



Ninfas de tercer estadio de *Bactericera cockerelli* sulc. (Hemiptera: Trioizidae).



Insecto adulto de *Bactericera cockerelli* sulc. (Hemiptera: Trioizidae)

Imágenes de Alberto Roque Enriquez

Mortalidad de ninfas de *Bactericera cockerelli* por ingredientes activos químicos potencializados con nanopartículas de grafito

Mortality of *Bactericera Cockerelli* nymphs by active chemical ingredients enhanced with graphite nanoparticles

Alberto Roque-Enriquez, Rocío de Jesús Díaz-Aguilar, Yisa María Ochoa-Fuentes, Ernesto Cerna-Chávez*

RESUMEN

El insecto *Bactericera cockerelli* es una de las plagas más importantes en México en cultivos de solanáceas. Su control y manejo regularmente es mediante ingredientes activos químicos. Actualmente, en la agricultura, se busca mejorar la eficiencia de los insecticidas logrando un bajo impacto ambiental, pero con alta efectividad. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la mortalidad de ninfas de *B. cockerelli*, mediante bioensayos *in vitro*, con ingredientes activos químicos mezclados con nanopartículas de grafito. Los bioensayos se realizaron bajo condiciones de laboratorio, donde se evaluó el efecto de los insecticidas imidacloprid, lambda cialotrina y dimetoato, solos y combinados con nanografito, contra ninfas del insecto *B. cockerelli*. Las CL_{50} de las combinaciones imidacloprid-nanografito, lambda cialotrina-nanografito y dimetoato-nanografito fueron de 1.96 mg/L, 13.85 mg/L y 57.31 mg/L, respectivamente, alcanzando mortalidades por encima del 90 % en todos los insecticidas. Las CL_{50} de los ingredientes activos solos fueron de 103.07 mg/L, 285.52 mg/L y 492.35 mg/L, para los mismos insecticidas. Las nanopartículas de grafito potenciaron 52.34, 20.60 y 8.59 veces, el efecto letal respecto a los productos solos. La combinación de insecticidas con nanopartículas de grafito, mostró una alta efectividad en las mortalidades contra las ninfas de *B. cockerelli*, en comparación con los productos solos, por lo que representan una alternativa de control prometedor al reducir las dosis de aplicación.

PALABRAS CLAVE: potenciación, nanoformulados, paratrioza, pesticidas, sinergia.

ABSTRACT

Bactericera cockerelli is one of the most important pests in Mexico in solanaceous crops. Their control and management are typically achieved through chemical active ingredients. Currently, in agriculture, efforts are being made to improve the efficiency of insecticides achieving low environmental impact and high effectiveness. The objective of this research was to evaluate the mortality of *B. cockerelli* nymphs using *in vitro* bioassays with chemical active ingredients mixed with graphite nanoparticles. The bioassays were conducted under laboratory conditions, where the effect of three insecticides: imidacloprid, lambda cyalothrin, and dimethoate, alone and in combination with nano-graphite, against *B. cockerelli* nymphs was evaluated. The LC_{50} of the imidacloprid-nanographite, lambda cyalothrin-nanographite, and dimethoate-nanographite combinations were 1.96 mg/L, 13.85 mg/L, and 57.31 mg/L, respectively, achieving mortality rates above 90 % for all insecticides. The LC_{50} of the active ingredients alone were 103.07 mg/L, 285.52 mg/L, and 492.35 mg/L for the same insecticides. The graphite nanoparticles enhanced the lethal effect 52.34, 20.60, and 8.59 times more than the products alone. The combination of insecticides with graphite nanoparticles showed high effectiveness in mortality against *B. cockerelli* nymphs, compared to the products alone, and represents a promising control alternative by reducing application rates.

KEYWORDS: potentiation, nanoformulations, paratrioza, pesticides, synergy.

*Correspondencia: jabaly1@yahoo.com/ Fecha de recepción: 10 de enero de 2025/ Fecha de aceptación: 8 de abril de 2025/ Fecha de publicación: 10 de abril de 2025.

