

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



USO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC DE DOBLE MORFOLOGÍA  
SOBRE *Bactericera cockerelli* Y *Candidatus Liberibacter solanacearum* EN  
TOMATE BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

Tesis

Que presenta FERNANDO BAÑOS ROJAS

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA

Saltillo, Coahuila

Diciembre, 2025

USO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC DE DOBLE MORFOLOGÍA  
SOBRE *Bactericera cockerelli* Y *Candidatus Liberibacter solanacearum* EN  
TOMATE BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

Tesis

Elaborada por Fernando Baños Rojas 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



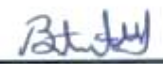
---

Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe  
Asesor



---

Dra. Susana González Morales  
Asesor



---

Dra. Rebeca Betancourt Galindo  
Asesor



---

Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Diciembre, 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme sus puertas y brindarme el espacio para desarrollarme como persona y profesionalista en el campo de la Parasitología Agrícola. Mi gratitud especial al Comité de Asesoría, cuyas orientaciones y sugerencias resultaron fundamentales durante la elaboración de este proyecto.

A mis padres, por su amor incondicional, por creer en mí y darme fuerzas para concluir esta meta; a ustedes dedico este logro, que es tan suyo como mío.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) de México, que otorgo una beca para estudiantes de posgrado al primer autor y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, a través de la Dirección de Investigación por el apoyo con el financiamiento al proyecto no. 38111-425101001-453, “Uso de nanopartículas de óxido de zinc de dos morfologías sobre *Bactericera cockerelli* y *Candidatus Liberibacter solanacearum* en tomate bajo condiciones controladas”.

Deseo expresar mi gratitud al Dr. Agustín Hernández Juárez por su guía experta y paciencia, así como a quienes integraron el comité, por sus observaciones críticas y su apoyo durante las diferentes etapas de la investigación. Gracias por compartir su conocimiento y por alentarme a superar los retos científicos y personales que este proyecto implicó.

De igual modo, agradezco a mis compañeras y compañeros de posgrado, quienes con su camaradería y consejos hicieron más ligero el camino académico. Finalmente, reconozco el valor de quienes, directa o indirectamente, aportaron a este trabajo: amistades, docentes y todas las personas que acompañaron mi formación. Este proyecto es reflejo del esfuerzo y de la colaboración colectiva. Gracias a todas y todos por ser parte de este trayecto.

## **DEDICATORIA**

Con profundo cariño y gratitud, dedico este trabajo a mis padres, quienes han sido mi ejemplo de fortaleza y entrega. A mi hermano y hermanas, por su complicidad, ánimo y por recordarme siempre la importancia de la unión familiar. A mis amistades, por su comprensión, compañía y consejos, que han hecho de este camino una experiencia enriquecedora y llena de aprendizajes compartidos. Y especialmente, a mi novia, por su paciencia, ternura y fe constante en mis capacidades. Gracias por compartir conmigo la ilusión y el compromiso de alcanzar nuevas metas.

*“Difficult roads often lead  
to beautiful destinations”*

*Carlos Valverde*

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Hipótesis .....	5
Justificación.....	5
REVISIÓN DE LITERATURA .....	6
El tomate <i>Solanum lycopersicum</i> L. ....	6
MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
Ubicación del experimento .....	17
Cría de insectos y material vegetativo.....	17
Síntesis de Nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) con morfología semiesférica y hexagonal.....	17
Caracterización de Nanopartículas de ZnO.....	18
Evaluación del efecto de nanopartículas de óxido de zinc (semiesféricas y hexagonales) sobre <i>Bactericera cockerelli</i> bajo condiciones de laboratorio. .	18
Evaluación del efeto de nanopartículas de óxido de zinc (semiesféricas y hexagonales) sobre <i>Bactericera cockerelli</i> bajo condiciones de invernadero	19
Análisis de datos in vivo .....	20
Cambios fenotípicos y análisis de la severidad de la enfermedad permanente del tomate.....	20
RESULTADOS .....	22
Caracterización de las NPs-ZnO .....	22
Mortalidad de huevo y ninfas de tercer instar de <i>B. cockerelli</i> en laboratorio.	23
Mortalidad de ninfas de segundo estadio de <i>B. cockerelli</i> , en invernadero....	26

Severidad del nivel de la expresión de la enfermedad con aplicaciones de NPs- ZnO en plantas de tomate .....	27
CONCLUSIÓN .....	35
REFERENCIAS .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mortalidad y concentraciones letales de NPs-ZnO con dos morfologías en huevos de <i>B. cockerelli</i> bajo condiciones de laboratorio. ....	24
Tabla 2. Mortalidad y concentración letal de NPs-ZnO de dos morfologías en ninfas de tercer instar de <i>B. cockerelli</i> bajo condiciones de laboratorio. ....	25

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modo de acción de las nanopartículas sobre insectos.....	16
Figura 2. Escala de severidad de acuerdo con la sintomatología expresada por la infección de CLs .....	21
Figura 3. Micrografía TEM de NPs-ZnO que muestra la forma esférica (a) y (b) hexagonal y tamaño de las NPs-ZnO. ....	22
Figura 4. Difractograma de rayos X de nanopartículas de ZnO. a) NPs-ZnO hexagonal, b) NPs-ZnO esférica.....	23
Figura 5. Mortalidad de ninfas de segundo estadio de <i>B. cockerelli</i> por aplicación en dos vías de NPs-ZnO de morfología semiesférica en tomate bajo invernadero. ....	26
Figura 6. Mortalidad de ninfas de segundo estadio de <i>B. cockerelli</i> por aplicación en dos vías de NPs-ZnO de morfología hexagonal en tomate bajo invernadero. ....	27
Figura 7. Severidad del nivel de expresión de la enfermedad permanente del tomate por aplicaciones de NPs-ZnO semiesféricas en tomate bajo invernadero. ....	28
Figura 8. Severidad del nivel de expresión de la enfermedad permanente del tomate por aplicaciones de NPs-ZnO hexagonales en tomate bajo invernadero. ....	28
Figura 9. Daño ocasionado por aplicación de NPs-ZnO de morfología semiesférica y hexagonal en huevo y ninfas de <i>B. cockerelli</i> en plantas tomate .....	32

RESUMEN

USO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC DE DOBLE MORFOLOGÍA  
SOBRE *Bactericera cockerelli* Y *Candidatus Liberibacter solanacearum* EN  
TOMATE BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

Por

FERNANDO BAÑOS ROJAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ JUÁREZ – ASESOR

Saltillo, Coahuila

Diciembre, 2025

El tomate es de las hortalizas de mayor consumo en el mundo. *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) causa daños directos e indirectos a esta hortaliza, siendo vector de *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CLs), agente causal de la enfermedad permanente del tomate (PT) en tomate y zebra chip (ZC) en papa. Ocasionando pérdidas que oscilan entre 45 y 100% del cultivo, equivalente a US \$25 millones de dólares anuales. Los nanoinsecticidas han surgido en los últimos años como una alternativa al control químico sobre plagas agrícolas. En esta investigación se evaluó la actividad insecticida de nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) de morfología semiesférica y hexagonal sobre *B. cockerelli* y su efecto en la incidencia del permanente del tomate bajo condiciones controladas en el cultivo de tomate. La investigación en laboratorio se realizó mediante la técnica de inmersión de foliolo infestado en ocho concentraciones incluyendo el testigo, para huevo durante 5 días y ninfas de tercer estadio durante 4 días. En invernadero fueron cuatro tratamientos incluyendo el testigo mediante dos vías de aplicación (drench y foliar) con un volumen de aplicación de 25 mL de NPs-ZnO a plantas infestadas con ninfas de segundo estadio, registrando la mortalidad cada 24 horas por cinco días, bajo un diseño completamente al azar y en bloques al azar para el laboratorio e invernadero respectivamente. Los resultados de laboratorio mostraron que las NPs-ZnO ocasionaron mortalidad en huevos de 72.10% (semiesféricas) y 73.19% (hexagonal), mientras que en ninfas la mortalidad alcanzó 81.37% (semiesféricas) y 80.42% (hexagonal). En invernadero, ambas morfologías fueron tóxicas para las ninfas, siendo la vía foliar la de mayor efectividad, con 79.67% de mortalidad para las NPs semiesféricas y 78.95% para las hexagonales. Además, en huevos y ninfas se observaron alteraciones fisiológicas y morfológicas, como apoptosis, constricción de la región abdominal, deshidratación y malformaciones en los estadios segundo y tercero. Por último, se evaluó la severidad de la enfermedad en las plantas tratadas con NPs-ZnO, observándose que las de morfología hexagonal presentaron la mayor reducción (26.07%), en comparación con las semiesféricas (30.76%), ambas aplicadas por vía foliar a una concentración de 6000 ppm. Estos resultados sugieren que las

NPs-ZnO de morfología hexagonal podrían ser ligeramente más prometedora para el control de la enfermedad y su vector. Siendo un avance muy prometedor para su desarrollo e implementación a pruebas de campo e implementación en un manejo integrado de plagas que, en comparación con los insecticidas convencionales, las NPs son relativamente más seguras para los humanos y el medio ambiente.

**Palabras clave:** *Bactericera cockerelli*, nanopartículas de zinc, nanoinsecticida, control de plagas, tomate, zebra chip.

ABSTRACT

USE OF DUAL MORPHOLOGY ZINC OXIDE NANOPARTICLES AGAINST  
*Bactericera cockerelli* AND *Candidatus Liberibacter solanacearum* IN TOMATO  
UNDER CONTROLLED CONDITIONS

By

FERNANDO BAÑOS ROJAS

MÁSTER OF SCIENCE IN AGRICULTURAL PARASITOLOGY  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ JUÁREZ – ADVISOR

Saltillo, Coahuila

December, 2025

Tomato is one of the most widely consumed vegetables worldwide. *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) causes direct and indirect damage to this crop and serves as the vector of *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CLs), the causal agent of permanent tomato disease (PT) in tomato and zebra chip (ZC) in potato. This insect can cause losses ranging from 45 to 100% of the crop, equivalent to approximately US \$25 million annually. Nano-insecticides have emerged in recent years as an alternative to chemical control for agricultural pests. In this study, we evaluated the insecticidal activity of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) with semi-spherical and hexagonal morphologies on *B. cockerelli* and their effect on the incidence of permanent tomato disease under controlled conditions in tomato cultivation. The laboratory trials were conducted using the leaflet immersion technique on infested leaflets at eight concentrations, including control, assessing egg mortality over 5 days and third-instar nymph mortality over 4 days. In the greenhouse, four treatments including the control were applied through two application methods (drench and foliar), using 25 mL of ZnO-NPs per plant infested with second-instar nymphs. Mortality was recorded every 24 hours for five days, using a completely randomized design for laboratory tests and a randomized block design for greenhouse tests. Laboratory results showed egg mortality of 72.10% (semi-spherical) and 73.19% (hexagonal) ZnO-NPs, while nymph mortality reached 81.37% (semi-spherical) and 80.42% (hexagonal). In the greenhouse, both morphologies were toxic to nymphs, with foliar application being the most effective, resulting in 79.67% mortality for semi-spherical NPs and 78.95% for hexagonal NPs. Additionally, physiological and morphological alterations were observed in eggs and nymphs, including apoptosis, abdominal region constriction, dehydration, and malformations in second- and third-instar nymphs. Finally, disease severity was evaluated in plants treated with ZnO-NPs. Hexagonal nanoparticles showed the greatest reduction in severity (26.07%) compared with the semi-spherical ones (30.76%), both applied foliarly at a concentration of 6000 ppm. These results suggest that hexagonal ZnO-NPs may be slightly more promising for controlling the disease and its vector. This represents a highly promising advance for their development and implementation in field trials and integrated pest management

programs, as ZnO-NPs are relatively safer for humans and the environment compared with conventional insecticides.

**Keywords:** *Bactericera cockerelli*, zinc oxide nanoparticles, nanoinsecticide, pest control, tomato, zebra chip

## INTRODUCCIÓN

El tomate es una de las hortalizas de mayor consumo en el mundo (Al-Amri 2013), siendo una fuente importante de minerales como el potasio y el magnesio (Pathak y Stoddard, 2018), vitaminas, proteínas, fibra y una de las principales fuentes de licopeno, que tiene propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Castagna *et al.*, 2013). México es de los principales productores del cultivo de tomate, con una producción de 3,324,263.09 Ton., con un valor de \$31,503,817.27 (MXN), teniendo una participación de 25% en el mercado de las exportaciones mundiales, siendo el segundo lugar en cuanto a productos agrícolas con mayor exportación (SIAP, 2023).

El psílido del tomate o paratrioza *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae), es de alta importancia económica porque destruye los cultivos hortícolas al causar alteraciones. Este insecto plaga se encuentra distribuido en diversas regiones del continente americano (EU, México, Centro y Sudamérica) (Munyanza, 2013). En México, el psílido está muy extendido a lo largo del país, con excepción en los estados de Chiapas, Yucatán y Quintana Roo (Vega-Gutiérrez *et al.*, 2008; Cerna-Chávez *et al.*, 2021).

