agrícola son estudiadas por su actividad antimicrobiana (Sabir *et al.*, 2014) y por su potencial como nanofertilizante, corrigiendo las deficiencias de zinc en las plantas, promoviendo la germinación, crecimiento y desarrollo (Shilpa y Lawre, 2014; Siddiqui *et al.*, 2015).

Soriano *et al.* (2018), aplicaron NPs de óxido de zinc y óxido de zinc/grafeno sobre la vida poscosecha de flores de *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinnery (Gentianaceae) logrando mantener la calidad del tallo floral y las hojas durante 16 días.

La aplicación foliar de nanoquelato de zinc como fertilizante promovió un incremento en la altura de plantas, peso fresco y peso seco de algodón *Gossypium hirsutum* L. (Malvaceae), así como biomasa seca y clorofila (Rezaei y Abbasi, 2014).

Las NPs ZnO influyen en el vigor de las semillas de chile *Capsicum annuum* L. (Solanaceae) mejorando la tasa de germinación y el desarrollo de las plántulas y promueven la acumulación de compuestos fenólicos (García *et al.*, 2018).

### **Nanopartículas de dióxido de titanio**

Las NPs TiO<sub>2</sub> aplicadas al follaje, muestran un incremento en la actividad de varias enzimas y promueven la absorción del nitrato, el cual acelera la transformación del nitrógeno inorgánico a orgánico haciéndolo más asimilable, reflejándose en mayor crecimiento vegetativo (Capaldi *et al.*, 2015). Las NPs de TiO<sub>2</sub> con plata inducen el crecimiento, contribuyen al proceso de fotosíntesis y desempeñan un papel antimicrobiano en plantas de espinaca *Spinacia oleracea* L. (Amaranthaceae) (Gordillo *et al.*, 2019) podrían promover significativamente la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas (Ze *et al.*, 2011). Yang *et al.* (2007), suministraron NPs TiO<sub>2</sub> en fase anatasa en el suelo, y obtuvieron un rendimiento promedio de la espinaca en un 95% superior al control, lo que relacionaron con un efecto de optimización en la fijación de nitrógeno.

### **Nanotecnología en el control de insectos**

Se ha estimado que cada año se usan aproximadamente 2,5 millones de toneladas de pesticidas convencionales en la agricultura contra insectos. Se espera que esta cantidad aumente y cause peligros en todo el mundo debido a la alta toxicidad, la persistencia prolongada y la pérdida durante la aplicación al suelo, cuerpos de agua y atmósfera que causan contaminación o residualidad en los cultivos, afectando la ecología y la salud pública (Sabry y Ragaie, 2018). Los usos y beneficios potenciales de la nanotecnología son enormes, incluyen el manejo de plagas de insectos a través de las nuevas formulaciones de insecticidas basadas en nanomateriales (Ragaie y Sabry, 2014).

Los nanoinsecticidas son productos fitosanitarios utilizados contra las plagas de insectos (Sabry y Ragaei, 2018) pueden ayudar a reducir el número de aplicaciones en el campo debido al aumento de la eficacia. Athanassiou *et al.* (2018), mencionan como beneficios comunes de nanopesticidas; mayor solubilidad de ingredientes activos insolubles en agua, mayor estabilidad de la formulación, eliminación de solventes orgánicos tóxicos usados en pesticidas convencional, liberación lenta de ingredientes activos, aumenta el tiempo de degradación, mejora la movilidad y mayor actividad insecticida debido a un tamaño de partícula más pequeño.

Khooshe-Bast *et al.* (2016), evaluaron el efecto insecticida de NPs de zinc y *Beauveria bassiana* sobre *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) bajo condiciones de laboratorio, obteniendo mortalidades de 91 y 88% a concentraciones de 20 mg l<sup>-1</sup> y 108 esporas ml<sup>-1</sup> respectivamente. Das *et al.* (2019), hicieron un análisis comparativo sobre la eficacia entomotóxica de nanopartículas de óxido de aluminio, dióxido de titanio y óxido de zinc contra *S. orizae* L. (Coleoptera: Curculionidae), con una mortalidad de más del 90% después de 4 días de tratamiento con NPs de óxido de aluminio a una dosis de 1 g kg<sup>-1</sup> de arroz *Oriza sativa* L. (Poaceae), mientras que con óxido de zinc y dióxido de titanio alcanzaron esta eficacia a una dosis de 2 g kg<sup>-1</sup> después de 14 días de tratamiento. En el sector agrícola el óxido de zinc y dióxido de titanio se prefieren sobre el óxido de aluminio ya que este último tiene efectos adversos sobre el crecimiento de las plantas. Shaker *et al.* (2016), evaluaron nanopartículas de óxido de cobre contra larvas del segundo y cuarto estadio de *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera: Noctuidae), con resultados efectivos contra la supervivencia de las larvas de segundo y cuarto estadio con un 95 y 75% de mortalidad a 1000 ppm respectivamente, también se vieron afectados algunos aspectos biológicos del insecto como fecundidad, porcentaje de eclosión de huevos, proporción de sexos, duración de larvas y pupas, pupación y porcentaje de emergencia de adultos. Los mismos autores evaluaron NPS de óxido de cobre combinado con el insecticida metomilo en comparación con el metomilo y un control, los resultados demostraron que hay una gran reducción en la mortalidad

de larvas tratadas con la mezcla en comparación con las tratadas con el pesticida solo, lo que indica las propiedades de fotodegradación de las nanopartículas sintetizadas frente al plaguicida metomilo. Zayed *et al.* (2020), evaluaron nanopartículas de óxido de aluminio y sílice en comparación con el malatión en granos de trigo *Triticum* sp. L. (Poaceae) sobre el escarabajo de la harina *Tribolium castaneum* (Herbest) (Coleoptera: Tenebrionidae), sus resultados mostraron que el malatión tuvo el mayor efecto adverso sobre los adultos de *T. castaneum* y las dos nanopartículas utilizadas inhibieron significativamente el número de prole de *T. castaneum*. Las NPs de sílice y aluminio son recomendadas para proteger los granos almacenados como método alternativo a los insecticidas químicos siendo relativamente seguro para los humanos en comparación con el malatión.

### **Modo de acción de las nanopartículas contra insectos**

La información precisa sobre el posible modo de acción de las NPs contra insectos y ácaros es limitada (Benelli, 2018) (Fig. 1). Los mecanismos que conducen a la citotoxicidad se han estudiado principalmente para las nanopartículas de plata, considerando que su toxicidad en los modelos biológicos está fuertemente influenciado por su tamaño, forma y carga (Foldbjerg *et al.*, 2015).

Una teoría ampliamente aceptada para varios tipos de NPs es que logran una toxicidad que desencadena el estrés oxidativo en los tejidos artrópodos (Foldbjerg *et al.*, 2015; Mao *et al.*, 2018). Su toxicidad también puede deberse a la penetración de las NPs a través del exoesqueleto (Rai *et al.*, 2014; Stadler *et al.*, 2017). Luego, en el espacio intracelular, el material a nanoescala se une al azufre de las proteínas o al fósforo del ADN, lo que lleva a la rápida desnaturalización de las orgánulas y las enzimas. Posteriormente, la disminución de la permeabilidad de la membrana y la perturbación en la fuerza motriz de protones puede causar la pérdida de la función celular y la muerte celular (Jiang *et al.*, 2015).

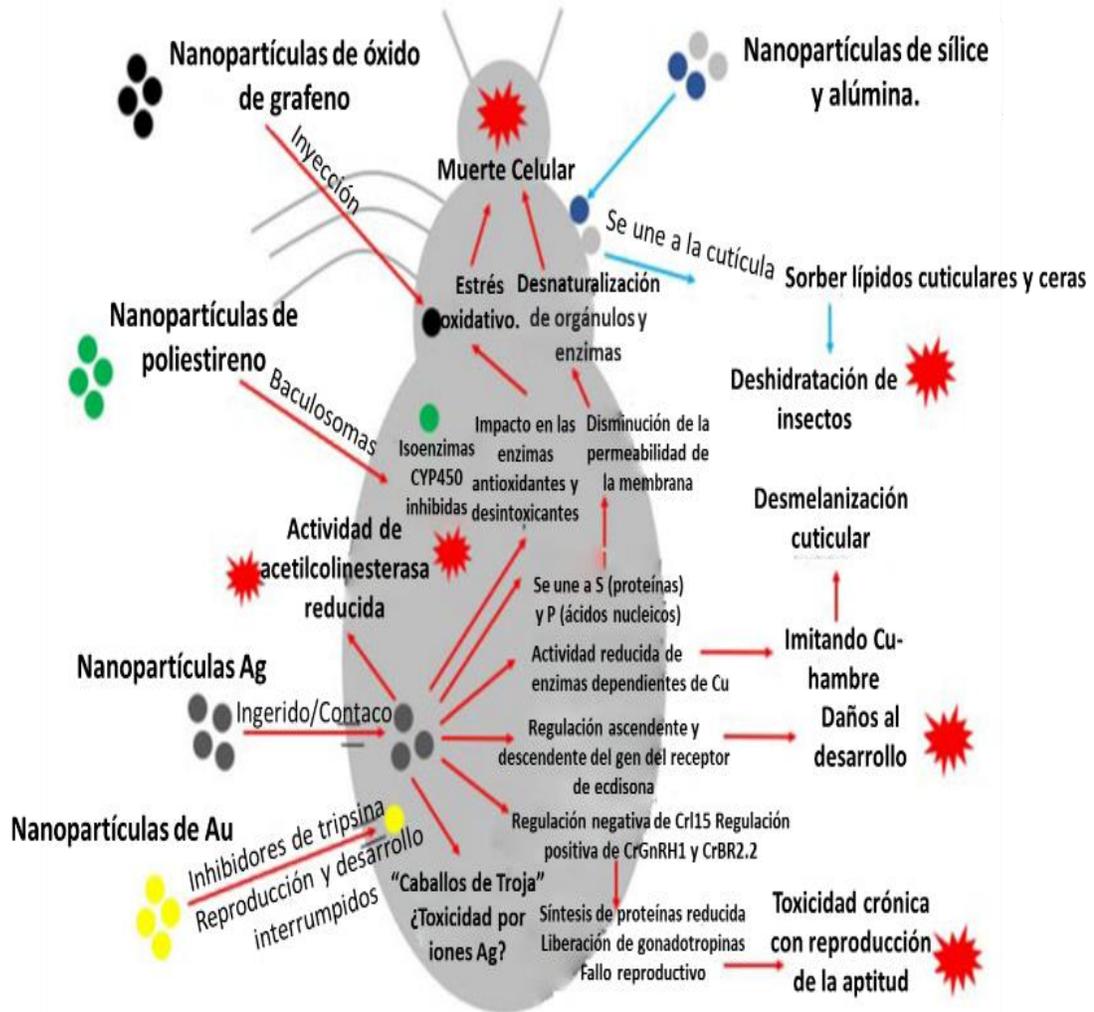
Fouad *et al.* (2018), evaluaron nanopartículas de plata para el control de *Aedes*