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología, Calzada Narro núm. 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315.

INTRODUCCIÓN

El insecto *B. cockerelli* (Sulc) (Hemíptera: Trio- zidae), conocido comúnmente como paratrio- za, pulgón saltador o salerillo, es una plaga que a lo largo de los años sigue generando da- ños importantes en los cultivos de solanáceas en el mundo (Butler y Trumble, 2012; Ville- gas-Rodríguez y col., 2014; Tucuch-Haas y col., 2020). La enfermedad del “amarillamiento del psílido” se relaciona históricamente al insecto *B. cockerelli*, y es causada al inyectar una toxina al floema de la planta a través de su sa- liva, como parte de su forma de alimentación, desde el estadio de ninfa hasta la etapa de adulto, lo que genera la infección; provocan- do aborto floral, clorosis, retraso de crecimien- to, y en algunos casos muerte de la planta. Es vinculado como vector de la bacteria *Candi- datus* *Liberibacter solanacearum* que daña se- veramente cultivos de solanáceas (Liu y Trum- ble, 2006; Munyaneza, 2013; Olaniyan y col., 2020; Rivera-Martínez y col., 2020).

En México, este psílido se asocia a grandes pérdidas económicas en producción de sola- náceas como papa (*Solanum tuberosum* L.), tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y chile (*Cap- sicum* spp), siendo la última especie la pre- ferida del insecto (Ramírez-Dávila y col., 2012; EPPO, 2014; Trujillo-García y col., 2018), por lo que sus plantas presentan un mayor daño y disminución de su producción (Lozano-Gu- tiérrez y col., 2018). Aun así, el cultivo de chile es uno de los productos agrícolas de mayor importancia en México, ocupando entre el se- gundo y cuarto lugar de producción a nivel mundial (SADER, 2024). A nivel nacional se producen alrededor de 3 millones 237 000 T, siendo los principales estados productores Si- naloa con 751 000 T, Chihuahua con 701 000 T y Zacatecas con 480 694 T, representando un 59.7 % del volumen nacional, de acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pes- quero (SIAP, 2024).

Los métodos de control para el insecto care- cen de eficiencia, al no considerar las agru- paciones y propagación dentro de la parcela que permita focalizarlas; los productos más

utilizados por los productores son los insecc- tidas químicos, aunque los agricultores de- tectan que su efectividad no es satisfactoria, por varios factores, como eficiencia de apli- cación, entre otros (Vega-Gutiérrez y col., 2008; Ramírez-Dávila y col., 2012). Por otro lado, la toxicidad y presencia en el medio ambiente de los ingredientes activos químicos ha gene- rado preocupación, ya que aproximadamente, más del 90 % de los insecticidas formulados que se comercializan no desempeñan sus efec- tos por diferentes circunstancias, como la degradación, volatilización y lixiviación. Esto conlleva a que los insecticidas se apliquen en concentraciones más altas para asegurar su efecto por un periodo idóneo y contrarres- tar las pérdidas (Mogul y col., 1996; Xiang y col., 2014).

El grafito es un material tridimensional de carbono construido por un gran número de placas superpuestas de cristales de grafeno débilmente unidas. El grafeno se obtiene a partir del grafito, es un material bidimensio- nal de carbono que consiste en una sola ca- pa de átomos de carbono organizados en una estructura de periodo hexagonal (Rodríguez y Kharissova, 2008; Behbudi, 2020). Las nano- partículas derivadas del carbono, en general, han demostrado que tienen propiedades insecc- tidas. Se ha documentado que externa- mente afectan la integridad de la cutícula y la pigmentación. Internamente alteran la ex- presión genética, el metabolismo de proteínas, lípidos y carbohidratos, e incrementan las es- pecies reactivas de oxígeno y modifican la actividad bioquímica, además de que presen- tan también como característica el poder ser portadoras de ingredientes activos (Liu y col., 2009; Wang y col., 2019b).