Este insecto causa daños directos al alimentarse de la savia de las plantas e indirectos al inocular con su saliva patógenos como *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CLs); bacteria Gramnegativa, parásito obligado del floema, no cultivable *in vitro* (Delgado-Ortiz *et al.*, 2020). Esta patógeno causa la enfermedad conocida como Punta Morada de la Papa (PMP) o Zebra Chip (ZC) en el cultivo de papa *Solanum tuberosum* L. (Solanaceae) y Permanente del Tomate (PT) en tomate *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae).

Actualmente el PT es considerado la enfermedad más importante del tomate en México, con reportes de más de 30, 000 hectáreas afectadas, lo que equivale al 45% del área establecida anualmente con este cultivo a nivel nacional y con pérdidas de aproximadamente 25 millones de dólares anualmente (Garzón-Tiznado *et al.*, 2009; Wen *et al.*, 2009; Bujanos y Ramos 2015; Jirón-Rojas *et al.*, 2016; Roque-Enriquez *et al.*, 2021).

Los síntomas del permanente del tomate se caracterizan por un enrollamiento de las hojas inferiores en forma de taco, estas son quebradizas, los folíolos apicales presentan clorosis con los márgenes de color morado y las flores son abortadas; síntomas observados tanto para los haplotipos A y B de este patógeno (Bujanos *et al.*, 2007; Liefting *et al.*, 2009; French-Monar *et al.*, 2010). Melgoza-Villagómez *et al.* (2018) menciona que la presencia de CLs en huevecillos del psílido del tomate sugiere que la transmisión de la bacteria es transovárica.

Para controlar CLs y evitar su diseminación, es fundamental manejar adecuadamente a su vector, *B. cockerelli*. El método más utilizado consiste en la aplicación de agroquímicos, llegando a efectuarse más de 30 aplicaciones de insecticidas por ciclo de cultivo (Rubio *et al.*, 2006; Almeyda *et al.*, 2008; Vega-Gutiérrez *et al.*, 2008). Sin embargo, esta estrategia resulta muy costosa y, además, la plaga tiene una alta capacidad para desarrollar resistencia (Hernández, 2019). Debido al alto costo del control químico y a los daños que ocasiona al ambiente y a la salud humana, es necesario implementar una estrategia de manejo integrado de plagas (Garzón-Tiznado *et al.*, 2005). Para ello, se recurre a estrategias como el control etológico (Espinoza, 2020), y control cultural, que incluye la programación de siembras y la eliminación de focos de infección (Villanueva-Segura, 2015; Cuesta *et al.*, 2018). Además, se emplea el control legal como medida de protección, dado que *B. cockerelli* y *Candidatus Liberibacter solanacearum* están catalogadas como plagas cuarentenarias (SAGARPA 2002).

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). La nanotecnología proporciona productos con propiedades fisicoquímicas únicas y abre amplias oportunidades para desarrollar soluciones y aplicaciones innovadoras en la agricultura, ganadería, tratamiento de aguas y en la producción, conservación y envasado de alimentos. Para esto, se han implementado diversos nanomateriales, que abarcan desde metales y óxidos metálicos inorgánicos hasta nanomateriales orgánicos que transportan ingredientes bioactivos (Ávalos *et al.*, 2016). En este

contexto, los nanoinsecticidas representan una de las aplicaciones más prometedoras, utilizados como productos fitosanitarios para el control de insectos plaga y permiten reducir el número de aplicaciones en campo gracias a su mayor eficacia (Sabry y Ragaei, 2018).

Diversos estudios han demostrado el potencial de los nanoinsecticidas en el control de plagas agrícolas. Por ejemplo, Hua *et al.*, (2015) compararon los efectos de nanopartículas de carbonato de calcio con carbonato de calcio coloidal en plantas de naranjo *Citrus tankan* Hayata (Rutaceae) para el control de *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) y *Aonidiella aurantii* (Maskell) (Hemiptera: Diaspididae). Sus resultados mostraron que el nano-calcio fue más efectivo, logrando un mejor control a 6530 mg/L, mientras que el calcio coloidal requirió concentraciones mayores (9330 mg/L) para obtener efectos similares.

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.

Abdel-Gawad (2018) sintetizó nanopartículas de óxido de zinc utilizando extractos de hojas de *Moringa oleifera* Lam. (Moringaceae) para el control de *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae). Las nanopartículas mostraron un fuerte efecto larvicida, con valores de CL<sub>50</sub> de 6.41 mg/mL para larvas y 17.10 mg/mL para pupas. Además, las larvas tratadas con la CL<sub>50</sub> redujeron significativamente la eclosión de huevos y la fecundidad de las hembras, así como la actividad de enzimas clave como esterasas, acetilcolinesterasa, glutatión S-transferasa y el contenido de proteínas.

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 *Sitophilus 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 *Oryza 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.

Gutiérrez *et al.* (2021) evaluaron el efecto de nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) y dióxido de titanio (NPs-TiO<sub>2</sub>) sobre ninfas de *B. cockerelli* en tomate, tanto en laboratorio como en invernadero. En condiciones de laboratorio, las NPs-ZnO provocaron una mortalidad del 88.58% a 3000 ppm a las 96 horas, mientras que las NPs-TiO<sub>2</sub> alcanzaron el 100% de mortalidad desde concentraciones de 100 ppm. En invernadero, la mortalidad fue menor: 27.02% con NPs-ZnO a 3000 ppm y 32.71% con NPs-TiO<sub>2</sub> a 500 ppm.

Ruiz-Aguilar *et al.* (2025) evaluaron la eficacia insecticida de ZnO-NPs con morfología semiesférica (60.82 nanómetros, nm) y SiO<sub>2</sub>-NPs esféricas (45.73 nm) sobre larvas de segundo estadio del gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) en condiciones de laboratorio, utilizando dieta artificial envenenada. A una concentración de 3000 ppm, ambos tipos de nanopartículas provocaron una mortalidad del 100% tras siete días de exposición, con daños evidentes en las larvas, incluyendo reducción de la longitud corporal, alteraciones morfológicas en las regiones dorsal y ventral, presencia de manchas rosadas y oscuras, malformaciones generalizadas, necrosis tisular y larvas momificadas.

### **Objetivo general**

- ❖ Evaluar la actividad insecticida de nanopartículas de óxido de zinc con dos morfologías sobre *Bactericera cockerelli*, así como su efecto en la enfermedad permanente del tomate, bajo condiciones controladas en el cultivo de tomate.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar la actividad insecticida de nanopartículas de óxido de zinc con morfología semiesférica sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de laboratorio e invernadero en el cultivo de tomate.
- Evaluar la actividad insecticida de nanopartículas de óxido de zinc de morfología hexagonal sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de laboratorio e invernadero en el cultivo de tomate.
- Determinar la incidencia y severidad de la enfermedad permanente del tomate en plantas tratadas con nanopartículas de óxido de zinc de dos morfologías bajo condiciones de invernadero.

### **Hipótesis**

Las nanopartículas de óxido de zinc con morfología semiesférica y hexagonal presentarán una eficacia insecticida significativa, tanto in vitro como in vivo, logrando al menos un 90% de control de *Bactericera cockerelli*. Asimismo, se espera que reduzcan la incidencia y severidad de la enfermedad permanente del tomate y contribuyan al mejor desarrollo del cultivo.

### **Justificación**

En el manejo de plagas agrícolas, se estima que cada año se aplican aproximadamente 2.5 millones de toneladas de plaguicidas químicos, y esta cifra continúa en aumento. El uso intensivo de estos compuestos genera efectos negativos significativos sobre el medio ambiente, debido a su persistencia, la contaminación de mantos acuíferos y los riesgos asociados para la salud humana. Ante esta problemática, resulta indispensable desarrollar y evaluar alternativas de control de plagas que sean más sostenibles, seguras y ambientalmente amigables.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **El tomate *Solanum lycopersicum* L.**

El cultivo del tomate *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae) es una de las hortalizas de mayor consumo en todo el mundo (Al-Amri, 2013), sus frutos (tomates) 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), vitaminas, proteínas, fibra y una de las principales fuentes de licopeno, que tiene propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Castagna *et al.*, 2013). El fruto del tomate representa un alimento ideal que cumple con los requerimientos nutricionales básicos, reconocido como una de las fuentes más importantes de carotenoides, especialmente licopeno,  $\beta$ - caroteno y luteína, así como de otros valiosos fitoquímicos como tocoferoles, ácido ascórbico y polifenoles (Castagna *et al.*, 2013; Raiola *et al.*, 2014).

México es de los principales productores del cultivo de tomate, con una producción de 3,324,263.09 Ton., con un valor de \$ 31,503,817.27 (MXN), teniendo una participación del 25% en el mercado de las exportaciones mundiales, siendo el segundo lugar en cuanto a productos agrícolas con mayor exportación (SIAP, 2023).

### ***Bactericera cockerelli***

El psílido del tomate, *B. cockerelli*, también conocido como psílido de la papa, pulgón saltador, salerillo o paratrioza, es un insecto plaga en diferentes regiones del continente americano (EU, México, Centro y Sudamérica), de alta importancia económica por que destruye los cultivos hortícolas al causar alteraciones fisiológicas, así como enfermedades fitoplásmicas y bacterianas (Munyanza, 2013).

En México, el psílido está muy extendido a lo largo del país, excepto en los estados de Chiapas, Yucatán y Quintana Roo (Vega-Gutiérrez *et al.*, 2008; Cerna-Chávez *et al.*, 2021). Esta plaga provoca dos tipos de daños, directo e indirecto, tanto por ninfas como por adultos. El daño directo sucede cuando el estilete es insertado y succiona la savia de la planta e inocula la toxina que dañan células encargadas en la producción de clorofila, tornando la planta un color amarillento y raquíptico causando la enfermedad conocida como “amarillamiento del psílido” alcanzando pérdidas del 80% del cultivo (Liu y Trumble, 2006).

A través del mismo mecanismo de transmisión, la paratrioza causa daños indirectos al alimentarse de la planta e inocula con su saliva fitoplasmas u organismos tipo bacterias *Candidatus Liberibacter solanacearum* (CLs) causando la enfermedad conocida como: Zebra Chip (ZC) y Permanente del Tomate (PT); en la actualidad el PT es considerada la enfermedad más importante del tomate en México, en el cual existen reportes de más de 30, 000 hectáreas afectadas, lo que es un equivalente al 45% del área establecida anualmente con este cultivo a nivel nacional (Garzón-Tiznado *et al.*, 2009; Jirón-Rojas *et al.*, 2016). Por su parte, Melgoza-Villagómez *et al.* (2018) menciona que la presencia de CLs en huevos del psílido sugiere que la transmisión de la bacteria es transovárica.

### **Biología y hábitos**

Los huevos se pueden encontrar adheridos en cualquier parte de la planta (envés de la hoja, borde de la hoja, borde del tallo y si la incidencia es muy alta, también se pueden encontrar en las flores), esto por un corto pedicelo del cual se adhieren, que mide aproximadamente 0.5 mm de longitud, los huevos de la paratrioza son ovipositados de manera separada (Vega-Gutiérrez *et al.*, 2008; SENASICA, 2009; Pérez *et al.*, 2021). Las ninfas de *B. cockerelli* toman una posición normalmente debajo de las hojas en plantas con follaje denso, algunas cuantas pueden ser localizadas en el haz, su color verde dificulta observarlas a simple vista; cuando son jóvenes por lo general se localizan cerca del sitio donde

fueron depositados los huevos y permanecen inactivas durante los primeros instares (SENASICA, 2009).

El rango óptimo de temperatura es de 21-27°C, en temperaturas arriba de 32°C e inferiores a 15°C perjudican el desarrollo y supervivencia del psílido, esto debido a que reduce la puesta de huevos y la eclosión, siendo su temperatura optima a los 27°C, el tiempo promedio requerido del desarrollo de huevo a adulto va de los 15 a 30 días, una sola generación puede ser completada de 3-5 semanas dependiendo de la temperatura, el número de generaciones varía considerablemente entre regiones que usualmente son de tres a siete generaciones, pero una vez que los psílicos invaden un área, la ovoposición prolongada causa que las generaciones se sobrepongan, haciendo que sea difíciles de distinguir entre las mismas (Munyanenza, 2010; EPPO Bulletin, 2013). Una hembra madura pone en promedio 500 huevos en papa en un período de 21 días, aunque hay estudios que mencionan que a lo largo de su ciclo de vida llegan a ovipositar hasta 1500 huevos (Vega-Gutiérrez *et al.*, 2008; Villanueva-Segura, 2015). En este sentido, Abdullah (2008) mostró que las hembras del psílido pueden ovipositar en promedio 231.8 huevecillos en el cultivo de tomate.

### **Ciclo biológico**

El adulto de *B. cockerelli* mide menos de 3 mm de longitud y se alimenta de la savia de las hojas, y podemos encontrar todos los estadios del insecto (huevo, ninfa y adulto) en las plantas que son afectadas (Pérez *et al.*, 2021).