*albopictus* Skuse y *Culex pipiens* L. (Diptera: Culicidae), las larvas del cuarto estadio mostraron una disminución en los niveles de proteína total, también redujo acetilcolinesterasa y  $\alpha$  y  $\beta$  carboxilesterasa. La expresión del gen del receptor de ecdisona fue elevada o regulado a la baja en mosquitos acuáticos *Chironomus riparius* (Meigen) (Diptera: Chironomidae) tras la exposición a nanopartículas de nonilfenol y plata (Nair y Choi, 2012), inducción pronunciada de genes relacionados con el estrés oxidativo (Nair *et al.*, 2013).

Los efectos adversos de nanopartículas de plata sobre *Drosophila melanogaster* Meigen (Diptera: Drosophilidae) se encontró con acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en los tejidos de la mosca que conducen a apoptosis, daño al ADN y autofagia (Mao *et al.*, 2018). Las nanopartículas de dióxido de aluminio sobre *S. oryzae* se unen a la cutícula del escarabajo debido a fuerzas triboeléctricas, absorbiendo su capa de cera por área de superficie provocando la deshidratación de los insectos (Stadler *et al.*, 2017).

Mommaerts *et al.* (2012), evaluaron los efectos secundarios de nanopartículas de sílice en una exposición dietética en el abejorro *Bombus terrestris* L. (Hymenoptera: Apidae) donde encontraron lesión epitelial del intestino medio en obreras intoxicadas. La alimentación de *Bombix mori* L. (Lepidoptera: Bombycidae) con NPs TiO<sub>2</sub> estimula la biosíntesis de 20-hidroexiecdisona, acorta la progresión del desarrollo y reduce la duración de la muda (Li *et al.*, 2014). Milivojević *et al.* (2015), encontraron que la actividad de la acetilcolinesterasa era elevada en las abejas expuestas a nanomateriales de óxido de zinc. Kubo-Irie *et al.* (2015), demostraron que la toxicidad de NPs TiO<sub>2</sub> y NPs ZnO perjudica la espermatogénesis de los insectos.

Las nanopartículas de sílice causan daño a la barrera de agua de la cutícula de los insectos principalmente por abrasión y debido a la adsorción, produciendo la muerte del insecto por desecación (El-Helaly *et al.*, 2016).



**Figura 1.** Conocimientos actuales sobre el modo de acción tóxico de nanopartículas contra insectos (Benelli, 2018).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del experimento

La investigación se realizó en el Laboratorio de Entomología Molecular y Alternativas de Control de Plagas e invernadero del Departamento de Parasitología (DP) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

### *Bactericera cockerelli*

Se utilizaron insectos desarrollados en plantas de solanáceas de papa, tomate y chile, en jaulas de 60x60x60 cm, libre de patógenos y parasitoides que afecten a los individuos, bajo condiciones de invernadero a  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , humedad relativa de  $60 \pm 10\%$  y ventilación automatizada para reducir el calor y renovar el suministro de bióxido de carbono.

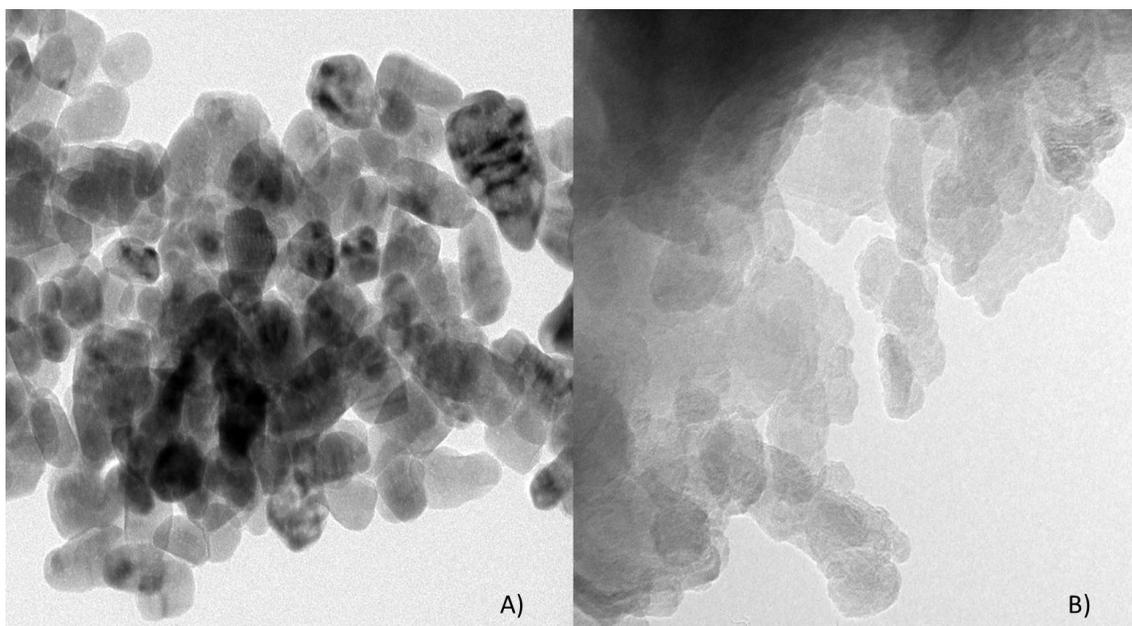
### Material vegetativo

Se utilizaron plantas de tomate tipo bola Variedad Floradade (Fax de Occidente S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México); esta variedad fue 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 y el trasplante se llevó a cabo a los 30 días después de la siembra en contenedores de polietileno de 2 L para los ensayos de laboratorio y en contenedores de polietileno de 10 L para los ensayos de invernadero.

### Nanopartículas de Óxido de Zinc y Dióxido de Titanio

Las NPs ZnO fueron sintetizadas en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en Saltillo Coahuila. Se sintetizaron a través de precipitación controlada de acuerdo a la guía de Betancourt *et al.* (2010), mediante el método de hidrólisis química, bajo la siguiente metodología: En un matraz bola provisto de tres bocas se colocaron 13.7 g de  $(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2\text{Zn}$  y 600 mL de etanol. Esta

solución se agitó constantemente a una temperatura de 75°C en reflujo durante 2 h. Después se adicionó una solución acuosa de 0.22 M de NaOH y 100 mL más de H<sub>2</sub>O para completar la mezcla de reacción. Se continuó con agitación constante durante 24 h. Posteriormente las NPs ZnO obtenidas inmersas en etanol fueron centrifugadas a 15,000 rpm durante 5 min para su recuperación. El precipitado fue lavado 2 veces con etanol y secado en una estufa a 60°C por 24 h. Las NPs ZnO secas fueron trituradas en un mortero de ágata para obtener un polvo fino con un tamaño de partícula primaria de 23.44 nm (Fig. 2A) y se almacenaron a temperatura ambiente hasta su uso. Las NPs TiO<sub>2</sub> en polvo con un tamaño de partícula primaria de 15 nm (Fig. 2B), se obtuvieron comercialmente de Universal Selector™.



**Figura 2.** Micrografías de microscopía electrónica de transmisión, A) Nanopartículas de óxido de zinc y B) Nanopartículas de dióxido de titanio.