El uso de nanopartículas, en combinación con ingredientes activos, se realiza con la finali- dad de que se superen las limitaciones que presentan los insecticidas convencionales, al garantizar la solubilidad del agua, dispersión más uniforme y velocidad de disolución. En- tre las ventajas de las nanoformulaciones des- tacan el bajo impacto ambiental y que permi-

ten realizar aplicaciones más seguras (Venugopal y Sainadh, 2016; Kumar y Kalita, 2017).

Las nanopartículas de grafito cuentan con propiedades únicas, las cuales destacan naturalmente de las imperfecciones de sus estructuras cristalinas y no han presentado problemas de toxicidad en cientos de años (Dziewięcka y col., 2021). Pueden usarse como aditivo de insecticidas para mejorar su eficiencia en la agricultura (Li y col., 2022). Las nanopartículas de carbono han demostrado alta tasa de afectación en diferentes insectos, por ejemplo, *Bemisia tabaci*, *Spodoptera frugiperda* y *Plutella xylostella*, registrando desde 30 % a 70 % de mortalidad sobre estos insectos (Wang y col., 2021; Chen y col., 2022; Lui y col., 2022). A menor tamaño de la partícula mayor será su toxicidad y son más eficientes al introducirse a los insectos (Wang y col., 2019a).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la tasa de mortalidad de ninfas de *Bactericera cockerelli* mediante bioensayos *in vitro* con ingredientes activos químicos mezclados con nanopartículas de grafito.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de las ninfas

Las ninfas de *B. cockerelli* se recolectaron en la zona productora de chile del estado de San Luis Potosí, México. Se tomaron hojas con ninfas del estrato medio de las plantas de chile serrano (*Capsicum annuum*), en etapa de fructificación, y se transportaron en una hielera para evitar la exposición a temperaturas extremas. El trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Toxicología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Saltillo, Coahuila, México.

Bioensayo

Se realizó en condiciones de laboratorio (temperatura de $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de 60 % y fotoperiodo de 14:10 h/luz: oscuridad) mediante la técnica del método de prueba de susceptibilidad del IRAC 002, versión 3 (IRAC, 2024). Las hojas con 30 a 50 ninfas del tercero al quinto estadio de *B. cockerelli*

se sumergieron durante 5 s en las diferentes concentraciones de los ingredientes activos químicos, solos o mezclados con nanopartículas de grafito. Para la determinación de las concentraciones se realizó una ventana biológica, que fue desde 1 mg/L a 10 000 mg/L. Los insecticidas evaluados fueron Muralla Max® (imidacloprid al 19.60 %), Karate Zeon® (lambda cyaotrina 5.51 %) y Deltapir® (dime-toato 38.50 %) a concentraciones de 10 mg/L, 100 mg/L, 500 mg/L, 1 000 mg/L, 2 000 mg/L, 3 000 mg/L solos o adicionados con nanopartículas de grafito (80 nm a 200 nm) al 1 %, 3 %, 5 % y 10 %, respectivamente (proporcionadas por la empresa CULTA S. A. DE C. V.®). Cada tratamiento contó con tres repeticiones, un testigo absoluto y un testigo con nanopartículas de grafito, a los porcentajes antes mencionados. A todos los tratamientos se les adicionó tween 20 como adherente. Las hojas tratadas se dejaron secar sobre papel filtro durante 3 s (Whatman™, modelo: 17199048, China), y posteriormente se colocaron con papel húmedo en cajas Petri.

Evaluación de la mortalidad

La mortalidad se evaluó a las 24 h con la ayuda de un microscopio estereoscopio binocular 32X (Carl Zeiss Microlmaging GmbH 37081, Gottingen, Alemania). Para considerar ninfas muertas, los criterios de mortalidad fueron aquellas ninfas con cambio de coloración café marrón o consistencia lechosa, deshidratadas y que no respondieron al estímulo de un pincel.

El bioensayo se realizó con un diseño de máxima verosimilitud (finnex) (medida de la tendencia de la evolución de dos variables). A los resultados se les aplicó la corrección de mortalidad mediante la fórmula de Henderson y Tilton (1955) (basada en la comparación de la mortalidad inducida por el tratamiento, respecto al testigo).