### **Huevos**

Los huevos son diminutos, midiendo menos de 0.5 mm de longitud y 0.15 mm de ancho, son ovalados de color amarillo brillante al principio y después se tornan de un amarillo oscuro o naranja, que a medida que avanza el desarrollo embrionario durante un periodo de incubación dependiendo de la temperatura son de 3 a 9 días (Pérez *et al.*, 2021).

## **Estados ninfales**

En el estado ninfal, estas son elípticas y similares a queresas aplanadas. *B. cockerelli* desarrolla 5 estadios ninfales las cuales se diferencian por su tamaño (Pérez *et al.*, 2021).

### **Primer estadio**

El primer estadio es de coloración anaranjada, las antenas presentan segmentos basales cortos y gruesos que se van adelgazando hasta finalizar en un pequeño segmento con dos setas sensoras, presentan abdomen bien definido con segmentación poco evidente, paquetes alares poco notables, segmentación de las patas poco visibles y la división del cuerpo no está bien definida (Pérez *et al.*, 2021).

### **Segundo estadio**

El segundo estadio, se aprecian las divisiones entre cabeza, tórax y abdomen, antenas sin segmentación diferenciada, paquetes alares desarrollados, patas diferenciadas y abdomen con segmentación poco marcada (Pérez *et al.*, 2021).

### **Tercer estadio**

El tercer estadio ninfal presenta cabeza con antenas con tres placoides diferenciados y setas sensoras, el abdomen muestra los cuatro primeros pares de espiráculos diferenciados, círculos de poros anales y el ano (Pérez *et al.*, 2021).

### **Cuarto estadio**

En el cuarto estadio, se pueden observar como las antenas se estrechan hacia la parte media y luego son más angostas terminando en dos setas sensoras, los ojos se hacen evidentes, el tórax con patas bien definidas y segmentadas, también se pueden apreciar en la parte terminal de las tibias posteriores un par de uñas, paquetes alares definidos y la separación entre el tórax y el abdomen es notoria (Pérez *et al.*, 2021).

### **Quinto estadio**

El quinto estadio muestra una segmentación definida entre la cabeza, tórax y abdomen, siendo la cabeza y abdomen una coloración verde claro y el tórax presenta una tonalidad un poco oscura, las antenas están seccionadas en dos partes por una hendidura marcada, siendo la parte basal gruesa y la apical filiforme, el tórax presenta sus tres pares de patas bien definidas con su segmentación, los paquetes alares claramente diferenciados sobresaliendo del resto del cuerpo, el abdomen es semicircular con un par de espiráculos en cada uno de los cuatro primeros segmentos (Marín *et al.*, 1995; Marín, 2002).

### **Adulto**

Los adultos se parecen a pequeñas chicharras aladas y son del tamaño de un pulgón, midiendo menos de 3 mm de longitud. Presentan alas blancas, pero después de 3 o 4 horas son transparentes y cuando están en reposo se mantienen sobre el cuerpo, el adulto presenta una coloración verde-amarillento, al paso de los primeros siete o diez días de alcanzar el estado adulto, la coloración del cuerpo pasa ligeramente de ámbar a café oscuro o negro (Marín, 2002; Pérez *et al.*, 2021).

## **Adulto hembra**

El adulto hembra a diferencia del macho presenta cinco segmentos visibles más el segmento genital en el abdomen, este de forma cónica en vista lateral, presenta una mancha en forma de “Y” en la parte media dorsal con los brazos hacia la parte terminal del abdomen (Marín, 1995, 2002).

## **Permanente del tomate y sintomatología**

*Candidatus Liberibacter solanacearum* (CLs), es una bacteria Gram negativa restringida al floema de las plantas y a la hemolinfa de los insectos vectores, no es cultivable *in vitro*, es miembro del género *Liberibacter*, perteneciente a la clase  $\alpha$ - Proteobacteria, subdivisión de Proteobacterias, la morfología de esta bacteria es la de un bacilo con un tamaño de entre 2-3  $\mu\text{m}$  de largo y 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  de ancho, dispone de una pared de peptidoglicanos apenas visible, su citoplasma es menos denso con respecto a otras bacterias fitopatógenas y a su vez presentan plasmólisis, los factores favorables para su desarrollo son temperaturas de 20 a 32°C para haplotipos A y B (Garnier *et al.*, 2000; Tanaka *et al.*, 2007; Levy *et al.*, 2011; Ontiveros, 2012; Delgado-Ortiz *et al.*, 2020).

El permanente del tomate se detectó a principios de los años 80's en México en la región del Bajío, en el estado de Guanajuato, pero no fue hasta el 2009 que a nivel mundial se reconoció la presencia del patógeno en cultivos de tomate en Sinaloa, provocando pérdidas económicas en cultivos a cielo abierto e invernadero y siendo muy difícil de controlar, además que afecta el rendimiento y la calidad del fruto, causando pérdidas económicas de hasta un 60-100% (Almeyda *et al.*, 2008; Delgado-Ortiz *et al.*, 2020; Roque-Enriquez *et al.*, 2021). Los síntomas principales del permanente del tomate son: clorosis de brotes apicales, hojas compuestas lanceoladas con epinastia y márgenes con coloración púrpura, necrosis, aborto de flores, hojas maduras frágiles de coloración amarillenta y enrolladas hacia arriba, presentan también entrenudos cortos, reducción y producción de frutos pequeños, necrosis de los tejidos hasta

el colapso de la planta de tomate (Liefting *et al.*, 2009a; Garzón-Tiznado *et al.*, 2009; Rojas *et al.*, 2016; Mendoza-Herrera *et al.*, 2018; Delgado-Ortiz *et al.*, 2020).

### **Caracterización bioquímica de CLs**

Actualmente, la caracterización bioquímica de *Candidatus* Liberibacter es complicada, debido a que es difícil aislarla en medios de cultivos por ello se encuentra ubicada dentro de los organismos *Candidatus* (Reveles-Torres *et al.*, 2016). Por otro lado, ha habido reportes que *Candidatus* Liberibacter americanus y *Candidatus* Liberibacter solanacearum poseen mayor capacidad metabólica para algunos aminoácidos y vitaminas, y siendo CLs capaz de producir arginina, glutamina y ornitina (Wulff *et al.*, 2014).

### **Distribución de los haplotipos de CLs**

En la actualidad se han descrito cinco haplotipos distintos de *Candidatus* Liberibacter (Designados A, B, C, D y E), los cuales afectan a varios cultivos en el mundo, el haplotipo A se ha reportado desde Centroamérica hasta Norteamérica y Nueva Zelanda, mientras que el haplotipo B se ha encontrado en México y América del Norte, ambos presentes en solanáceas y transmitidos por *B. cockerelli* aunque también en México se presenta el haplotipo A (Nelson *et al.*, 2011; Rojas-Martínez *et al.*, 2016; Melgoza-Villagómez *et al.*, 2018; Delgado-Ortiz *et al.*, 2020).

El haplotipo C se encuentra presente en Finlandia, Noruega y Suecia en el cultivo de zanahoria (Nelson *et al.*, 2011; EPPO, 2013; Loiseau *et al.*, 2014). Los haplotipos D y E están descritos en Francia, España, Marruecos, Túnez, Israel y Portugal para cultivos de apiáceas (zanahoria, apio, chirivía, perejil) (Teresani *et al.*, 2014) y se ha confirmado que los haplotipos B y E afectan a apiáceas y solanáceas (Teresani *et al.*, 2014; Bertolini *et al.*, 2015).

Mendoza-Herrera *et al.* (2018) reportan que dependiendo de los haplotipos A y B

de CLs que provocan la infección, la planta registra la aparición de síntomas y su severidad como: reducción del crecimiento, reducción del tamaño y decoloración de las hojas apicales, desarrollo de meristemas axilares, enchinamiento, atrofia, enrollamiento y necrosis de los tejidos hasta el colapso de la planta.

## **Nanotecnología**

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).

La nanotecnología proporciona productos con propiedades fisicoquímicas, brinda grandes oportunidades para la obtención de productos y aplicaciones innovadoras para la agricultura, la ganadería, el tratamiento de aguas y en 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).

## **Nanotecnología en plantas**

Las nanopartículas (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).

### **La nanotecnología en el control de insectos**

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 (Ragaei 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. Los beneficios comunes de nanopesticidas son; 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 (Athanassiou *et al.*, 2018).

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 *Sitophilus 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  $1 \text{ g kg}^{-1}$  de arroz *Oryza sativa* L. (Poaceae), mientras que con óxido de zinc y dióxido de titanio alcanzaron esta eficacia a una dosis de  $2 \text{ g kg}^{-1}$  después de 14 días de tratamiento.

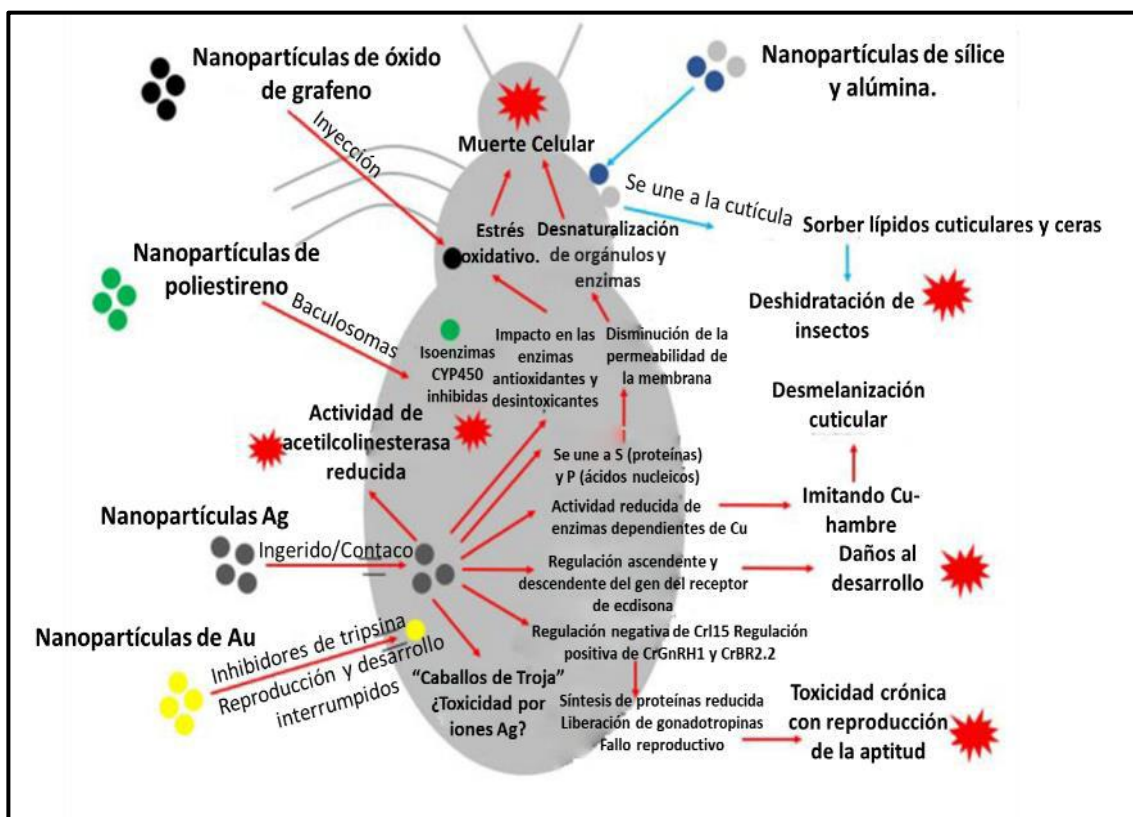
Shaker *et al.* (2016), evaluaron nanopartículas de óxido de cobre contra larvas del segundo y cuarto estadio de *Spodoptera littoralis* Boisduval (Lepidoptera: Noctuidae), con resultados efectivos contra la supervivencia de las larvas de segundo y cuarto estadio con 95 y 75% de mortalidad a 1000 ppm 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.

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 progenie 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**

El posible modo de acción de las NPs contra insectos es limitado (Benelli, 2018) (Fig. 1). Los mecanismos que conducen a la citotoxicidad se han estudiado principalmente para las nanopartículas de plata, considerando que su toxicidad está fuertemente influenciada por su tamaño, forma y carga (Foldbjerg *et al.*, 2015). La teoría más 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 los orgánulos 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 y la muerte celular (Jiang *et al.*, 2015).



**Figura1.** Modo de acción de las nanopartículas sobre insectos (Benelli, 2018)

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del experimento

La presente investigación se llevó a cabo en el Departamento de Parasitología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, y se desarrolló en dos etapas. La primera se efectuó en el Laboratorio de Entomología Molecular y Alternativas de Control de Plagas (LEMACP), mientras que la segunda tuvo lugar bajo condiciones de invernadero.