### **Evaluación de nanopartículas de óxido de zinc y dióxido de titanio sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de laboratorio**

Se colocaron plantas de tomate en una jaula de 60x60x60 cm y junto a estas se liberaron adultos de *B. cockerelli* durante 48 horas para que ovipositaran,

posteriormente 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. (Hemiptera: Triozidae) de Insecticide Resistance Action Committee (IRAC 2020). El bioensayo consistió en separar folíolos de tomate y con un microscopio estereoscópico binocular Carl Zeiss Stemi DV4 se contabilizó el número de ninfas vivas del segundo estadio de *B. cockerelli* por folíolo.

La técnica de bioensayo que se utilizó fue de inmersión de folíolo, para la cual en cada tratamiento se sumergieron folíolos infestados con ninfas por 5 segundos. Los folíolos tratados se mantuvieron en charolas de plástico con algodón saturado de agua bajo condiciones controladas de laboratorio ( $25 \pm 2$  °C, 70% humedad relativa y fotoperiodo de 14:10 h luz: oscuridad). Para este estudio se establecieron 6 concentraciones por cada NP sola y en combinación, además de un tratamiento testigo sin NPs, aplicando solo agua destilada, con 6 repeticiones por concentración (Cuadro 1) y cada repetición con 3 unidades experimentales, considerada una unidad experimental 1 folíolo infestado. Las diferentes concentraciones de NPs se prepararon utilizando agua destilada para su dispersión y polisorbato 20 (Tween 20) como agente emulsificante a razón de 1mL: 1L de agua.

**Cuadro 1.** Concentraciones de nanopartículas evaluadas para el control de *Bactericera cockerelli* bajo condición de laboratorio e invernadero.

Tratamiento	Concentración (ppm)	
	Laboratorio	Invernadero
Testigo	0	0
NPs ZnO	100	----
	300	300
	500	----
	1000	1000
	2000	----
	3000	3000
NPs TiO <sub>2</sub>	40	40
	60	----
	80	----
	100	100
	300	----
	500	500
	NPs ZnO – NPs TiO <sub>2</sub> (Combinación)	20-20
30-30		----
40-40		----
50-50		50-50
150-150		----
250-250		250-250

**Evaluación de nanopartículas de óxido de zinc y dióxido de titanio sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de invernadero**

Se utilizaron plantas de tomate de 50 días después de la siembra, cultivadas en contenedores de polietileno de 10 L aproximadamente de sustrato. El estudio consistió en colocar las plantas de tomate en una jaula de 60x60x60 cm y junto a estas se liberó *B. cockerelli* a razón de 15 adultos por cada planta durante 48 h para que ovipositaran, posteriormente se retiraron los adultos y se realizó el conteo de huevecillos y se dio seguimiento hasta la eclosión y segundo estadio de la ninfa.

El ensayo consistió en aplicar directamente en las plantas los tratamientos con un aspersor manual de 500 mL, a razón de 25 mL por planta. Con base en los resultados de laboratorio, se establecieron tres concentraciones por NPs sola y en combinación, además de un tratamiento testigo sin NPs aplicando agua

destilada, con 6 repeticiones por concentración (Cuadro 1). Las diferentes concentraciones de NPs se prepararon siguiendo la misma metodología del bioensayo de laboratorio.

### **Análisis de datos**

En ambos bioensayos la evaluación de la mortalidad se realizó a las 24, 48, 72 y 96 h después de aplicados los tratamientos. El bioensayo de laboratorio se evaluó con un microscopio estereoscopio binocular y en invernadero con una lupa. Se registró el número de ninfas sobrevivientes y muertas, expresando en porcentaje. Cada ninfa se consideró muerta, cuando no presentaba respuesta al estímulo, presentaba apéndices pegados al cuerpo y/o se encontraba deshidratada.

Los datos de mortalidad se analizaron usando el análisis Probit para estimar el valor de la CL50, CL95 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 17%. Para determinar el efecto de los tratamientos sobre *B. cockerelli*, los datos se transformaron por raíz cuadrada de arcoseno y se realizó un análisis de varianza, bajo un diseño experimental completamente al azar (laboratorio) y bloques completos al azar (invernadero), y comparación de medias de los tratamientos con una prueba de rango múltiple de Tukey ( $P < 0.05$ ). Para ambos se utilizó el paquete estadístico SAS/STAT (SAS Institute, 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las NPS ZnO, TiO<sub>2</sub> y su combinación presentaron acción insecticida significativa ( $P < 0.05$ ) en ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* bajo condiciones de laboratorio e invernadero.

Las NPS ZnO, a las 24 y 48 h después de aplicados los tratamientos, en general no mostraron diferencias entre concentraciones, pero si se observó diferencia con respecto al testigo. Después de 72 y 96 h no se observó diferencias entre las concentraciones de NPs ZnO, con diferencias significativas con el testigo. Las NPs mostraron actividad insecticida alta, particularmente en concentraciones que van desde 500 a 3000 ppm, con una mortalidad superior al 80% y una CL<sub>50</sub> de 14.14 ppm a las 96 horas de evaluación (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Medias de la mortalidad de *B. cockerelli* por NPs ZnO en laboratorio.

Concentración (ppm)	Mortalidad <sup>1</sup>			
	24 h	48 h	72 h	96 h
0	2.16 ± 1.07c	7.29 ± 2.88c	12.04 ± 2.33b	16.86 ± 3.70b
100	18.82 ± 5.33a	38.74 ± 3.80ab	54.91 ± 2.92a	75.04 ± 5.16a
300	16.22 ± 7.68a	45.33 ± 8.75a	58.83 ± 8.37a	79.00 ± 7.24a
500	12.32 ± 7.66ab	41.65 ± 20.76ab	61.68 ± 18.22a	80.48 ± 20.24a
1000	4.86 ± 4.87bc	27.33 ± 4.07b	62.56 ± 10.96a	88.02 ± 13.07a
2000	17.84 ± 6.37a	42.41 ± 3.90ab	64.87 ± 6.24a	87.80 ± 3.54a
3000	17.74 ± 3.33a	40.12 ± 11.22a	64.18 ± 14.04a	88.58 ± 9.97a
GI	6,41	6,41	6,41	6,41
F	14.06	15.21	24.39	21.84
Pr>F	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
CV	23.75	16.78	12.67	14.58
R <sup>2</sup>	0.76	0.77	0.84	0.82
&CL <sub>50</sub> (§LC, 95%)	4.999E-18 (NC)	1.12909E-8 (NC)	160.99 (0.00146- 468.04)	14.14 (0.64269- 47.91883)
&CL <sub>95</sub> (§LC, 95%)	1.439E-46 (NC)	1.1502E-49 (NC)	2780761440 (2051410- 9.57389E61)	22832 (6655- 519178)

<sup>1</sup>Datos para sus análisis transformados 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.

El efecto insecticida de NPs TiO<sub>2</sub> se observó desde las 24 h, con una mortalidad mayor al 90% en las concentraciones altas de 100, 300 y 500 ppm. Después de 48 h de la aplicación de tratamientos, la actividad insecticida presento un aumento significativo en la mortalidad con 80% en la más baja concentración, tendencia observada en todas las evaluaciones y concentraciones, con una mortalidad mínima de 93% en la concentración más baja y de 100% en la concentración más alta con una CL<sub>50</sub> de 11.18 ppm de NPsTiO<sub>2</sub> para el control de ninfas del segundo estadio de *B. cockerelli* (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Medias de la mortalidad de *B. cockerelli* por NPs TiO<sub>2</sub> en laboratorio.

Concentración (ppm)	Mortalidad <sup>1</sup>			
	24 h	48 h	72 h	96 h
Testigo (0)	2.16 ± 1.07c	7.29 ± 2.88c	12.04 ± 2.33d	16.86 ± 3.70b
40	39.02 ± 12.47b	80.65 ± 10.80b	93.91 ± 11.44c	95.36 ± 9.82a
60	41.95 ± 14.71b	80.52 ± 16.31b	92.59 ± 8.89c	94.84 ± 7.71a
80	54.57 ± 6.94b	90.59 ± 4.07b	97.36 ± 3.97abc	98.39 ± 3.34a
100	93.01 ± 2.80a	98.42 ± 1.57a	99.90 ± 0.25ab	100.00 ± 0.00a
300	94.09 ± 5.53a	99.83 ± 0.42a	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a
500	97.78 ± 2.18a	99.70 ± 0.38a	100.00 ± 0.00a	100.00 ± 0.00a
GI	6,41	6,41	6,41	6,41
F	153.97	125.60	119.94	107.12
Pr>F	<.0001***	<.0001***	<.0001***	<.0001***
CV	10.18	8.16	7.39	7.29
R <sup>2</sup>	0.97	0.96	0.96	0.96
&CL <sub>50</sub> (\$LC, 95%)	60.05 (13.97-102.9)	21.99 (0.006-39.13)	12.67 (NC)	11.18 (0.96-21.12)
&CL <sub>95</sub> (\$LC, 95%)	297.51 (148.51-36371)	113.12 (74.34-11845)	66.95 (NC)	58.92 (45.48-78.71)

<sup>1</sup>Datos para sus análisis transformados 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 acción combinada de NPs ZnO-NPs TiO<sub>2</sub> se observó desde las 24 h con diferencias significativas en la mortalidad de *B. cockerelli*, sobresaliendo las concentraciones de 150-150 y 250-250 ppm. De 48-96 h después de la aplicación, la mortalidad aumento significativamente en las diferentes concentraciones, alcanzado un 99% de mortalidad en la concentración más alta

evaluada. Las diferentes concentraciones evaluadas mostraron ser eficientes para el control de ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli*, con una CL<sub>50</sub> de 11.19 ppm de nanopartículas en combinación, después de 96 h post aplicación (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Medias de la mortalidad de *B. cockerelli* por la combinación de NPs ZnO y TiO<sub>2</sub> en laboratorio.