Análisis estadístico

Las mortalidades obtenidas se analizaron usando análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias mediante la prueba Tukey ($P \geq 0.05$), utilizando el programa estadístico

(Statistical Analysis System) SAS, versión 9.1. La desviación estándar se definió mediante la raíz cuadrada de la varianza.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis dosis-respuesta Probit para determinar la CL_{50} mediante el programa SAS versión 9.1, lo que permitió calcular el grado de sinergismo. La relación de sinergia (RS) se calculó dividiendo la CL_{50} del ingrediente ac-

tivo químico entre la CL_{50} de la combinación del insecticida con nanopartículas de grafeno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tratamiento de ninfas de *B. cockerelli* con nanopartículas de grafito a concentraciones de 5 % y 10 %, sin insecticidas, registraron mortalidades de 27.0 % y 41.2 %, respectivamente (Tabla 1). Estos resultados indicaron que, las nanopartículas tuvieron efecto letal en los

■ Tabla 1. Mortalidad después de 24 h de ninfas *B. cockerelli* expuestas a nanopartículas de grafito e insecticidas imidacloprid, lambda cyalotrina y dimetoato solos y combinados.

Table 1. Mortality after 24 hours of nymphs of *B. cockerelli* exposed to graphite nanoparticles and insecticides imidacloprid, lambda cyalothrin and dimethoate alone and in combination.

Concentración de insecticida (mg/L)	Nanopartículas de grafito (%)				
	Control	1	3	5	10
Imidacloprid*					
Control	0.00 ± 0.0	6.3 ± 3.03 ^{gD}	8.5 ± 1.81 ^{gC}	27.0 ± 0.86 ^{gB}	41.2 ± 4.65 ^{gA}
10	35.1 ± 3.32 ^{fC}	30.6 ± 4.83 ^{fE}	31.8 ± 5.10 ^{fD}	55.9 ± 1.56 ^{fB}	66.4 ± 1.08 ^{fA}
100	40.7 ± 1.86 ^{eD}	38.5 ± 2.32 ^{eE}	41.1 ± 2.20 ^{eC}	63.3 ± 0.59 ^{eB}	79.7 ± 0.07 ^{eA}
500	56.9 ± 0.04 ^{dE}	63.2 ± 0.05 ^{dD}	65.1 ± 0.03 ^{dC}	77.6 ± 0.01 ^{dB}	82.8 ± 0.01 ^{dA}
1 000	75.6 ± 0.90 ^{cC}	68.5 ± 0.30 ^{cE}	73.5 ± 0.45 ^{cD}	82.8 ± 0.14 ^{cB}	85.8 ± 0.01 ^{cA}
2 000	78.8 ± 1.27 ^{bE}	81.91 ± 1.74 ^{bD}	84.6 ± 1.68 ^{bC}	88.3 ± 0.45 ^{bB}	93.6 ± 0.24 ^{bA}
3 000	82.0 ± 1.72 ^{aE}	87.7 ± 2.67 ^{aD}	90.3 ± 2.57 ^{aC}	92.4 ± 0.79 ^{aB}	100 ± 0.66 ^{aA}
Lambda cyalotrina*					
Control	0.00 ± 0.0	6.3 ± 3.03 ^{gD}	8.5 ± 1.81 ^{gC}	27.0 ± 0.86 ^{gB}	41.2 ± 4.65 ^{gA}
10	21.6 ± 6.12 ^{fE}	24.2 ± 5.21 ^{fD}	40.3 ± 3.76 ^{fC}	43.9 ± 2.98 ^{fB}	55.4 ± 1.63 ^{fA}
100	25.7 ± 4.23 ^{eE}	27.9 ± 3.70 ^{eD}	50.8 ± 1.35 ^{eC}	55.3 ± 0.84 ^{eB}	58.1 ± 1.21 ^{eA}
500	53.6 ± 0.04 ^{dD}	33.7 ± 1.95 ^{dE}	61.1 ± 0.22 ^{dC}	72.9 ± 0.03 ^{dA}	70.8 ± 0.09 ^{dB}
1 000	70.0 ± 1.53 ^{cE}	73.3 ± 1.84 ^{cD}	83.5 ± 0.72 ^{cB}	76.9 ± 0.17 ^{cC}	91.3 ± 0.70 ^{cA}
2 000	74.6 ± 2.27 ^{bE}	86.8 ± 4.47 ^{bC}	92.9 ± 1.81 ^{bA}	84.4 ± 0.69 ^{bD}	92.2 ± 0.78 ^{bB}
3 000	76.1 ± 2.55 ^{aE}	87.2 ± 4.55 ^{aD}	93.4 ± 1.89 ^{aB}	91.5 ± 1.47 ^{aC}	93.6 ± 0.91 ^{aA}
Dimetoato*					
Control	0.00 ± 0.0	6.3 ± 3.03 ^{gD}	8.5 ± 1.81 ^{gC}	27.0 ± 0.86 ^{gB}	41.2 ± 4.65 ^{gA}
10	21.6 ± 5.78 ^{fE}	22.5 ± 5.73 ^{fD}	26.5 ± 6.62 ^{fC}	33.6 ± 4.89 ^{fB}	36.4 ± 5.10 ^{fA}
100	30.4 ± 2.38 ^{eD}	27.6 ± 3.54 ^{eE}	31.3 ± 4.51 ^{eC}	37.0 ± 3.70 ^{eB}	43.1 ± 2.96 ^{eA}
500	51.7 ± 0.02 ^{dD}	48.8 ± 0.02 ^{dE}	61.9 ± 0.02 ^{dC}	65.1 ± 0.00 ^{dB}	72.3 ± 0.05 ^{dA}
1 000	54.5 ± 0.11 ^{cE}	64.4 ± 0.78 ^{cD}	81.3 ± 1.68 ^{cC}	83.6 ± 1.29 ^{cB}	86.3 ± 1.00 ^{cA}
2 000	75.7 ± 2.70 ^{bD}	74.2 ± 2.17 ^{bE}	85.9 ± 2.41 ^{bC}	87.3 ± 1.79 ^{bB}	91.3 ± 1.61 ^{bA}
3 000	79.2 ± 3.40 ^{aE}	84.8 ± 4.29 ^{aD}	88.7 ± 2.89 ^{aC}	92.3 ± 2.57 ^{aB}	95.8 ± 2.24 ^{aA}