### Cría de insectos y material vegetativo.

Se utilizó una cría de insectos de *B. cockerelli* mantenida en plantas de tomate dentro de jaulas de 60×60×60 cm, libre de patógenos y parasitoides. La colonia se desarrolló bajo condiciones controladas de invernadero, a  $24 \pm 2$  °C, con una humedad relativa de  $60 \pm 10\%$  y ventilación automatizada para reducir el calor y renovar el suministro de bióxido de carbono.

El material vegetal correspondió a plantas de tomate tipo bola variedad Floradade (Fax de Occidente S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México), variedad seleccionada por su alta susceptibilidad a *B. cockerelli* (Mayo-Hernández, 2018). Las semillas se sembraron en charolas de germinación de poliestireno expandido de 200 cavidades, utilizando sustrato peat moss y perlita en proporción 2:1. El trasplante se realizó 30 días después de la siembra, colocando las plántulas en bolsas de polietileno de 10 L para los ensayos de invernadero.

### Síntesis de Nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) con morfología semiesférica y hexagonal

Las nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) fueron sintetizadas en el Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA), en Saltillo, Coahuila. Se sintetizaron a través de precipitación controlada de acuerdo con la guía de

Betancourt *et al.* (2010), mediante el método de hidrólisis química, bajo la siguiente metodología: En un matraz bola de 3000 mL se mezclaron 26.33 g de acetato de zinc, 1700 mL de etanol, 300 mL de agua destilada, 5.36 mL trietanolamina y 1.42 mL N-propilamina. La reacción se mantuvo en reflujo a 65 °C durante seis y doce horas, (hexagonal y esférica, respectivamente). Luego, las soluciones se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se agitaron durante doce horas. Finalmente, las nanopartículas se centrifugaron a 15,000 rpm durante 5 minutos para su recuperación, el precipitado se lavó con etanol y se secó a 80 °C en una estufa de secado por 24 horas. Las NPs-ZnO secas se trituraron en un mortero de ágata para obtener un polvo fino y se almacenó a temperatura ambiente hasta su utilidad.

### **Caracterización de Nanopartículas de ZnO**

La caracterización de las NPs-ZnO se realizó en el CIQA, mediante Difracción de rayos X (XRD) para conocer la estructura cristalina; Espectroscopia de infrarrojo (FTIR) para conocer su composición química de las NPs y microscopía electrónica de transmisión (TEM) para conocer su morfología y tamaño.

### **Evaluación del efecto de nanopartículas de óxido de zinc (semiesféricas y hexagonales) sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de laboratorio.**

Se colocaron plantas de tomate en una jaula de 60×60×60 cm, donde se liberaron adultos de *B. cockerelli* durante 48 horas para que ovipositaran, y de estos se utilizaron para los bioensayos. Se evaluaron mortalidades tanto de huevo como de ninfas de tercer estadio basado en el Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) con el método de prueba 002 *Psylla* spp. (Hemiptera: Triozidae) con algunas modificaciones. El bioensayo consistió en la inmersión de foliolo infestado con huevos y otra inmersión de foliolo infestados con ninfas de tercer instar, en ambos casos durante 5 segundos. Los foliolos 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 ocho concentraciones, incluido el testigo de NPs-ZnO (3000, 1500, 1000, 500, 250, 100, 50 y 0 mg-L) con seis repeticiones, y cada repetición conformada de tres foliolos y se evaluó cada 24 horas por cinco días sobre huevos y por cuatro días en ninfas. Para la evaluación se utilizó un microscopio estereoscopio binocular Carl Zeiss Stemi DV4 y consistió en la contabilización del número de huevos y ninfas vivas del tercer estadio de *B. cockerelli* por foliolo. Para el criterio de muerte en la evaluación de huevos, se tomó en cuenta los huevos no eclosionados y/o presenten una malformación en el corion. Y en el caso de ninfas, los criterios de muerte fueron, la no motilidad, cambio de coloración y malformaciones en las ninfas.

#### **Evaluación del efeto de nanopartículas de óxido de zinc (semiesféricas y hexagonales) sobre *Bactericera cockerelli* bajo condiciones de invernadero**

Para la evaluación en invernadero se trasplantaron plantas de tomate de 30 días después de la germinación, cultivadas en bolsas de polietileno de 10 L de sustrato peat moss y perlita en relación 2:1. A los 15 después del trasplante (ddt) se realizó la infestación con adultos de *B. cockerelli* durante 48 horas para que ovipositaran, después se retiraron los adultos y se realizó el conteo de huevos y se dio seguimiento hasta su eclosión y al contar con ninfas de tercer estadio se realizó la primera aplicación de NPs-ZnO vía drench (con un volumen de 25 mL/planta) y vía foliar (asperjados de manera manual con un atomizador con un mismo volumen). Se evaluó la mortalidad cada 24 horas por cinco días. La segunda aplicación se realizó a los 15 días después de la primera e igualmente se evaluó cada 24 horas por cinco días. Se evaluaron cuatro tratamientos por NPs (0, CL50, CL90 y CL90X3, derivadas del bioensayo de laboratorio) con seis repeticiones.

### **Análisis de datos in vivo**

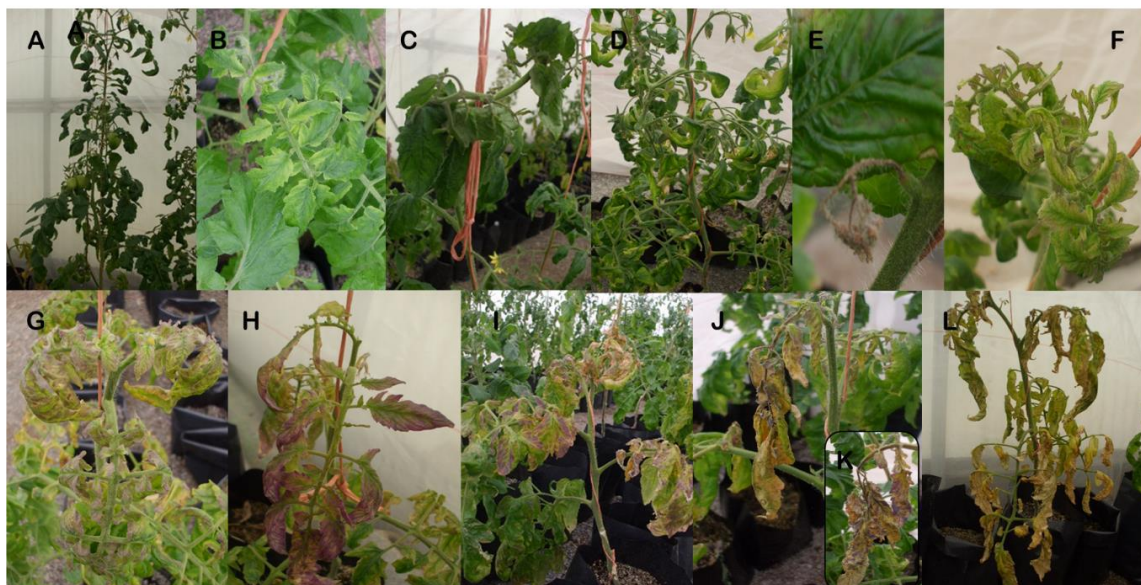
Los datos de mortalidad se analizaron usando un análisis Probit para estimar el valor de la CL50 y CL95 y el margen de fiabilidad (límite fiducial) al 95% de significancia. La mortalidad en el control fue corregida mediante la fórmula de Abbott (1925) con una mortalidad aceptada en el testigo de 15%. Posteriormente, para determinar las diferencias en la mortalidad entre los tratamientos, los datos se transformaron (raíz cuadrada/arco seno) los cuales se sometieron a una prueba ANOVA bajo un diseño completamente al azar, tanto en laboratorio como invernadero y una comparación de medias de Tukey ( $p < 0.05$ ) utilizando el paquete estadístico SAS/STAT (SAS Institute, 2002).

### **Cambios fenotípicos y análisis de la severidad de la enfermedad permanente del tomate**

Se realizó un monitoreo periódico de la evolución de los síntomas de la enfermedad llegando a manifestarse los primeros síntomas entre 33 y 45 días posteriores a la aplicación de las NPs-ZnO comenzando con enroscamientos ligeros en las hojas jóvenes de la planta siendo la muerte de la planta como la etapa final. Se realizó una evaluación de la severidad en la planta relacionados con la presencia de la bacteria, para lo cual se siguió la escala mencionada por Beltran-Beache y Flores-Olivas, (2014) (Figura 2). 0: planta sana; 1: enroscamiento de las hojas de la parte superior; 2: enroscamiento y clorosis en el borde de las hojas de la parte superior; 3: enroscamiento y clorosis en el borde las hojas en toda la planta; 4: la planta adquiere un tono verde más intenso y presenta aborto florales; 5: deformación del ápice y retraso en el crecimiento de la planta; 6: nervaduras y puntas color púrpura en las hojas jóvenes; 7: coloraciones púrpuras en más del 50% de las hojas superiores; 8: plantas pequeñas con enroscamiento y clorosis general, con aborto floral y puntas púrpuras; 9: los folíolos del estrato superior de la planta comienzan a tonarse

secas y flexibles de la punta hacia el peciolo de la hoja, provocando la muerte descendente de la planta y 10: planta muerta.

Para determinar las diferencias en la severidad entre los tratamientos, los datos se transformaron (raíz cuadrada/arcoseno) los cuales se sometieron a una prueba ANOVA bajo un diseño completamente al azar y una comparación de medias de Tukey ( $p < 0.05$ ) utilizando el paquete estadístico SAS/STAT (SAS Institute, 2002).

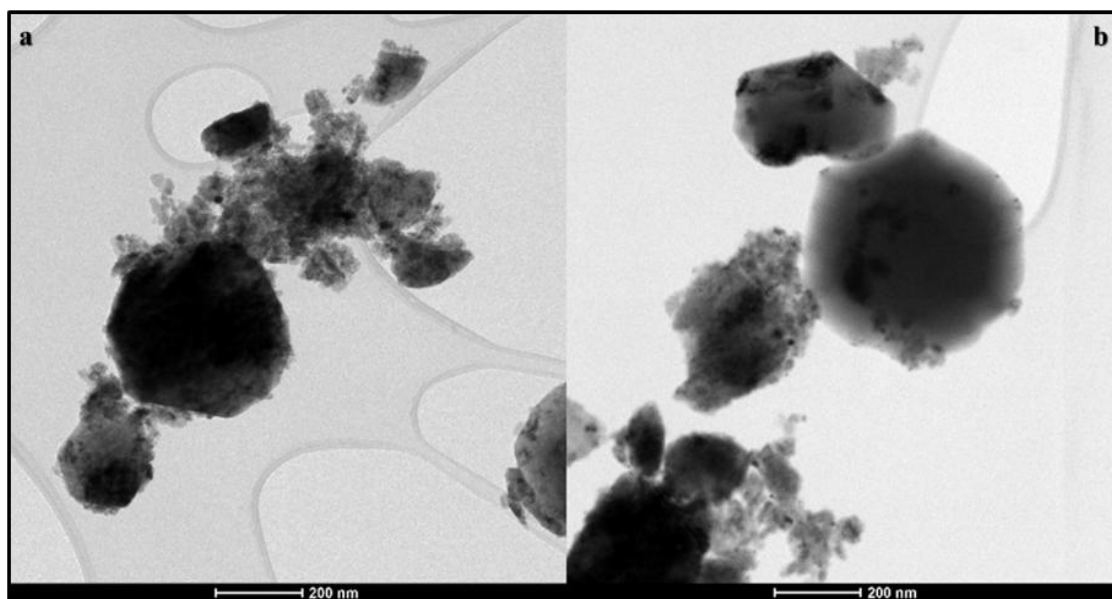


**Figura 2.** Escala de severidad de acuerdo con la sintomatología expresada por la infección de CLs (Beltran-Beache y Flores-Olivas, 2014). A) nivel 0; B) nivel 1; C) nivel 2; D) nivel 3; E) nivel 4; F) nivel 5; G) nivel 6; H) nivel 7; I) nivel 8; J) nivel 9 y L) nivel 10.