Concentración (ppm)	Mortalidad			
	24 h	48 h	72 h	96 h
Testigo (0)	2.16 ± 1.07c	7.29 ± 2.88d	12.04 ± 2.33e	16.86 ± 3.70c
20-20	6.65 ± 4.77c	35.77 ± 5.86c	74.33 ± 9.23d	85.12 ± 8.58b
30-30	17.95 ± 2.72b	59.63 ± 9.68b	80.45 ± 10.85cd	89.27 ± 5.35b
40-40	28.81 ± 6.55b	78.10 ± 10.33a	95.90 ± 5.01ab	98.40 ± 2.84a
50-50	26.84 ± 5.89b	64.26 ± 6.76b	91.07 ± 2.08bc	97.96 ± 1.16a
150-150	58.59 ± 11.30a	82.12 ± 6.59a	96.16 ± 2.33ab	98.96 ± 1.22a
250-250	45.77 ± 7.33a	82.96 ± 3.05a	98.22 ± 1.41a	99.72 ± 0.69a
GI	6,41	6,41	6,41	6,41
F	61.41	85.19	113.30	124.32
Pr>F	<.0001***	<.0001***	<.0001***	<.0001***
CV	16.07	9.77	7.63	6.88
R <sup>2</sup>	0.92	0.94	0.96	0.96
&CL <sub>50</sub> (§LC, 95%)	361.12 (194.25-2773)	53.62 (0.01-117.17)	13.45 (0.005-32.91)	11.19 (4.91-27.86)
&CL <sub>95</sub> (§LC, 95%)	6810 (1374- 12347253)	1612 (388.01- 1.22498E17)	202.87 (109.63-14964)	91.09 (55.55-8176)

<sup>1</sup>Datos para sus análisis transformados 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.

Bajo condiciones de invernadero se observaron resultados significativos ( $P < 0.05$ ) en la mortalidad de *B. cockerelli* por acción de nanopartículas de óxido de zinc y dióxido de titanio y su combinación; sin embargo, aunque se observa actividad insecticida, estos resultados no fueron lo esperado, dado los resultados observados bajo condiciones de laboratorio. La mortalidad de *B. cockerelli* se considera baja para ambas NPs y su combinación, con mortalidad observada hasta las 48 h en todos los tratamientos.

Las NPs ZnO presentaron un máximo de 5.79% de mortalidad en la concentración más alta a las 48 h, incrementando esta mortalidad en las evaluaciones siguientes con una mortandad a las 96 h de 27.02% en la concentración de 3000 ppm, con una CL<sub>50</sub> de 15862 ppm (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Medias de la mortalidad de *B. cockerelli* por nanopartículas de óxido de zinc en tomate bajo invernadero.

Concentración (ppm)	Mortalidad (%) <sup>1</sup>			
	24 h	48 h	72 h	96 h
Testigo (0)	0.00 ± 0.00a	0.00 ± 0.00a	4.14 ± 1.87b	9.09 ± 6.30b
300	0.00 ± 0.00a	1.39 ± 3.40b	4.63 ± 3.52b	12.00 ± 9.58b
1000	0.00 ± 0.00a	5.11 ± 6.03ab	9.21 ± 4.08ab	17.00 ± 7.83ab
3000	0.00 ± 0.00a	5.79 ± 1.64a	13.40 ± 4.30a	27.02 ± 6.92a
GI	3,23	3,23	3,23	3,23
F	N.C.	6.21	5.98	4.34
R <sup>2</sup>	0.00	0.62	0.57	0.50
Pr> F	N.C. <sup>ns</sup>	0.0059**	0.0068**	0.0217*
&CL <sub>50</sub> (§LC, 95%)	N.C.	203872 (17195- 2.06583E90)	69511 (N.C.-N.C.)	15862 (5894- 150031026)
&CL <sub>95</sub> (§LC, 95%)	N.C.	18147270 (172073- 3.1171E170)	4503170 (N.C.-N.C.)	402640 (36256- 5.01396E15)

<sup>1</sup>Datos para sus análisis transformados 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.

Las NPs TiO<sub>2</sub> analizadas, arrojaron resultados significativos, pero similares a las NPs ZnO bajo esta misma condición, con bajo efecto insecticida en las tres concentraciones experimentadas, observándose a las 48 h, una mortalidad de 11.81% en la concentración más alta, hasta alcanzar en la misma concentración, 32.71% de mortalidad a 96 h de evaluación, con 9.09% de mortalidad en el testigo y una CL<sub>50</sub> de 1657 ppm de NPs TiO<sub>2</sub> (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Medias de la mortalidad de *B. cockerelli* por nanopartículas de dióxido de titanio en tomate bajo invernadero.

Concentración (ppm)	Mortalidad(%) <sup>1</sup>			
	24 h	48 h	72 h	96 h
Testigo (0)	0.00 ± 0.00a	0.00 ± 0.00c	4.14 ± 1.87b	9.09 ± 6.30b
40	0.00 ± 0.00a	1.64 ± 1.92bc	9.04 ± 5.28b	14.49 ± 7.75b
100	0.00 ± 0.00a	6.38 ± 6.29ab	10.02 ± 7.09b	14.76 ± 11.55b
500	0.00 ± 0.00a	11.81 ± 5.25a	22.26 ± 5.60b	32.71 ± 6.00a
GI	3,23	3,23	3,23	3,23
F	N.C.	15.58	13.43	9.27
R <sup>2</sup>	0.00	0.76	0.75	0.69
Pr> F	N.C. <sup>ns</sup>	<.0001***	0.0002***	0.0010**
&CL <sub>50</sub> (\$LC, 95%)	N.C.	19319 (2723- 1187447001)	3776 (1384- 57527)	1657 (887.33849- 5952)
&CL <sub>95</sub> (\$LC, 95%)	N.C.	2479473(48757- 1.77645E16)	138470(16440- 58180024)	31049(7826- 631186)

<sup>1</sup>Datos para sus análisis transformados 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.

En la combinación de NPs se observa la misma tendencia que en la evaluación individual, con una mortalidad baja. El efecto insecticida se observó hasta las 48 h sin diferencias significativas entre concentraciones, con un incremento de 20% más hasta la última evaluación, que en la concentración de 250-250 ppm presento 23.89% de mortandad y una CL50 estimada de 4.313557E10 ppm (Cuadro7).

**Cuadro 7.** Medias de la mortalidad de *B. cockerelli* por la combinación de nanopartículas de óxido de zinc-dióxido de titanio en tomate bajo invernadero.

Concentración (ppm)	Mortalidad(%) <sup>1</sup>			
	24 h	48 h	72 h	96 h
Testigo (0)	0 ± 0.00a	0.00 ± 0.00a	4.14 ± 1.87b	9.09 ± 6.30a
20-20	0 ± 0.00a	0.19 ± 0.47a	4.56 ± 2.92b	9.08 ± 6.02a
50-50	0 ± 0.00a	1.70 ± 2.31a	7.34 ± 5.21ab	18.26 ± 9.53a
250-250	0 ± 0.00a	2.37 ± 2.04a	11.51 ± 6.37a	23.89 ± 15.50a
GI	3,23	3,23	3,23	3,23
F	N.C.	3.50	4.12	3.95
R <sup>2</sup>	0.00	0.50	0.57	0.57
Pr> F	N.C. <sup>ns</sup>	0.0418*	0.0257*	0.0292*
&CL <sub>50</sub> ( <sup>§</sup> LC, 95%)	N.C.	737107 (N.C.-N.C.)	562071 (N.C.- N.C.)	4.313557E10 (N.C.-N.C.)
&CL <sub>95</sub> ( <sup>§</sup> LC, 95%)	N.C.	463035042 (N.C.- N.C.)	452689685 (N.C.-N.C.)	7.99396E19 (N.C.-N.C.)

<sup>1</sup>Datos para sus análisis transformados 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.

Las NPs ZnO y TiO<sub>2</sub> y su combinación presentan actividad insecticida en ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* bajo condiciones de laboratorio e invernadero, aunque significativamente la toxicidad fue superior en laboratorio. Esto probablemente, debido a la interacción planta insecto, el método de aplicación y la concentración, factores a considerar en la evaluación de un nanoinsecticida.

La utilización de NPs en el campo para la protección de plantas para reducir la dependencia de plaguicidas químicos y que respeten el medio ambiente, es una necesidad que va en incremento, particularmente por el tamaño que va de 120-250 nm; rango de tamaño eficientemente soluble en agua en comparación con los pesticidas existentes (Shaker *et al.*, 2017).