*Se reporta el porcentaje de mortalidad y la desviación estándar.

^{a, b, c}Letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$) entre concentraciones de insecticida (hileras) para un mismo nivel de nanopartículas de grafito (columnas).

^{A, B, C}Letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$) entre concentraciones de nanopartículas de grafito (columnas) para un mismo nivel de insecticida (columnas).

organismos, pero solo alcanzaron a inducir menos del 50 % de mortalidad.

El tratamiento con 1 % de concentración de nanopartículas de grafito evaluado en este estudio, presentó un comportamiento de mortalidad (6.3 %) similar al óxido de grafeno (GO, por sus siglas en inglés: graphane oxide), con una baja tasa de mortalidad (3.33 %) sobre el barrenador asiático del maíz, cuando fue tratado con el compuesto solo (25 µg/mL), el cual se incrementó al combinarlo con imidacloprid, reportando mortalidades del 26.37 % al 72.6 %, demostrando su sinergia, bajo condiciones de laboratorio (Wang y col., 2019a).

La combinación de las nanopartículas de grafito con los tres insecticidas estudiados, mostró un incremento significativo en su eficiencia letal (Tabla 1). Los tratamientos de 500 mg/L, en todos los ingredientes activos, presentaron mortalidades por encima del 50 % (a excepción de lambda cyalotrina y dimetoato, ambos con una concentración al 1 % de nanopartículas de grafito); y todos los tratamientos de 2 000 mg/L y 3 000 mg/L indujeron mortalidades por encima del 70 %, incluido el control, y al 90 % en todas las concentraciones del 10 % de grafito. También se registró un 90 % de mortalidad en las concentraciones del 3 % y 5 % de grafito a 3000 mg/L (a excepción de dimetoato al 3 % de grafito).