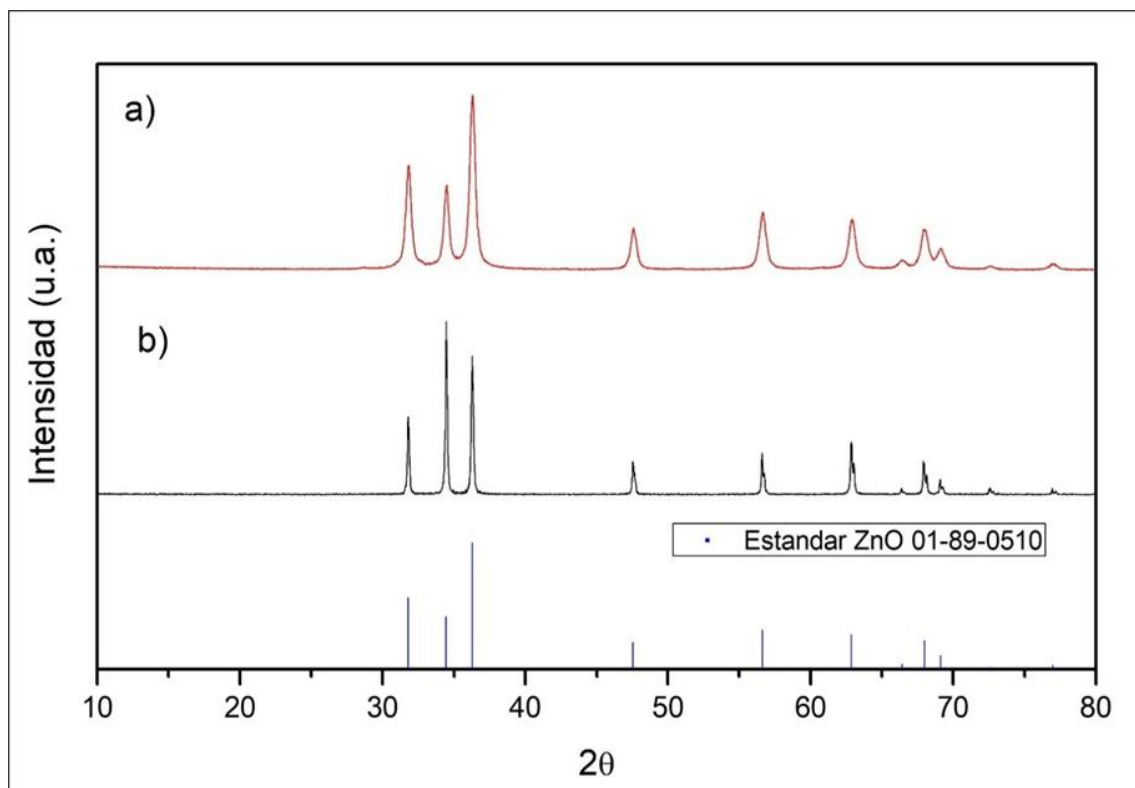
## RESULTADOS

### Caracterización de las NPs-ZnO

El análisis TEM confirmó que las NPs-ZnO tienen una morfología semiesférica y hexagonal con un diámetro aproximado en un rango de 50-80 nm (Figuras 3a y b). Mientras que el análisis DRX (Figura 4) muestran que tienen una estructura cristalina bien definida, cuyos picos presentes coinciden parcialmente con los del estándar de ZnO, sugiriendo que la muestra contiene ZnO, pero posiblemente en menor cantidad o con impurezas, esta diferencia podría deberse a diferentes condiciones de síntesis o procesamiento de las muestras.



**Figura 3.** Micrografía TEM de NPs-ZnO que muestra la forma esférica (a) y (b) hexagonal y tamaño de las NPs-ZnO.



**Figura 4.** Difractograma de rayos X de nanopartículas de ZnO. a) NPs-ZnO hexagonal, b) NPs-ZnO esférica.

#### **Mortalidad de huevo y ninfas de tercer instar de *B. cockerelli* en laboratorio**

El efecto insecticida de las NPs-ZnO de dos morfologías (semiesféricas y hexagonal) sobre la etapa de huevo de *B. cockerelli* mostró diferencias significativas entre concentraciones. A las 120 horas de evaluación, se observó que a partir de concentraciones de 500 ppm la tasa de mortalidad de huevo superó el 50% alcanzando valores máximos de 72.10 y 73.19% en la concentración de 3000 ppm y una  $CL_{50}$  de (250.27-265.40 ppm) y una  $CL_{95}$  de (3955-4234 ppm) respectivamente para las NPs semiesféricas y hexagonales (Tabla 1).

**Tabla 1.** Mortalidad y concentraciones letales de NPs-ZnO con dos morfologías en huevos de *B. cockerelli* bajo condiciones de laboratorio.

Concentración (ppm)	Mortalidad (%)	
	(semiesféricas)	(Hexagonales)
<i>Testigo</i>	2.05 f	5.61 e
50	15.59 e	23.74 d
100	30.71 d	30.96 d
250	49.25 c	48.77 c
500	53.40 c	52.99 c
1000	<b>63.77 ab</b>	61.97 b
1500	<b>69.38 a</b>	<b>69.02 ab</b>
3000	<b>72.10 a</b>	<b>73.19 a</b>
<i>g.l.</i>	7,47	7,47
<i>F</i>	109.56	184.36
<i>Pr&gt;F</i>	<0.0001***	<0.0001***
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.95	0.97
&CL <sub>50</sub> (§LF, 95%)	250.27 (205.93- 299.50)	265.40 (218.86-317.34)
&CL <sub>95</sub> (§LF, 95%)	3955 (2823- 6101)	4234 (3005-6580)

Datos transformados por raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columnas no son significativamente diferentes (Tukey  $p < 0.05$ ). \*\*\* Indican significancia contraste valor F a  $P < 0.001$ . &Concentración letal, §Límites de confianza.

En el caso de las ninfas, la actividad insecticida de las NPs-ZnO, mostró que a la concentración de 500 ppm ocasionaron una mortalidad de 47.48 y 48.17% hexagonales y semiesféricas, respectivamente, a las 96 horas de evaluación. Así mismo, se registró una letalidad máxima de 80.42 y 81.37% en la concentración de 3000 ppm de NPs-ZnO hexagonal y semiesféricas, en comparación con el

testigo, los valores de  $CL_{50}$  fueron de 277.58 (hexagonales) y 255.63 ppm (semiesféricas) mientras que las  $CL_{95}$  correspondieron a 3610 y 3511 ppm, respectivamente (Tabla 2).

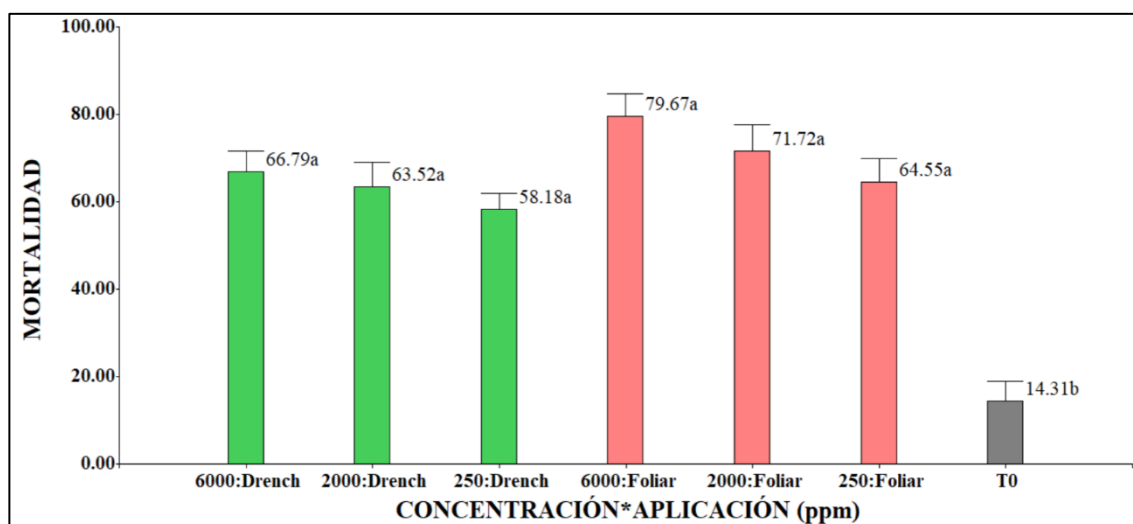
**Tabla 2.** Mortalidad y concentración letal de NPs-ZnO de dos morfologías en ninfas de tercer instar de *B. cockerelli* bajo condiciones de laboratorio.

Concentración (ppm)	Mortalidad (%)	
	Hexagonales	Semiesféricas
<i>Testigo</i>	9.63 f	11.44 e
50	23.22 e	27.94 d
100	38.55 d	37.84 cd
250	41.07 cd	37.37 cd
500	47.48 c	48.17 c
1000	67.95 b	66.10 b
1500	69.21 b	<b>70.27 ab</b>
3000	<b>80.42 a</b>	<b>81.37 a</b>
<i>g.l.</i>	7,47	7,47
<i>F</i>	154.36	83.86
<i>Pr&gt;F</i>	<0.0001***	<0.0001***
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.96	0.94
& $CL_{50}$ (§LF, 95%)	277.58 (167.19-427.85)	255.63 (150.98-396.66)
& $CL_{95}$ (§LF, 95%)	3610 (1789-13765)	3511 (1720-13822)

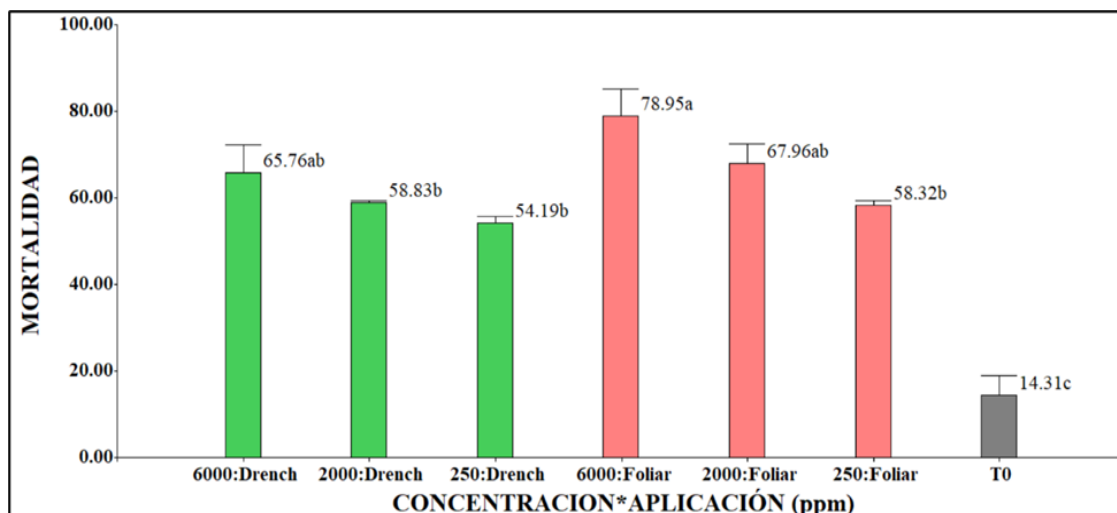
Datos transformados en raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columnas no son significativamente diferentes (Tukey  $p < 0.05$ ). \*\*\* Indican significancia contraste valor F a  $P < 0.001$ . &Concentración letal, §Límites de confianza.

### Mortalidad de ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli*, en invernadero

Tras la aplicación de NPs-ZnO de morfología semiesféricas en invernadero sobre plantas de tomate infestadas con ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli*, se observaron diferencias altamente significativas entre concentraciones, sin embargo, ni el modo de aplicación ni su interacción mostraron diferencias ( $F: 3.72; P < 0.0610$ ) y ( $F: 0.56; P < 0.6441$ ). La mortalidad incremento notablemente en la segunda aplicación, alcanzando una letalidad de 79.67% mediante la vía foliar ( $F: 57.48; P < 0.0001; gl: 7$ ) (Figura 5).



**Figura 5.** Mortalidad de ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* por aplicación en dos vías de NPs-ZnO de morfología semiesférica en tomate bajo invernadero. Datos transformados por raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columnas no son significativamente diferentes (Tukey  $p < 0.05$ ).



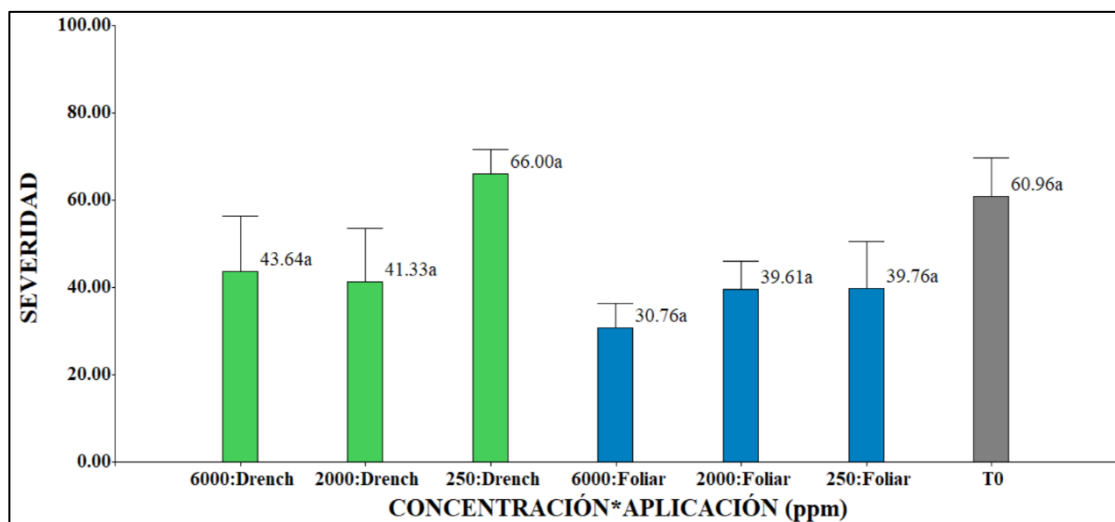
**Figura 6.** Mortalidad de ninfas de segundo estadio de *B. cockerelli* por aplicación en dos vías de NPs-ZnO de morfología hexagonal en tomate bajo invernadero. Datos transformados por raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columnas no son significativamente diferentes (Tukey  $p < 0.05$ ).