En los últimos años, la nanotecnología se ha convertido en una herramienta prometedora para el control de plagas (Wazid *et al.*, 2018). El uso de nanotecnología ha revolucionado la agricultura, y en el control de plagas para

protección de los cultivos, se han estado probando distintas nanopartículas contra diversas plagas, principalmente bajo condiciones de laboratorio.

Las NPs ZnO han atraído atención especial a lo largo del tiempo, debido a su estabilidad y a que no presentan problemas de bioseguridad y recientemente las NPs TiO<sub>2</sub> han venido ganando atención para diferentes aplicaciones, aunque esta última en mayor grado en el área médica (Betancur *et al.*, 2016).

Las NPs ZnO fueron probadas por Mekewi *et al.* (2012) en dieta envenenada, utilizando al gusano de la cera *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera: Pyralidae), reportando su eficacia al segundo día de la aplicación, ocasionando la muerte y anomalías posteriores en el ciclo de vida del insecto en larvas sobrevivientes en bajas concentraciones.

Las NPs Ag y Ag-Zn se registraron como alternativa para el control del pulgón *Aphis nerii* Boyer de Fonscolombe (Hemiptera: Aphididae), con un valor en la CL<sub>50</sub> de 424.67 y 539.46 mg mL<sup>-1</sup> respectivamente (Rouhani *et al.* (2012).

Salem *et al.* (2015), en granos de trigo *Triticum* sp. L. (Poaceae) sobre el escarabajo de la harina *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae), reportaron una mortalidad de 69% con NPs ZnO y 68% con NPs (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en 15 días de evaluación, aunque comparadas con el insecticida malatión, este último con un efecto de control de 98%.

Estos hallazgos fueron corroborados por Keratum *et al.* (2015), al observar que el insecticida pirimifos-metilo es más efectivo que las nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y ZnO para el control de *S. oryzae*, con 100% de mortalidad después de 3 dda, mientras que las nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fueron efectivas a los 15 dda, con 53.35% de mortalidad, en comparación con las nanopartículas de ZnO que tuvieron un efecto moderado con 46.8%, inhibiendo ambas NPs significativamente la progenie.

Contrario a los anteriores, Derbalah *et al.* (2014), encontraron un mayor efecto (100% de mortalidad) de las NPs de zinc sobre el gusano rosado del algodón

*Pectinophora gossypiella* Saunders (Lepidoptera: Gelechiidae), comparado con NPs de sílice y los insecticidas spinosad y pyriproxyfen.

Amal y Hamza (2015), estudiaron la actividad larvica de NPs TiO<sub>2</sub> combinado con el extracto acuoso de *Moringa oleifera* Lam. (Moringaceae) contra el picudo rojo *R. ferrugineus*, encontrando una mortalidad de 100% con esta solución, a una concentración de 75 mg/L a 10 días de evaluación.

Las nanopartículas de cobre (NPs CuO) demostraron su actividad insecticida sobre larvas de *S. littoralis* después de 15 días de evaluación, con una mortalidad de 95 y 75% a una concentración de 1000 mg/l en larvas de segundo y cuarto estadio respectivamente (Shaker et al. 2016).

Shaker *et al.* (2017), demostraron con evaluaciones por ingestión, que la aplicación de NPs TiO<sub>2</sub> son efectivas después de 15 días a 62.5 y 125 ppm para el segundo y cuarto estadio de larvas de *S. littoralis*, afectando además aspectos biológicos como periodo larval, pupación y emergencia de adultos, fecundidad y eclosión de huevos, longevidad de adultos y proporción sexual, además de causar malformaciones en larvas, pupas y adultos.

Mostafa *et al.* (2018) examinaron la eficacia de dos NPs y su combinación sobre larvas del mosquito *Culex quinquefasciatus* Say (Diptera: Culicidae), encontrando que el óxido de zinc, óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de zinc dopado con aluminio (AZO) son eficaces, con tasas de mortalidad de 96, 74 y 86% en la concentración más alta (30 mg l<sup>-1</sup>), confirmando el efecto larvica.

Se sintetizaron NPs verdes de óxido de zinc a partir de hojas de espinaca *Spinacia oleracea* L. (Amaranthaceae) y se comprobó el efecto insecticida sobre escarabajo *Callosobruchus analis* F. (Coleoptera: Chrysomelidae) con 100% de mortalidad a 1500 ppm después de 10 días de tratamiento y se utilizaron como protectores de semilla de garbanzo *Cicer arietinum* L. (Poaceae) por un mes de almacenamiento, con menor oviposición, menor daño a las semillas y menor pérdida de peso de las semillas (Wazid *et al.*, 2018).

Alisha y Thangapandiyan (2019), compararon la eficacia insecticida de NPs Ag con el malatión sobre el gorgojo *T. castaneum*, demostrando que la combinación de NPs Ag con malatión a 150 ppm muestran una alta eficacia de control, repelencia y reducción de la oviposición.

Recientemente, Haroun *et al.* (2020), corroboraron que las NPs ZnO son alternativas para la protección de semillas almacenadas de *Vigna sinensis* L. (Fabaceae) y *Triticum sativum* Lam. (Poaceae) y efectivas para el control de adultos del gorgojo del arroz *S. oryzae* y el gorgojo *Callosobruchus maculatus* F. (Coleoptera: Chrysomelidae) con 88.3 y 100%, además de causar grandes reducciones en la progenie (F1) de estos insectos, mientras que con el escarabajo de la harina *T. castaneum*, mostro una baja mortalidad de 38.3% a la concentración más alta (8 gm · kg<sup>-1</sup>).

Zayed *et al.* (2020), compararon dos NPs, de óxido de sílice (SiO<sub>2</sub>) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con el insecticida malatión para la protección de granos de trigo contra el escarabajo *T. castaneum*. Sus resultados detectaron que el mayor efecto sobre el insecto lo presento el malatión, además de protección del grano. Aunque en menor grado, las NPs también inhibieron la progenie de *T. castaneum*, con mayor efecto las NPs de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que las NPs de SiO<sub>2</sub>, con la conclusión de que las NPs son adecuadas para proteger los granos almacenados como método alternativo a los insecticidas químicos porque son relativamente seguros para los humanos en comparación con el malatión.

Los resultados de la evaluación en invernadero registraron una baja mortalidad, lo que indica que la interacción planta insecto, el método de aplicación y la concentración son factores a considerar en la evaluación de un nanoinsecticida. La máxima mortalidad, a las concentraciones más altas bajo invernadero con dióxido de titanio fueron de 32.71%, con óxido de zinc de 27.02% y su combinación con 23.89%.

Estos resultados fueron distintos a los reportes de Abd El-Wahab *et al.* (2016), en condiciones de semicampo en haba (*Vicia faba* L.) (Fabaceae), quienes reportan mortalidad de 100% con la aplicación foliar de nanosílice hidrofílica y

sílice para controlar *Myzus persicae* Sulzer, *Acyrtosiphon pisum* Harris y *Aphis craccivora* C.L. Koch (Hemiptera: Aphididae), superando al insecticida químico lambda-cyhalotrina que obtuvo 78% en su mortalidad más alta.

La alta eficacia de las nanopartículas, en general se atribuye a su capacidad de destruir la capa cerosa protectora de la cutícula del insecto (actúa como barrera para evitar la pérdida de agua), mediante la absorción de los lípidos, lo que induce la muerte por desecación (Rahman *et al.*, 2009, tomado de Derbalah *et al.*, 2014; Keratum *et al.* 2015). Además de reducción de contenido lipídico, también reducen la cantidad de proteína total, tal como sucede con insecticidas químicos reguladores del crecimiento y botánicos (Derbalah *et al.*, 2014).

En la alimentación de *Bombix mori* L. (Lepidoptera: Bombycidae) con NPs TiO<sub>2</sub> se determinó que estas estimulan la biosíntesis de 20-hidroexiecdisona, que acorta la progresión del desarrollo y reduce la duración de la muda (Li *et al.*, 2014). Por otro lado, Kubo-Irie *et al.* (2015) demostraron que la toxicidad de NPs TiO<sub>2</sub> y NPs ZnO perjudica la espermatogénesis de los insectos.

El modo de acción de las NPs, atribuido a la pérdida de agua por desecación, fortalece el uso de estos materiales (Debnath *et al.*, 2011), debido a que es muy poco probable que los insectos plaga tratados con nanopartículas se seleccionen genéticamente o fisiológicamente y generen resistencia a ese mecanismo de acción (Keratum *et al.*, 2015).

Con la ventaja de bajo riesgo de desarrollar resistencia por insectos a largo plazo y relativamente seguros para los humanos y el medio ambiente en comparación con insecticidas químicos, son una opción viable las nanopartículas como insecticida alternativo (Derbalah *et al.*, 2014; Keratum *et al.*, 2015).

La baja toxicidad en condiciones de invernadero del presente estudio y basado en los resultados de laboratorio, sugieren realizar más pruebas y un aumento en las concentraciones de NPs, o de ser necesario, agregar surfactantes y coadyuvantes, que permitan mejorar su eficiencia, para que al disminuir la tensión superficial en la planta, aumente su capacidad de dispersión,

humectación, adherencia, penetración, deposición de las gotas, mejorar el mojado y persistencia del ingrediente activo, para conseguir una mayor efectividad y de esta manera confirmar si las NPs tienen efecto insecticida sobre *B. cockerelli*.