Para el caso de las NPs-ZnO de morfología hexagonal, los resultados mostraron diferencias altamente significativas entre concentraciones evaluadas ( $F: 71.28$ ;  $P < 0.0001$ ; gl: 7) a diferencia de los observado con las NPs semiesféricas, las hexagonales presentaron diferencias en el modo de aplicación ( $F: 4.72$ ;  $P < 0.0358$ ), aunque no se detectaron diferencias en la interacción entre factores. Las NPs-ZnO de morfología hexagonal alcanzaron una mortalidad de 78.95% a 6000 ppm, lo que indica que tanto la concentración como el método de aplicación influyen significativamente en la mortalidad de las ninfas (Figura 6).

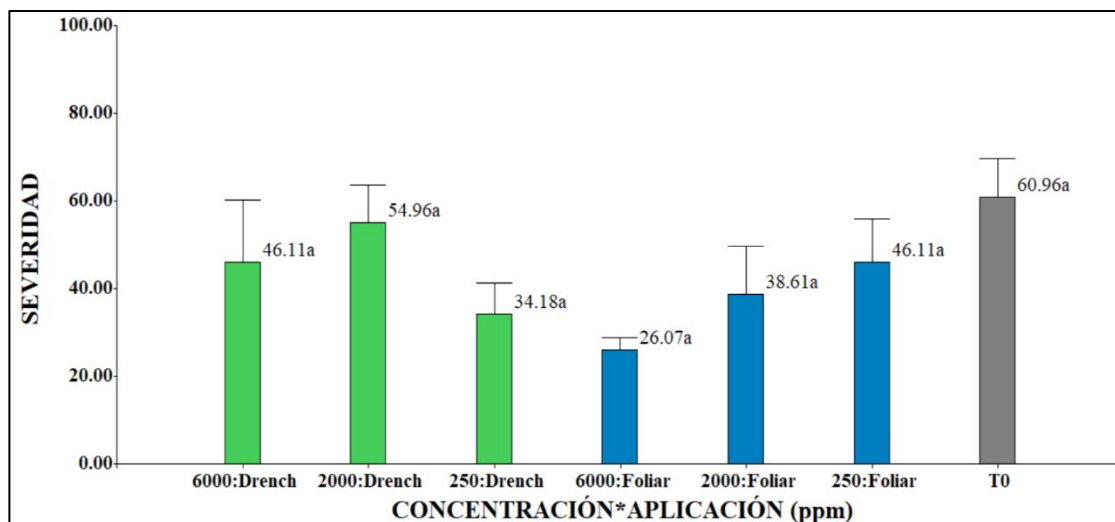
### **Severidad del nivel de la expresión de la enfermedad con aplicaciones de NPs-ZnO en plantas de tomate**

Después de la segunda aplicación de NPs-ZnO, se evaluó la severidad de la enfermedad del permanente del tomate, pero no se encontró diferencias entre NPs-ZnO semiesférica ( $F: 2.87$ ;  $p < 0.0484$ ; gl: 7) y hexagonal ( $F: 2.71$ ;  $p < 0.0577$ ; gl: 7), así como la vía de aplicación y su interacción, y esto pudiese deberse a factores climatológicos. (Gráfica 7 y 8). Sin embargo, las NPs-ZnO de morfología hexagonal registraron una mayor reducción de la severidad (26.07%) en comparación con las semiesféricas (30.76%) en concentración de 6000 ppm por

la vía foliar, esto podría atribuirse a factores relacionados con la biodisponibilidad, transporte y mecanismo de acción de las NPs, indicando que las NPs de morfología hexagonal podrían ser ligeramente más prometedora para el control de la enfermedad.



**Figura 7.** Severidad del nivel de expresión de la enfermedad permanente del tomate por aplicaciones de NPs-ZnO semiesféricas en tomate bajo invernadero. Datos transformados por raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columnas no son significativamente diferentes (Tukey  $p < 0.05$ ).



**Figura 8.** Severidad del nivel de expresión de la enfermedad permanente del tomate por aplicaciones de NPs-ZnO hexagonales en tomate bajo invernadero. Datos transformados por raíz cuadrada de arcoseno. Medias con la misma letra entre columnas no son significativamente diferentes (Tukey  $p < 0.05$ ).

## DISCUSIÓN

En la última década, la nanotecnología ha revolucionado diversas industrias a nivel mundial, incluida la agronómica, donde se consolida como una herramienta prometedora para el manejo de plagas y enfermedades, así como para la protección integral de los cultivos (Wazid *et al.*, 2018).

Los resultados en la presente investigación demuestran que la aplicación de NPs-ZnO, tanto en su morfología semiesférica como hexagonal ejercen actividad tóxica significativa sobre huevos y ninfas de *B. cockerelli* en tomate bajo condiciones controladas de laboratorio e invernadero.

Diversos estudios han evidenciado la eficacia de distintas nanopartículas en el control de insectos. Shaker *et al.* (2017) reportaron que las nanopartículas de dióxido de titanio con morfología hexagonal resultaron efectivas contra *Spodoptera littoralis* Boisduval (Lepidoptera: Noctuidae), alcanzando altos niveles de control a los 15 días de aplicación, particularmente a concentraciones de 62.5 y 125 ppm sobre larvas de segundo y cuarto estadio, además de alterar parámetros biológicos del insecto. De manera similar, Das *et al.* (2019) registraron mortalidades de hasta 90% sobre *Sitophilus orizae* L. (Coleoptera: Curculionidae) tras cuatro días de exposición a nanopartículas de óxido de aluminio de morfología semiesférica a dosis de 1 g kg<sup>-1</sup> en arroz.

Rahman *et al.*, (2022) evaluaron las nanopartículas de óxido de cobre (NPs-CuO) sobre *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) y observaron una marcada actividad larvicida alcanzando mortalidades del 97%, 94% y 81% en larvas del tercer, cuarto y quinto estadio, respectivamente, a una concentración de 500 ppm. De manera similar, Al-Azzazy y Ghandi (2024) analizaron el impacto de las NPs-CuO sobre distintos estadios de los ácaros *Phyllocoptruta oleivora* (Ashmead) (Acari: Eriophyidae), *Eutetranychus orientalis* (Klein) (Acari: Tetranychidae) y *Brevipalpus obovatus* (Donnadieu) (Acari: Tenuipalpidae) así como su efecto en los ácaros depredadores, *Amblyseius swirskii* (Athias-Henriot) y *Euseius scutalis* (Athias-Henriot) (Acari: Phytoseiidae) en naranjo. Los resultados demostraron que todas las etapas de los ácaros plaga, incluidos los huevos, presentaron susceptibilidad a las NPs-CuO con porcentajes de

mortalidad de 86.37%, 77.52% y 84.08% para *P. oleivora*, *E. orientalis* y *B. obovatus* a 320 ppm, respectivamente. En contraste, los depredadores mostraron una baja mortalidad (15.19 y 21.39% a 320 ppm), lo que sugiere una relativa selectividad. Además, los autores reportaron la inducción de malformaciones en los huevos lo cual podría estar asociado con la reducción de la tasa de eclosión. Por otra parte, Hameed *et al.*, (2023) emplearon nanopartículas de titanio (NPs-Ti), obtenidas mediante, síntesis verde a partir de *Chlorella vulgaris* Beijerinck (Chlorellaceae) para evaluar su eficacia contra *Musa domestica* L. (Diptera: Muscidae) en comparación con el insecticida imidacloprid, con mortalidades del 100% en el primer estadio larval, 70% en el tercer estadio larval y 93.3% adultos a una concentración de 200 µg/mL. Además, concluyeron que las NPs-Ti de síntesis verde inducen alteraciones fenotípicas en la mosca doméstica, inhibición de la emergencia, maduración de pupas, desarrollo incompleto estructuras como la cabeza, patas y alas, así como adultos malformados con ausencia de órganos genitales. Así mismo, Zavala-Zapata *et al.* (2024) evaluaron nanopartículas de plata, obtenidas de síntesis verde sobre *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) registrando mortalidades del 80.14% a una concentración de 128 ppm después de 72 horas de aplicación bajo condiciones de invernadero.

Ontiveros-Guerra *et al.* (2025) evaluaron los efectos de nanopartículas de oro (AuNPs) sintetizadas mediante un método ecológico sobre de *Tetranychus urticae* K. Koch (Acari: Tetranychidae) y su depredador *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acari: Phytoseiidae) bajo condiciones de laboratorio, así como su eficacia foliar en tomate bajo invernadero contra *T. urticae*. Los resultados demostraron que todos los estadios de *T. urticae* y los adultos de *P. persimilis* fueron susceptible a las AuNPs, registrándose tiempos de mortalidad similares en ambas especies, no obstante; las AuNPs mostraron selectividad hacia la plaga. En invernadero, la aplicación foliar de AuNPs redujo significativamente las poblaciones de *T. urticae* en plantas de tomate.

En relación con las NPs ZnO, nuestros resultados son consistentes con lo reportado por Khooshe-Bast *et al.* (2016) quienes evaluaron NPs-ZnO de 23.34 nm y morfología hexagonal sobre *Trialeurodes vaporariorum* Westwood

(Hemiptera: Aleyrodidae) en condiciones de laboratorio. Dichos autores reportaron mortalidades de 73.3 y 91.6% a concentraciones más bajas de ( $15 \text{ mg L}^{-1}$  y  $20 \text{ mg L}^{-1}$ ), confirmando el potencial insecticida de las de NPs-ZnO incluso a bajas concentraciones.

La alta efectividad de las nanopartículas podría explicarse por su capacidad para desintegrar la capa cerosa protectora de los insectos mediante la absorción de lípidos, lo que provoca la pérdida de humedad y, en consecuencia, la desecación del insecto (Keratum *et al.*, 2015). Además, diversos estudios señalan que las NPs pueden afectar de manera importante los procesos de alimentación. Manimegalai *et al.* (2021) demostraron que nanopartículas de plata (NPs-Ag) de síntesis verde a partir de *Vernonia anthelmintica* (L.) Willd, ejercen una marcada actividad antialimentaria sobre *Spodoptera litura* (F.), *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae), *Culex quinquefasciatus* Say y *Aedes aegypti* (L.) (Diptera: Culicidae), registraron porcentajes de disuasión alimentaria de 86.90 y 89.83% a dosis de  $150 \mu\text{g/mL}$ . Así mismo, los autores observaron alteraciones estructurales, como células reducidas de tamaño y daño en la membrana peritrófica en larvas tratadas, lo que sugiere un impacto directo en la integridad del sistema digestivo.

Las distintas NPs, específicamente aquellas de naturaleza metálicas, pueden generar alteraciones a nivel celular en los tejidos de los insectos. Estas afectaciones incluyen daño en el intestino medio, en células epiteliales y en la cutícula, además de provocar deshidratación, apoptosis, pérdida de setas laterales, constricción en la región abdominal del tórax (Benelli, 2019). En el presente estudio se observaron varias de estas alteraciones, tales como, constricción del abdomen, apoptosis, deshidratación del corion en los huevos de *B. cockerelli* y malformaciones durante la transición del quinto estadio ninfal a la fase adulta (Figura 9). De manera similar, Ishwarya *et al.* (2018) reportaron que la mortalidad en larvas de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) sintetizadas de forma verde a partir de extractos de *Ulva Lactuca* L. (Ulvaceae) se relacionó con la desintegración de la capa epitelial y cutícula externa, alcanzando un 100% de mortalidad en larvas de cuarto estadio a  $50 \mu\text{g/mL}$  en solo 24 horas.



**Figura 9.** Daño ocasionado por aplicación de NPs-ZnO de morfología semiesférica y hexagonal en huevo y ninfas de *B. cockerelli* en plantas tomate: a) deshidratación de huevos; b) constricción de la región abdominal; c) malformación al pasar al estado adulto y d) apoptosis en ninfas.

Otros estudios refuerzan que las nanopartículas también pueden desencadenar respuestas bioquímicas asociadas al estrés celular. Amjad *et al.*, (2022) observaron un incremento en las actividades de enzimas como la catalasa, glutatión S-transferasa en *Sitobion avenae* (F.) (Hemiptera: Aphididae) tras la aplicación de NPs-Ag, alcanzando una mortalidad del 93.3% a 600 ppm dos días después de la aplicación del tratamiento. Por otro lado, Alaraby *et al.*, (2015) evaluaron los efectos de NPs-ZnO y cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) en larvas de tercer estadio de *Drosophila Melanogaster* Meigen (Diptera: Drosophilidae), encontrando cambios significativos en la expresión génica, producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) e internalización de las nanopartículas a través de la barrera intestinal sin evidencia de genotoxicidad. Dichas nanopartículas indujeron modificaciones en la expresión de genes relacionados con estrés celular, como *Hsp70* y *p53*, especialmente a 10 mM, donde se observó una marcada sobreexpresión del gen *p53*. Otros genes como *Hsp83*, *CAT*, *SOD*

también se comportaron como biomarcadores de la exposición a NPs-ZnO y ZnCl<sub>2</sub>. Mientras que a dosis bajas se registró la subregulación del gen *SOD*.

En el presente estudio, las NPs-ZnO evaluadas, no redujeron significativamente la severidad del permanente del tomate, pero las NPs-ZnO de morfología hexagonal mostraron la mayor reducción de la severidad en un 26.07% mediante aplicación foliar a 6000 ppm. Este resultado difiere de lo reportado por López-Gómez *et al.* (2025), quienes emplearon NPs-Ag para el control de *Bipolaris zaea* en maguey, observando una disminución de la incidencia y severidad de la enfermedad de 37.5% de manera preventiva y 50% de manera curativa a concentraciones de 150 ppm. Por su parte, Rivero-Montejo (2023) logró una reducción significativa de los síntomas del virus huasteco de la vena amarilla en chile mediante aplicaciones de NPs-ZnO y NPs-TiO<sub>2</sub> a 100 mM y 150 mM, aunque señala que la respuesta depende de factores como la aplicación temprana en el cultivo.

Las afectaciones observadas en insectos plaga pueden explicarse por las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas, entre las que destacan su tamaño, forma y composición del núcleo, factores determinantes para la captación celular y, por ende, para la eficacia biológica del tratamiento (Albanese *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2015). El tamaño de las NPs influye directamente en su internalización, ya que modifica las propiedades entálpicas y entrópicas que regulan la fuerza de adhesión entre la nanopartícula y los receptores de membrana (Elias *et al.*, 2013). Se ha documentado que nanopartículas con diámetros entre 30-60 nm se adhieren eficientemente a los receptores de celulares e impulsan eficazmente el proceso de recubrimiento de la membrana (Hoshyar *et al.*, 2016). En el caso partículas de las NPs-ZnO, su actividad biocida se ha asociado a múltiples mecanismos: la interacción directa con la pared celular, que compromete la integridad estructural; la liberación de iones Zn<sup>2+</sup> con actividad antimicrobiana; la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS); la penetración de las NPs al interior de la célula, y la difusión y daño de la membrana plasmática. Estas ROS, producidas por las NPs, pueden afectar severamente diversos componentes celulares. En células eucariotas, la producción excesiva de ROS inducida por NPs-ZnO pueden generar

citotoxicidad, peroxidación lipídica, oxidación de proteínas, daño mitocondrial y del ADN, desestabilización de lisosomas, alteración de enzimas y modificación de factores de transcripción, incluida la sobreexpresión del gen *p53* (Ali *et al.*, 2018). La forma de las NPs también juega un papel fundamental en su toxicidad. Jiang *et al.*, (2008 y 2015) reportan que las NPs de geometría hexagonal o con morfología tipo estrella pueden ser más dañinas para las membranas celulares que las de forma esféricas, debido a la presencia de bordes y puntas que favorecen la alteración de la organización de lipídica y facilitan la penetración. Así mismo, estos autores sugieren que la tasa de generación de ROS en NPs de morfología aguda es mayor que en aquellas de forma esférica, contribuyendo a un efecto citotóxico más intenso.

La interacción de los nanoplaguicidas y las plantas comprenden de tres etapas: a) las NPs se absorben en la superficie de las plantas (raíces, tallos y hojas); b) las NPs penetran la cutícula y la epidermis, ingresando a los tejidos vasculares a través de simplastos o exoplasmas; c) y finalmente, las NPs se movilizan hacia otras estructuras de la planta a través de tejido vascular. Aunque raíces y hojas comparten ciertas características anatómicas, sus diferencias morfológicas generan barreras específicas que condicionan la entrada de las nanopartículas. Además, la acumulación y el transporte de las NPs depende de factores como la forma, el método de aplicación y su capacidad de traslocación. En particular, el movimiento desde las hojas hacia las raíces ocurre mediante el mecanismo de transporte floemático (Pan *et al.*, 2023).

La presente investigación se vio limitada debido a factores climáticos que no eran las óptimas para el desarrollo de la enfermedad. Esto debido a que la temperatura es un factor importante, siendo 17°C una temperatura que retarda el desarrollo de la bacteria y la aparición de síntomas en la planta, y a temperaturas superiores a los 32°C resultan perjudiciales para la bacteria, dada su sensibilidad a esta temperatura, teniendo un impacto negativo en la biología y las migraciones del vector, lo que pudiera sugerir una coevolución entre *Candidatus Liberibacter solanacearum* y *B. cockerelli* (Munyanzeza *et al.*, 2011; LANREF, 2013).

## CONCLUSIÓN

Las NPs-ZnO de morfología hexagonal y semiesféricas presentan una alta actividad insecticida sobre huevos y ninfas de tercer estadio de *B. cockerelli* bajo condiciones de laboratorio. En invernadero, las nanopartículas también evidenciaron efectos significativos, alcanzando niveles de nanotoxicidad sobre ninfas de segundo estadio. No se detectaron diferencias en la interacción entre el método de aplicación y la concentración. No obstante, en general, la vía foliar produjo las mayores mortalidades. Durante la presente investigación, se observaron malformaciones en huevos y ninfas, posiblemente asociadas a la generación de especies reactivas de oxígeno inducidas por las NPs-ZnO, lo cual coincide con los mecanismos de nanotoxicidad reportados para este tipo de materiales.

Referente a la enfermedad no se observaron diferencias, sin embargo, las NPs-ZnO de morfología hexagonal mostraron una mayor reducción de la severidad mediante aplicación foliar.

La actividad insecticida expuesta por las NPs-ZnO, en ambas morfologías, representan una alternativa prometedora para su integración en programas de manejo integrado de plagas. No obstante, es necesario realizar evaluaciones adicionales bajo condiciones de campo para validar su eficacia, estabilidad y seguridad ambiental antes de su implementación a gran escala.

## REFERENCIAS

- Abdel-Gawad, R. M. (2018). Insecticidal activity of *Moringa oleifera* synthesized silver and zinc nanoparticles against the house fly, *Musca domestica* L. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. A, Entomology*, 11(4): 19-30. <https://doi.org/10.21608/eajbsa.2018.17729>.
- Abdullah, N.M. 2008. Life history of the potato psyllid *Bactericera cockerelli* (Homoptera: Psyllidae) in controlled environment agriculture in Arizona. *African Journal of Agricultural Research* 3: 60–67.
- Abott, W. S. 1925. A method for computing the effectiveness of an insecticide. *Journal Economic Entomology*, 18: 265-267.
- 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.
- Alaraby, M., Annangi, B., Hernández, A., Creus, A., & Marcos, R. (2015). A comprehensive study of the harmful effects of ZnO nanoparticles using *Drosophila melanogaster* as an-in vivo model. *Journal of Hazardous Materials*, 296, 166-174.
- Al-Azzazy, M. M. y S. B. Abdel-Ghani. (2024). Field evaluation of the efficacy of copper nanoparticles against mites associated with orange trees. *Brazilian Journal of Biology*, 84: 270-451. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.270451>.
- Albanese A, Tang PS, Chan WCW. The effect of nanoparticle size, shape, and surface chemistry on biological systems. *Ann. Rev. Biomed. Eng.* 2012; 14:1–16. doi: 10.1146/annurev-bioeng-071811-150124.
- Ali, Attarad, Phull, Abdul-Rehman y Zia, Muhammad. «Zinc elemental a nanopartículas de zinc: ¿son las nanopartículas de ZnO cruciales para la vida? Síntesis, aspectos toxicológicos y medioambientales». *Nanotechnology Reviews*, vol. 7, n.º 5, 2018, págs. 413-441. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0067>.
- Almeyda, L.H., J.A. Sánchez y J.A. Garzón (2008). Detección molecular de

- fitoplasmas en papa. En: Flores, O. A. y R. H. Lira (eds), pp 25-37. Detección, diagnóstico y manejo de la enfermedad punta morada de la papa. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.
- Amjad, T., Afsheen, S., & Iqbal, T. (2022). Nanocidal effect of rice husk-based silver nanoparticles on antioxidant enzymes of aphid. *Biological Trace Element Research*, 200(11), 4855-4864.
- 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.
- Beltran Beache, M., & Flores Olivas, A. (2014). Inducción de Resistencia en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a *Candidatus Liberibacter solanacearum*, mediante la aplicación de alcaloides.
- Benelli, G. 2018. Mode of action of nanoparticles against insects. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13), 12329–12341.
- Bertolini, E., Teresani, G.R., Loiseau, M., Tanaka, F.A.O., Barb, S., Martínez, C., Gentit, P., López, M.M. & Cambra, M. (2015). Transmission of '*Candidatus Liberibacter solanacearum*' in carrot seeds. *Plant Pathology*, 64, 276-285. DOI: 10.1111/ppa.12245
- 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.
- Bujanos M., R., J. A. Garzón T., y A. Marín J. 2007. Manejo Integrado del pulgón saltador *Bactericera cockerelli* (Sulc.) (Hemiptera: Psyllidae) en los cultivos de solanáceas en México, pp. 5-21. En N. Maldonado L. A., G. A. Fierros L., y P. F. Ortega M. [eds.], Conferencias sobre paratiroza, virosis y mercados en hortalizas. Memoria Técnica 3. SAGARPA-INIFAP
- Bujanos, R., & Ramos, C. (2015). El psílido de la papa y tomate *Bactericera* (=

- Paratrioza) *cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae): ciclo biológico; la relación con las enfermedades de las plantas y la estrategia del manejo integrado de plagas en la región del OIRSA. *Corporativo Editorial Tauro SA de CV*.
- 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.
- Cerna-Chávez, E., Beache, M. B., Fuentes, Y. M. O., Bautista, O. H., & Ortiz, J. C. D. (2021). *Bactericera cockerelli* vector de *Candidatus Liberibacter solanacearum*, morfometría y haplotipos en poblaciones de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, (26), 81-94.
- Cuesta X., Peñaherrera D., Velásquez J., Castillo C. 2018. Guía de manejo de la punta morada de la papa. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) Estación Experimental Santa Catalina Panamericana Sur Km 1, Cantón Mejía, Provincia de Pichincha. Ecuador.
- 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.
- Delgado-Ortiz, Juan Carlos, Beltrán-Beache, Mariana, Cerna-Chávez, Ernesto, Aguirre-Urbe, Luis Alberto, Landero-Flores, Jerónimo, Rodríguez-Pagaza, Yolanda, & Ochoa-Fuentes, Yisa María. (2019). *Candidatus Liberibacter solanacearum* patógeno vascular de solanáceas: Diagnóstico y control. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 22, e177. Epub 04 de marzo de 2020.
- Elias DR, Poloukhtine A, Popik V, Tsourkas A. Effect of ligand density, receptor density, and nanoparticle size on cell targeting. *Nanomedicine*. 2013; 9:194–201. doi: 10.1016/j.nano.2012.05.015.
- EPPO Bulletin. 2013. *Bactericera cockerelli*. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin. 43(2): 202- 208. DOI: 10.1111/epp.12044.
- Espinoza Q. J. D. 2020. Evaluación de tres estrategias de manejo de Punta

- Morada de la Papa en dos categorías de semilla en Tumbaco Pichincha. Universidad Central del Ecuador.
- 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>
- French-Monar, R. D.; Patton III, A. F. and Douglas J. M. 2010. First report of "*Candidatus Liberibacter solanacearum*" on field tomatoes in the United States. *Plant Pathol.* 94(4):48.
- Garnier, M., Jagoueix-Eveillard, S., Cronje, P.R., Le Roux, H.F., Bove, J.M., 2000. Genomic characterization of a liberibacter present in an ornamental rutaceous tree, *Calodendrum capense*, in the Western Cape Province of South Africa. Proposal of '*Candidatus Liberibacter africanus* subsp. *capensis*'. *Int J Syst Evol Microbiol* 50 Pt 6, 2119-2125
- 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.
- Garzón-Tiznado, J. A., J. A. Garzón-Ceballos, S. Velarde-Felix, A. Marin-Jarillo, y O. G. Cárdenas-Valenzuela. 2005. Ensayos de transmisión del fitoplasma asociado al "permanente del tomate" por el psílido *Bactericera cockerelli* Sulc en México. *Entomología Mexicana* 4:672-675.
- Gutiérrez, M. J. A., Betancourt, G. R., Aguirre, U. L. A., Cerna, C. E., Sandoval, R. A., Ángel, E. C., Chacón, H. J. C.; García, L. J. I., y Hernández, J. A. (2021). Insecticidal effect of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles against *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) on tomato *Solanum lycopersicum*. *Agronomy*, 11(8): 1460-1480. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081460>
- Hameed, R. S., Fayyad, R. J., Shafeeq, M. A. A., & Nuaman, R. S. (2023). Manufacturing and characterization of an effective and eco-friendly nano insecticide with the aid of green alga *Chlorella vulgaris* in contrast to traditional insecticide. *Indonesian Journal of Biotechnology*, 28(2), 112-118.