Las NPs como insecticida son una estrategia novedosa y prometedora que puede ser de gran utilidad para el manejo de plagas, en las cuales los manejos convencionales han dejado de ser efectivos, debida a problemas de resistencia. Sin embargo, se requieren más estudios, evaluar su efecto insecticida con diversas plagas en variedad de cultivos, el tiempo letal de las NPs, su efecto en insectos no blanco y benéficos, el posible riesgo de desarrollo de resistencia de nuevas nano-moléculas, su seguridad en la salud humana y el efecto ambiental que pueda conllevar su uso.

## CONCLUSIONES

Las NPs ZnO y TiO<sub>2</sub>, así como la combinación de éstas, mostraron toxicidad para ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* bajo condiciones de laboratorio, pudiendo ser una alternativa de control muy prometedora para su desarrollo e integración en un manejo de plagas.

Las NPs ZnO y TiO<sub>2</sub>, así como la combinación de éstas bajo condiciones de invernadero, mostraron baja toxicidad para ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli*; no obstante, su actividad insecticida indica su potencial como agentes de control.

Este estudio amplió alternativas para el control de *B. cockerelli*, sin embargo, el potencial de las nanopartículas en la agricultura aún tiene mucho camino por explorar, particularmente para el control de plagas, como alternativa al control químico de *B. cockerelli*.

## REFERENCIAS

- Abouott, W. S. 1925. A method for computing the effectiveness of an insecticide. *Journal Economic Entomology*, 18: 265-267.
- A. S., Abd El-Wahab, H. M., El -Bendary and A. A., E.-H. 2016. Nano Silica as A promising Nano Pesticide to Control Three Different Aphid Species Under Semi-field Conditions in Egypt. *Egypt. Acad. J. Biolog. Sci.*, 10(December), 4–10.
- Akhtar, K. P., Saleem, M. Y., Iqbal, Q., Asghar, M., Hameed, A., & Sarwar, N. 2016. Evaluation of tomato genotypes for late blight resistance using low tunnel assay. In *Source: Journal of Plant Pathology* (Vol. 98, Issue 3).
- Al-Amri, S. M. 2013. Improved growth, productivity and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants through application of shikimic acid. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(4), 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.03.002>
- Ali, M. A., Rehman, I., Iqbal, A., Din, S., Rao, A. Q., Latif, A., Samiullah, T. R., Azam, S., & Husnain, T. 2014. Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. In *Adv. life sci* (Vol. 1, Issue 3).
- Alisha A S and S. Thangapandiyan. 2019. Comparative bioassay of silver nanoparticles and malathion on infestation of red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *The Journal of Basic and Applied Zoology* 80(55): <https://doi.org/10.1186/s41936-019-0124-0>
- Amal M. F. Al-Bartya and Reham Z. Hamza. 2015. Larvicidal, antioxidant activities and perturbation of Transminases activities of Titanium dioxide nanoparticles synthesized using *Moringa oleifera* leaves extract against the red palm weevil (*Rhynchophorus ferrugineus*). *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research*. 2(6): 49–54.
- Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., Benelli, G., Losic, D., Usha Rani, P., & Desneux, N. 2018. Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. *J Pest Sci (2018)* 91:1–15. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0>
- Ávalos Fúnez, A., Haza Duaso, A. I., & Morales Gómez, P. 2016. Nanotecnología en la industria alimentaria I: aplicaciones. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 10(2), 1–17. [https://doi.org/10.5209/rev\\_rccv.2016.v10.n2.53544](https://doi.org/10.5209/rev_rccv.2016.v10.n2.53544)
- Bebber, D. P., & Gurr, S. J. 2015. Crop-destroying fungal and oomycete pathogens challenge food security. *Fungal Genetics and Biology*, 74, 62–64. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2014.10.012>

- 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>
- Betancourt G. R., M. L. Berlanga D., B. Puente U., O. Rodríguez F. and S. Sánchez-Valdes. 2010. Surface modification of ZnO nanoparticles. *Materials Science Forum* 644: 61-64.
- Betancur H. C. P., V. Hernández M. y R. Buitrago S. 2016. Nanopartículas para materiales antibacterianos y aplicaciones del dióxido de titanio. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*. 35(4): 387-402.
- Bravo Mosqueda, E. 2002. Uso reducido de insecticidas y control biológico de plagas del jitomate en Oaxaca. *Agricultura Técnica En México*, 28(2), 137–149.
- Biswal, S. K., A. K. Nayak, U. K. Parida, and P. L. Nayak. 2012. Applications of nanotechnology in agriculture and food sciences. *International Journal of Science Innovations and Discoveries*. 2(1): 21-36.
- Boxi SS, Mukherjee K, Paria S. 2016. Ag doped hollow TiO<sub>2</sub> nanoparticles as an effective green fungicide against *Fusarium solani* and *Venturia inaequalis* phytopathogens. *Nanotechnology* 27:085103. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/8/085103>.
- CABI 2016. *Bactericera cockerelli* (tomato/potato psyllid) (Fecha de revisión: 15 mayo 2020). Disponible en: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/45643>
- Capaldi Arruda, S. C., Diniz Silva, A. L., Moretto Galazzi, R., Antunes Azevedo, R., & Zezzi Arruda, M. A. 2015. Nanoparticles applied to plant science: A review. In *Talanta* (Vol. 131, pp. 693–705). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.08.050>
- Casals, E., Vázquez-Campos, S., Bastús, N. G., & Puentes, V. 2008. Distribution and potential toxicity of engineered inorganic nanoparticles and carbon nanostructures in biological systems. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.06.004>
- Castagna, A., Chiavaro, E., Dall'Asta, C., Rinaldi, M., Galaverna, G., & Ranieri, A. 2013. Effect of postharvest UV-B irradiation on nutraceutical quality and physical properties of tomato fruits. *Food Chemistry*, 137(1–4), 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.095>
- Casteel, C. L., Walling, L. L., & Paine, T. D. 2006. Behavior and biology of the tomato psyllid, *Bactericera cockerelli*, in response to the Mi-1.2 gene. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 121(1), 67–72.

<https://doi.org/10.1111/j.1570-8703.2006.00458.x>

- Chang, Y. N., Zhang, M., Xia, L., Zhang, J., & Xing, G. 2012. The toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles. In *Materials* (Vol. 5, Issue 12, pp. 2850–2871). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma5122850>
- Cerna, C. E., Bautista, O. H., Flores, J. L., Uribe, L. A., & Fuentes, Y. M. O. 2015. Insecticide-Resistance Ratios of Three Populations of *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Psylloidea: Triozidae) in Regions of Northern Mexico. *Florida Entomologist*, 98(3), 950–953. <https://doi.org/10.1653/024.098.0322>
- Das, S., Yadav, A., & 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, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.06.003>
- Debnath N., D. Sumistha, D. Seth, R. Chandra, S. Ch. Bhattacharya and A. Goswami. 2011. Entomotoxic effect of silica nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Pest Science*. 84:(99-105).
- Derbalah A. S., Khidr A. A., Moustafa H. Z. and A. Taman. 2014. Laboratory evaluation of some non-conventional pest control agents against the pink bollworm *Pectinophora gossypiella* (Saunders). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*. 24(2): 363-368.
- El-bendary, H. M., and A. A. El-Helaly. 2013. First record nanotechnology in agricultural: Silica nano-particles a potential new insecticide for pest control. *Applied Science Reports*. 4(3): 241-246.
- El-Helaly AA, El-Bendary HM, Abdel-Wahab AS, E.-S. M., & S, E. 2016. El tratamiento con nanopartículas de sílice del follaje de la calabaza y la supervivencia y desarrollo de larvas de *Spodoptera littoralis* (Bosid.) |. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 4(1), 175–180.
- Esparza Rivera, E. L. 2015. Actividad Antimicrobial de Nanopartículas de Cobre y Óxido de Zinc contra Hongos y Bacterias Fitopatógenas. 64 p.
- Foldbjerg, R., Jiang, X., Miclăuș, T., Chen, C., Autrup, H., & Beer, C. 2015. Silver nanoparticles - Wolves in sheep's clothing? *Toxicology Research*, 4(3), 563–575. <https://doi.org/10.1039/c4tx00110a>
- Fouad, H., Hongjie, L., Hosni, D., Wei, J., Abbas, G., Ga'al, H., & Jianchu, M. 2018. Control de *Aedes albopictus* y *Culex pipiens pallens* mediante nanopartículas de plata sintetizadas a partir de extracto acuoso de pulpa de fruto de *Cassia fistula* y su modo de acción. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 46(3), 558–567.