- Hernández R. J. G. 2019. Identificación de *Bactericera cockerelli* Sulc en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) Parroquia Santa Martha de Cuba, Cantón Tulcàn, Provincia del Carchi. Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador.
- Hoshyar N, Gray S, Han H, Bao G. The effect of nanoparticle size on in vivo pharmacokinetics and cellular interaction. *Nanomedicine (Lond)*. 2016 Mar;11(6):673-92. doi: 10.2217/nnm.16.5. Epub 2016 Mar 22. PMID: 27003448; PMCID: PMC5561790.
- Hua, K. H., Wang, H. C., Chung, R. S. y Hsu, J. C. (2015). Calcium carbonate nanoparticles can enhance plant nutrition and insect pest tolerance. *Journal of Pesticide Science*, 40(4): 208-213. <https://doi.org/10.1584/jpestics.d15-025>.
- IRAC (Insecticide Resistance Action Committee). 2021. IRAC Susceptibility test method 002. from <https://irac-online.org/methods/psylla-spp-all-stages/>
- Ishwarya, R., Vaseeharan, B., Kalyani, S., Banumathi, B., Govindarajan, M., Alharbi, N. S., & Benelli, G. (2018). Facile green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Ulva lactuca* seaweed extract and evaluation of their photocatalytic, antibiofilm and insecticidal activity. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 178, 249-258.
- Jiang, W., Kim, B. Y., Rutka, J. T., & Chan, W. C. (2008). Nanoparticle-mediated cellular response is size-dependent. *Nature nanotechnology*, 3(3), 145-150.
- Jiang, X., Micleuş, 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>
- Jirón-Rojas, R. L., Nava-Camberos, U., Jiménez-Díaz, F., Alvarado-Gómez, O. G., Ávila-Rodríguez, V., & García-Hernández, J. L. (2016). Densidades de *Bactericera cockerelli* (Sulc) 1 e Incidencia del “Permanente del Tomate” en Diferentes Condiciones de Producción del

- Tomate. *Southwestern Entomologist*, 41(4), 1085-1094.
- 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.
- 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.
- Laboratorio Nacional de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria (LANREF). 2013. Ficha técnica, Zebra chip- *Candidatus Liberibacter solanacearum*. SENASICA.
- Levy, J., Ravindran, A., Gross, D., Tamborindeguy, C., Pierson, E. 2011. Translocation of '*Candidatus Liberibacter solanacearum*', the Zebra Chip pathogen, in potato and tomato. *Phytopathology*. 101: 1285- 1291
- 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.
- 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>
- Loiseau M, Garnier S, Boirin V *et al.*, 2014. First Report of '*Candidatus Liberibacter solanacearum*' in carrot in France. *Plant Disease* 98, 839.
- López-Gómez, I., Mata, V. A. C., España, V. H. P., Cortes, T. R., Rojas, J. A. P., & García, M. S. (2025). Nanopartículas de plata como control de *Bipolaris zeae* en maguey. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 12(23), 78-84.
- Manimegalai, T., Raguvaran, K., Kalpana, M., & Maheswaran, R. (2021). Facile

- synthesis of silver nanoparticles using *Vernonia anthelmintica* (L.) Willd. and their toxicity against *Spodoptera litura* (Fab.), *Helicoverpa armigera* (Hüb.), *Aedes aegypti* Linn. and *Culex quinquefasciatus* Say. *Journal of Cluster Science*, 33(5), 2287-2303.
- 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>
- Marín, J. A. (2002). Ciclo biológico y morfología del salerillo *Paratyoza cockerelli* (sulc) (Homoptera: Psyllidae), como vector de la enfermedad "permanente de jitomate" en el bajo. In: Memoria del taller sobre *Paratyoza cockerelli* (sulc.) como plaga y vector de fitoplasmas en hortalizas, p: 37-45.
- 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 *Paratyoza 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.
- Mayo-Hernández, J., A. Flores-Olivas, J. Valenzuela-Soto, Y. Rodríguez-Pagaza, J. Vega-Chávez, F. Hernández-Castillo, and L. Aguirre-Urbe. 2018. *Bactericera cockerelli* Sulc oviposition preference and development on three tomato varieties. *Southwest. Entomol.* 43: 9059-10.
- Melgoza-Villagómez, C. M., León Sicaños, C. D. R., López Valenzuela, J. Á., Hernández Espinal, L. A., Velarde Félix, S., & Garzón Tiznado, J. A. (2018). Presencia de *Candidatus Liberibacter solanacearum* en *Bactericera cockerelli* Sulc asociada con enfermedades en tomate, chile y papa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(3), 499-509.
- Mendoza-Herrera, A., Lévy, J., Harrison, K., Yao, J., Ibanez, F. & Tamborindeguy, C. (2018). Infection by 'Candidatus Liberibacter solanacearum' haplotypes A and B in *Solanum lycopersicum* 'Moneymaker'. *Plant Disease*, 102, 2009-2015. DOI: 10.1094/PDIS-12-17-1982-RE

- Munyaneza E. J., Sengoda G.V., Buchman L.J. y Fisher W.T. 2011. Effects of temperature on "*Candidatus Liberibacter solanacearum*" and Zebra Chip Potato Disease Symptom Development. *Plant Disease*. 10.1094/PDIS-03-11-0185.
- Munyaneza, J. E. (2013). *Candidatus liberibacter solanacearum*. EPPO bulletin, 43(2), 197-201.
- Munyaneza, 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>
- Nelson, W.R, Tonja, W.T., Fisher, & Munyaneza, J.E. (2011). Haplotypes of "*Candidatus Liberibacter solanacearum*" suggest long-standing separation. *European Journal of Plant Pathology*, 130, 5-12. DOI: [org/10.1007/s10658-010-9737-3](https://doi.org/10.1007/s10658-010-9737-3)
- Ontiveros G. 2012. Detección de '*Candidatus Liberibacter solanacearum*' en papa y tomate en los estados de Nuevo León y San Luis Potosí, México. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. Tesis de Maestría.
- Ontiveros-Guerra, J. G.; S. N. Ramírez-Barrón, L. A. Aguirre-Uribe, J. C. Chacón-Hernández, M. Sánchez-Vega, E. Cerna-Chávez, J. I. García-López, A. A. Neira-Vielma, H. I. Meléndez-Ortiz, and A. Hernández-Juárez. 2025. Effect of Gold Nanoparticles Against *Tetranychus urticae* and *Phytoseiulus persimilis* in Tomato. *Agronomy*. 15: 1684.
- Pan, X., Guo, X., Zhai, T., Zhang, D., Rao, W., Cao, F., & Guan, X. (2023). Nanobiopesticides in sustainable agriculture: developments, challenges, and perspectives. *Environmental Science: Nano*, 10(1), 41-61.
- 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.
- 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>

- Pérez, W., Castillo Carrillo, C., Navarrete, I., Gamarra, H., Arango, E., Naccha, J. y Andrade-Piedra, J. L. 2021. Cartilla para la identificación de síntomas de la papa manchada (zebra chip). Serie: Plagas emergentes del cultivo de papa en Latinoamérica. Material de capacitación 2. Centro Internacional de la Papa (CIP), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA). Lima, Perú.
- Ragaei, M., & Hassan Sabry, A. 2014. NANOTECHNOLOGY FOR INSECT PEST CONTROL. In *International Journal of Science* (Vol. 3, Issue 2).
- Rahman, A., Pittarate, S., Perumal, V., Rajula, J., Thungrabeab, M., Mekchay, S. y Krutmuang, P. (2022). Larvicidal and antifeedant effects of copper nano-pesticides against *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) and its immunological response. *Insects*, 13(11): 10-30.  
<https://doi.org/10.3390/insects13111030>.
- Rai, M., Kon, K., Ingle, A., Duran, N., Galdiero, S., & 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>
- 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>
- Rivero-Montejo, S. D. J. (2023). Aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) para el manejo de enfermedades virales en Chile.
- Rojas-Martínez, R.I., Camacho-Tapia, M., Zavaleta, M.E. & Lévy, J. (2016). First report of the presence of haplotypes A and B of *Candidatus Liberibacter solanacearum* in chili (*Capsicum annuum* L.) in the Central Region of Mexico. *Journal of Plant Pathology*, 98, 111-115.

- Roque-Enriquez, A., J. C. Delgado-Ortiz, M. Beltrán-Beache, Y. M. Ochoa-Fuentes, and E. Cerna-Chávez. 2021. Parámetros agronómicos del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) inoculado con "*Candidatus Liberibacter solanacearum*" y tratados con fosfitos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8: e2552.
- Rubio, C.O., I.H. Almeida, J. Ireta, J.A. Sánchez, R. Fernández, J. T. Bordon, C. Diaz, J.A. Garzón, R. Rocha y M. Cadena (2006). Distribución de la punta morada y *Bactericera cockerelli* Sulc. en las principales zonas productoras de papa en México. *Agricultura Técnica en México* 32: 201-211.
- Ruiz-Aguilar, M.Y., L. A. Aguirre-Uribe, S. N. Ramírez-Barrón, Y. C. Pérez-Luna, E. Castro-del Ángel, and A. Hernández-Juárez. 2025. Insecticidal efficacy of zinc oxide and silicon dioxide nanoparticles against larvae of *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Exp. Nanosci.* 20: 2466532.
- 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).
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación). 2001. Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Norma Oficial Mexicana NOM–081–FITO–2001, Manejo y eliminación de focos de infestación de plagas, mediante el establecimiento o reordenamiento de fechas de siembra, cosecha y destrucción de residuos.
- 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 worms. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. (61):61-68.
- 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>
- 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.
- 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.
- Tanaka, F.A.O., Colleta, F.H.D., Alves, K.C.S., Spinelli, M.O., Machado, M.A. & Kitajima, E.W. (2007). Detection of the "*Candidatus Liberibacter americanus*" in phloem vessels of experimentally infected *Catharanthus roseus* by scanning electron microscopy. *Fitopatologia Brasileira*, 36, 519-520. DOI: 10.1590/S0100-41582007000600013.
- Teresani, G.R., Bertolini, E., Alfaro, F.A., Martínez, C., Tanaka, F.A.O. & Kitajima, E.W., (2014). Association of '*Candidatus Liberibacter solanacearum*' with a vegetative disorder of celery in Spain and development of a Real-Time PCR method for its detection. *Phytopathology*, 104, 804-811. DOI: 10.1094/phyto-07-13-0182-r 23.
- Vega-Gutiérrez, M. T., Rodríguez-Maciel, J. C., Díaz-Gómez, O., Bujanos-Muñiz, R., Mota-Sánchez, D., Martínez-Carrillo, J. L., ... & Garzón-Tiznado, J. A. (2008). Susceptibilidad a insecticidas en dos poblaciones mexicanas del salerillo, *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae). *Agrociencia*, 42(4), 463-471.
- Villanueva-Segura, O. K. 2015. Caracterización molecular del receptor de la Vitelogenina en *Bactericera cockerelli* [Sulc, 1909] (Hemiptera: Triozidae). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- 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>

- 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). *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 7:503-512.
- Wen, A., Mallik, I., Alvarado, V. Y., Pasche, J. S., Wang, X., Li, W., ... & Gudmestad, N. C. (2009). Detection, distribution, and genetic variability of '*Candidatus Liberibacter*' species associated with zebra complex disease of potato in North America. *Plant Disease*, 93(11), 1102-1115.
- Wulff, N.A., Zhang, S., Setubal, J.C., Almeida, N.F., Martins, E.C., Harakava, R., Kumar, D., Rangel, L.T., Foissac, X., Bove, J.M., Gabriel, D.W., 2014. The complete genome sequence of '*Candidatus Liberibacter americanus*', associated with Citrus huanglongbing. *Mol Plant Microbe Interact* 27, 163-176.
- 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>
- Zavala-Zapata, V., Ramírez-Barrón, S. N., Sánchez-Borja, M., Aguirre-Uribe, L. A., Delgado-Ortiz, J. C., Sánchez-Peña, S. R., ... & Hernández-Juárez, A. (2024). Insecticide efficacy of green synthesis silver nanoparticles on *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Insects*, 15(7), 469.
- 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
- Zhang S., H. Gao, and G. Bao. 2015. Physical principles of nanoparticle cellular endocytosis. *ACS Nano*.9:8655-8671.