<https://doi.org/10.1080/21691401.2017.1329739>

- García-López, J., Zavala-García, F., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldívar, R., Díaz Barriga-Castro, E., Ruiz-Torres, N., Ramos-Cortez, E., Vázquez-Alvarado, R., & Niño-Medina, G. 2018. Zinc Oxide Nanoparticles Boosts Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of *Capsicum annum* L. during Germination. *Agronomy*, 8(10), 215. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100215>
- García-Valverde, V., Navarro-González, I., García-Alonso, J., & Periago, M. J. 2013. Antioxidant Bioactive Compounds in Selected Industrial Processing and Fresh Consumption Tomato Cultivars. *Food and Bioprocess Technology*, 6(2), 391–402. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0687-3>
- Garzón, T.J.A. 1984. Enfermedad del "permanente" del jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en Celaya, Gto. XI Congreso Nacional de Fitopatología. San Luis Potosí, SLP. *Resúmenes Sociedad Mexicana de Fitopatología, A.C.* p 138.
- Garzón, T., J., A., Garzón., C., J., A., Velarde., S., F., Marín., J., A., Cárdenas, V., O., G. 2005. Ensayos de transmisión del fitoplasma asociado al "Permanente del tomate" por el psílido *Bactericera cockerelli* Sulc., en México. *Entomología Mex.* (4). México. pp: 672–675.
- Garzón-Tiznado, A, J., Bujanos Muñiz, R., Becerra-Flora, A., & Reyes Moreno, C. 2009. *Asociación de Hemiptera: Triozidae con la enfermedad "permanente del tomate" en México.*
- Gordillo Delgado, F., Zuluaga Acosta, J., & Marín Gallego, B. J. 2019. Inoculación De Nanopartículas De TiO<sub>2</sub>-Ag En Semillas De Espinaca. *Informador Técnico*, 83(1), 90–99. <https://doi.org/10.23850/22565035.1659>
- Handy, R. D., & Shaw, B. J. 2007. Toxic effects of nanoparticles and nanomaterials: Implications for public health, risk assessment and the public perception of nanotechnology. *Health, Risk and Society*, 9(2), 125–144. <https://doi.org/10.1080/13698570701306807>
- Hansen, A. K., Trumble, J. T., Stouthamer, R., & Paine, T. D. 2008. A new huanglongbing species, "Candidatus liberibacter psyllaourous," found to infect tomato and potato, is vectored by the psyllid *Bactericera cockerelli* (Sulc). *Applied and Environmental Microbiology*, 74(18), 5862–5865. <https://doi.org/10.1128/AEM.01268-08>
- Hamza AM. 2012. Efficacy and safety of non-traditional methods as alternatives for control of *Sitophilus oryzae* (L.) Coleoptera: Curculionidae) in rice grains. *Egypt J Biol Pest Control* 22:103–108.

- Huang QZ, Jiao ZJ, Li M, Qiu DF, Liu KC, Shi HZ. 2013. Preparation, characterization, antifungal activity, and mechanism of chitosan/TiO<sub>2</sub> hybrid film against *Bipolaris maydis*. *J Appl Polym Sci* 128:2623–2629. <https://doi.org/10.1002/APP.38322>.
- Haroun, S.A., M. E. Elnaggar, D.M. Zein and R. I. Gad. 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.
- Ilahy, R., Hdider, C., & Tlili, I. 2009. Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Tomato High Lycopene Content Advanced Breeding Lines. *The African Journal of Plant Science and Biotechnology*, 3(1), 1–6.
- IRAC (Insecticide Resistance Action Committee). 2020. IRAC Susceptibility test method 002. from <https://irac-online.org/methods/psylla-spp-all-stages/> (Last access May 16, 2020).
- Jiang, X., Miclăuș, T., Wang, L., Foldbjerg, R., Sutherland, D. S., Autrup, H., Chen, C., & Beer, C. 2015. Fast intracellular dissolution and persistent cellular uptake of silver nanoparticles in CHO-K1 cells: Implication for cytotoxicity. *Nanotoxicology*, 9(2), 181–189. <https://doi.org/10.3109/17435390.2014.907457>
- Kardos, J., Jemnitz, K., Jablonkai, I., Bóta, A., Varga, Z., Visy, J., & Héja, L. 2015. The janus facet of nanomaterials. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/317184>
- Keratum, A. Y., Abo Arab, R. B., Ismail, A. A., & George, M. N. 2015. Impact of nanoparticle Zinc oxide and Aluminum oxide against Rice weevil *Sitophilus Oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) under laboratory conditions. *Egy. J. Plant Pro. Res*, 3(3), 30-38.
- Khot, L. R., Sankaran, S., Maja, J. M., Ehsani, R., & Schuster, E. W. 2012. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. In *Crop Protection* (Vol. 35, pp. 64–70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.01.007>
- Khooshe-Bast, Z., Sahebzadeh, N., Ghaffari-Moghaddam, M., & Mirshekar, A. 2016. Insecticidal effects of zinc oxide nanoparticles and Beauveria bassiana TS11 on Trialeurodes vaporariorum (Westwood, 1856) (Hemiptera: Aleyrodidae). *Acta Agriculturae Slovenica*, 107(2), 299–309. <https://doi.org/10.14720/aas.2016.107.2.04>
- Kubo-Irie, M., Shimoda, M., Sato, A., Shida, K., Yamaguchi, T., Mohri, H., Takeda, K., & Irie, M. 2015. Effect of nanoparticles injected into larvae on spermatogenesis in the pupal testis of the sweet potato hornworm, *Agrius*

- convolvuli* (L.). *Fundamental Toxicological Sciences*, 2(1), 1–8.  
<https://doi.org/10.2131/fts.2.1>
- Li, F., Gu, Z., Wang, B., Xie, Y., Ma, L., Xu, K., Ni, M., Zhang, H., Shen, W., & Li, B. 2014. Effects of the Biosynthesis and Signaling Pathway of Ecdysterone on Silkworm (*Bombyx mori*) Following Exposure to Titanium Dioxide Nanoparticles. *Journal of Chemical Ecology*, 40(8), 913–922.  
<https://doi.org/10.1007/s10886-014-0487-0>
- Liefting, L. W., Sutherland, P. W., 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>
- Liu, D., Trumble, J. T., & Stouthamer, R. 2006. Genetic differentiation between eastern populations and recent introductions of potato psyllid (*Bactericera cockerelli*) into western North America. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 118(3), 177–183. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2006.00383.x>
- Lugo Medina, E., García Gutiérrez, C., David, R., Ayala, R., & Ximhai, R. 2010. *Ra Ximhai Universidad Autónoma Indígena de México NANOTECNOLOGÍA Y NANOENCAPSULACIÓN DE PLAGUICIDAS*. 6, 63–67.
- Mao, B. H., Chen, Z. Y., Wang, Y. J., & Yan, S. J. 2018. Silver nanoparticles have lethal and sublethal adverse effects on development and longevity by inducing ROS-mediated stress responses. *Scientific Reports*, 8(1), 1–16.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-20728-z>
- Mayo-Hernández, J., Flores-Olivas, A., Valenzuela-Soto, J., Rodríguez-Pagaza, Y., Vega-Chávez, J., Hernández-Castillo, F., & Aguirre-Uribe, L. 2018. *Bactericera cockerelli* Sulc Oviposition Preference and Development on Three Tomato Varieties. *Southwestern Entomologist*, 43(4), 905–910.  
<https://doi.org/10.3958/059.043.0408>
- Marín, J. A.; Garzón, T. J. A.; Becerra, F. A.; Mejía, A. C.; Bujanos, M. R.; Byerly, M. K. F., 1995. “Ciclo biológico y morfología del salerillo *Paratrioza cockerelli* (Sulc.) (Homoptera: Psyllidae) vector de la enfermedad permanente del jitomate en el Bajío”. *Catie, Manejo Integrado de Plagas, Revista Técnica* No. 38, 25-32 p.
- Mekewi, M., A. Shebl, A.I. Imam, M.S. Amin, and T. Albert. 2012. Screening the insecticidal efficacy of nano ZnO synthesized via in-situ polymerization of cross linked polycyclic acid as a template. *Journal of Material Science and Technology*. 28(11): 961–968.

- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente Urbina, B. A., Lira-Saldívar, R. H. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de 47 *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, 8(17). pp: 140- 156.
- Milivojević, T., Glavan, G., Božič, J., Sepčić, K., Mesarič, T., & Drobne, D. 2015. Neurotoxic potential of ingested ZnO nanomaterials on bees. *Chemosphere*, 120, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.054>
- Mommaerts, V., Jodko, K., Thomassen, L. C. J., Martens, J. A., Kirsch-Volders, M., & Smagghe, G. 2012. Assessment of side-effects by Ludox TMA silica nanoparticles following a dietary exposure on the bumblebee *Bombus terrestris*. *Nanotoxicology*, 6(5), 554–561. <https://doi.org/10.3109/17435390.2011.590905>
- Mostafa W. A., E. Elsayed, G.W.Beall, S.S.Rashed and E.M. Rashed. 2018. Insecticidal effect of zinc oxide and aluminum oxide nanoparticles synthesized by co-precipitation technique on *Culex quinquefasciatus* Larvae (Diptera: Culicidae). *International Journal of Applied Research*. 4(4): 290-297
- Mukhopadhyay, S. S. 2014. Nanotechnology in agriculture: Prospects and constraints. In *Nanotechnology, Science and Applications* (Vol. 7, Issue 2, pp. 63–71). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/NSA.S39409>
- Munyanenza, 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. *Journal of Economic Entomology*, 100(3), 656–663. <https://doi.org/10.1093/jee/100.3.656>
- Munyanenza, J. E., Sengoda, V. G., Crosslin, J. M., Garzón-Tiznado, J. A., & Cardenas-Valenzuela, O. G. 2009. First report of “*candidatus liberibacter solanacearum*” in tomato plants in México. In *Plant Disease* (Vol. 93, Issue 10, p. 1076). American Phytopathological Society. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-1076a>
- Munyanenza, Joseph 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>
- Nair, P. M. G., & Choi, J. 2012. Modulation in the mRNA expression of ecdysone receptor gene in aquatic midge, *Chironomus riparius* upon exposure to nonylphenol and silver nanoparticles. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 33(1), 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2011.09.006>
- Nair, P. M. G., Park, S. Y., & Choi, J. 2013. Evaluation of the effect of silver nanoparticles and silver ions using stress responsive gene expression in

- Chironomus riparius. *Chemosphere*, 92(5), 592–599.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.060>
- Patel, N., Desai, P. D., Patel, N. N., Jha, A., & Gautam, H. K. 2002. *Agronanotechnology for Plant Fungal Disease Management: A Review*.
- Pathak, T. B., & Stoddard, C. S. 2018. Climate change effects on the processing tomato growing season in California using growing degree day model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2), 765–775.  
<https://doi.org/10.1007/s40808-018-0460-y>
- Peng, C., Duan, D., Xu, C., Chen, Y., Sun, L., Zhang, H., Yuan, X., Zheng, L., Yang, Y., Yang, J., Zhen, X., Chen, Y., & Shi, J. 2015. Translocation and biotransformation of CuO nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Environmental Pollution*, 197, 99–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.008>
- Ragaei, M., & Hassan Sabry, A. 2014. NANOTECHNOLOGY FOR INSECT PEST CONTROL. In *International Journal of Science* (Vol. 3, Issue 2).
- Rai, M., Kon, K., Ingle, A., Duran, N., Galdiero, S., & Galdiero, M. 2014. Broad-spectrum bioactivities of silver nanoparticles: The emerging trends and future prospects. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 98, Issue 5, pp. 1951–1961). Appl Microbiol Biotechnol. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5473-x>
- Ram, P., Vivek, K., & Kumar, S. P. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: Present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*, 13(6), 705–713. <https://doi.org/10.5897/ajbx2013.13554>
- Raiola, A., Rigano, M. M., Calafiore, R., Frusciante, L., & Barone, A. 2014. Enhancing the health-promoting effects of tomato fruit for biofortified food. In *Mediators of Inflammation* (Vol. 2014). Hindawi Publishing Corporation. <https://doi.org/10.1155/2014/139873>
- Rezaei, M A, H. A. 2014. Foliar application of nano-chelate and non-nanochelate of zinc on plant resistance physiological processes in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Iranian Journal of Plant Physiology*, Vol (4), No (4), 1137–1144.
- Rico, C. M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. 2015. Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. In *Nanotechnology and Plant Sciences: Nanoparticles and Their Impact on Plants* (pp. 1–17). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0_1)
- Rouhani, M., M. A. Samih and S. Kalantari. 2012. Insecticide effect of silver and

- zinc nanoparticles against *Aphis nerii* Boyer de Fonscolombe (Hemiptera: Aphididae). *Chilean Journal of Agricultural Research*. 72(4): 590-954.
- Sabir, S., Arshad, M., & Chaudhari, S. K. 2014. Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and applications. In *Scientific World Journal* (Vol. 2014). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2014/925494>
- Sabry, A. H., & Ragaei, M. 2018. *Nanotechnology and Their Applications in Insect's Pest Control* (pp. 1–28). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91161-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91161-8_1)
- Saharan, V., Kumaraswamy, R. V., Choudhary, R. C., Kumari, S., Pal, A., Raliya, R., & Biswas, P. 2016. Cu-Chitosan Nanoparticle Mediated Sustainable Approach to Enhance Seedling Growth in Maize by Mobilizing Reserved Food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(31), 6148–6155. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02239>
- Salem A.A., Amal M. H. and N. M. El-Taweelah. 2015. Aluminum and zinc oxides nanoparticles as a new methods for controlling the red flour beetles, *Tribolium castaneum* (Herbest) compared to malathion insecticide. *Journal of Plant Protection and Pathology*. 6 (1): 129-137.
- Statistical Analysis System (SAS) Institute. 2002. SAS user's guide. Statistics. Version 9. SAS Inst., Cary, NC. USA. Quality, and elemental removal. *J. Environ. Qual.* 19:749-756.
- Shaker A.M., A.H. Zaki, Elham. F. Abdel-Rahim and M.H. Khedr. 2016. Novel CuO nanoparticles for pest management and pesticides photodegradation. *Advances in Environmental Biology*. 10(12): 274-283.
- Shaker, A. M., Zaki, A. H., Abdel-Rahim, E. F. M., & Khedr, M. H. 2017. TiO<sub>2</sub> nanoparticles as an effective nanopesticide for cotton leaf worm. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. (61):61-68.
- Secor, G. A., Rivera, V., Rengifo, J., De Boer, S. H., Lee, I. M. y Gudmestad, N. C. 2008. Zebra Chip: A new Disease of Potato. *Am. J. Pot. Res.* 85:1-59.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2020. <http://www.siap.gob.mx>. Anuario Estadístico de la Producción agrícola.
- Scott, N., & Chen, H. 2013. Nanoscale science and engineering for agriculture and food systems. In *Industrial Biotechnology* (Vol. 9, Issue 1, pp. 17–18). <https://doi.org/10.1089/ind.2013.1555>
- Shilpa, R., & Lawre, S. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology Applied Sciences*. 3(2):467-473.

- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., & Mohammad, F. 2015. Nanotechnology and plant sciences: Nanoparticles and their impact on plants. In *Nanotechnology and Plant Sciences: Nanoparticles and Their Impact on Plants*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0>
- Singh Sekhon, B. 2014. Nanotechnology in agri-food production: An overview. In *Nanotechnology, Science and Applications* (Vol. 7, Issue 2, pp. 31–53). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/NSA.S39406>
- Soriano Melgar, L., Esmeralda, M.-M., & Peralta, R. 2018. Zinc oxide and zinc oxide/graphene nanoparticles used in vase solutions on lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) postharvest life Nanostructured photocatalytic compounds of graphene and bismuth obtained by green chemistry View project Adsorption of Pharmaceuticals from Water View project. <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i8.1109>
- Stadler, T., López García, G. P., Gitto, J. G., & Buteler, M. 2017. Nanostructured alumina: biocidal properties and mechanism of action of a novel insecticide powder. *Bulletin of Insectology*, 70(1), 17–25.
- Vega-Gutiérrez, M. T., Concepción Rodríguez-Maciel, J., Díaz-Gómez, O., Bujanos-Muñiz, R., Mota-Sánchez, D., Luis Martínez-Carrillo, J., Lagunes-Tejeda, Á., & Garzón-Tiznado, J. A. 2008. Aprobado: Febrero. In *Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia* (Vol. 42).
- Villegas-Rodríguez, F., Marín-Sánchez, J., Delgado-Sánchez, P., Torres-Castillo, J. A., & Alvarado-Gómez, O. G. 2014. Management of *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae) in Greenhouses with Entomopathogenic Fungi (Hypocreales). *Southwestern Entomologist*, 39(3), 613. <https://doi.org/10.3958/059.039.0320>
- Wazid, S. Nadagouda, A. Prabhuraj, R. H. Naik, N.M. Shakuntala and H. Sharanagouda. 2018. Effect of Biosynthesized Zinc Oxide Green Nanoparticles on Pulse Beetle, *Callosobruchus analis* (Coleoptera: Chrysomelidae). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 7(9): 503-512.
- Wang, S., Liu, H., Zhang, Y., & Xin, H. 2015. The effect of CuO NPs on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(3), 554–561. <https://doi.org/10.1002/etc.2826>
- Xue, J., Luo, Z., Li, P., Ding, Y., Cui, Y., & Wu, Q. 2014. A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles. *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep05408>
- Yadollahi, A., Arzani, K., & Khoshghalb, H. 2010. The role of nanotechnology in

horticultural crops postharvest management. *Acta Horticulturae*, 875, 49–56. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.875.4>

Yang, F., Liu, C., Gao, F., Su, M., Wu, X., Zheng, L., Hong, F., & Yang, P. 2007. The improvement of spinach growth by nano-anatase TiO<sub>2</sub> treatment is related to nitrogen photoreduction. *Biological Trace Element Research*, 119(1), 77–88. <https://doi.org/10.1007/s12011-007-0046-4>

Záyago-Lau, E., & Foladori, G. 2010. La nanotecnología en México: un desarrollo incierto Nanotechnology in Mexico: an uncertain development. In *Economía, Sociedad y Territorio* (Vol. 32).

Zayed G.M.M., Soliman M. EL-Sagheer and Hussain H.B.H. 2020. Aluminum and silica oxides nanoparticles as a new approach for control the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) on wheat grains. *Egypt. J. Plant Prot. Res. Inst.* 3(1): 281-289

Ze, Y., Liu, C., Wang, L., Hong, M., & Hong, F. 2011. The regulation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the expression of light-harvesting complex II and photosynthesis of chloroplasts of *Arabidopsis thaliana*. *Biological Trace Element Research*, 143(2), 1131–1141. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8901-0>