El ingrediente activo clorpirifos registró mortalidades en condiciones de laboratorio del 23.67 % al 42.33 % contra el ácaro *Tetranychus truncatus*, mientras que, combinado con óxido de grafeno aumentó la mortalidad de 41.67 % a 86.33 % (Wang y col., 2019b). En el caso del gusano cogollero de la cápsula de algodón, alimentado con GO, se redujo la esperanza de vida en hembras y machos (Li y col., 2022). El uso de grafeno (en su forma no oxidada) combinado con lambda cyalotrina en una relación 3/1 (grafeno-insecticida) indujo una mortalidad del 62.91 % contra el tercer estadio del gusano de la cápsula de algodón, superior a la de ambos compuestos en forma individual. Su acción se asoció con el efecto

causado sobre las células espinosas de la epicutícula del gusano, incrementando la permeabilidad y, por ende, su toxicidad (Chen y col., 2022). Wang y col. (2021), observaron bajo condiciones controladas, la eficacia de moléculas de biocarbón desarrolladas en el laboratorio, cargadas con conidios *Cordyceps fumosorosea*, mediante su inmersión en suspensiones con concentraciones de 10 ppm, 20 ppm, 50 ppm y 100 ppm de conidios, contra *Bemisia tabaci*, registrando mortalidades acumuladas a los 7 d por encima del 90 % para ninfas del segundo, tercer estadio y pupas con valores de CL_{50} de las nanopartículas de 6.80 ppm, 7.45 ppm y 8.64 ppm, respectivamente. Estos estudios muestran que, las partículas derivadas de carbono son candidatas prometedoras en el ámbito biológico, para utilizarse en la agricultura como aditivo de pesticidas, por su versatilidad y gran potencial al mejorar su efectividad (Li y col., 2022).

Dosis letal CL_{50}

La CL_{50} registrada solo para imidacloprid fue de 103.07 mg/L, la cual mostró la mayor tasa de mortalidad de los tres insecticidas, aplicados sin las nanopartículas de grafito. De la misma manera, al combinarse con 5 % y 10 % de nanopartículas de grafito, este activo químico, presentó las concentraciones CL_{50} más bajas (8.75 mg/L y 1.96 mg/L, respectivamente); con una relación de sinergia (RS) de 11.77 veces y 52.34 veces, respectivamente, indicando la capacidad del grafito en nanopartículas para potenciar la efectividad del imidacloprid como insecticida (Tabla 2). Las CL_{50} registrada para lambda cyalotrina, aplicada sola a ninfas de *B. cockerelli* fue de 285.52 mg/L. Su eficacia se incrementó notablemente a partir de su combinación con 3 % de nanopartículas de grafito (48.10 mg/L) y alcanzó su máxima efectividad al combinarse con 10 % (13.85 mg/L), con una RS de 20.60 veces (Tabla 3). El dimetoato-grafito presentó la menor tasa de letalidad contra las ninfas de *B. cockerelli* con una dosis CL_{50} de 492.35 mg/L cuando se aplicó sólo el insecticida, y alcanzando únicamente una dosis de CL_{50} de 57.31 mg/L al combinarse con 10 % de nano-

- Tabla 2. Dosis letal (CL_{50} ; 24 horas) en ninfas de *B. cockerelli* del imidacloprid a diferentes concentraciones de nanopartículas de grafito.

Table 2. Lethal dose (LC_{50} ; 24 hours) in *B. cockerelli* nymphs of imidacloprid at different concentrations of graphite nanoparticles.

Concentraciones de grafito (%)	CL_{50} (mg/L)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P-valor	RS
Control	103.071	17.167	275.943	$Y = -1.124 + 0.558$	< 0.000 1	
1	119.795	31.430	279.446	$Y = -1.364 + 0.656$	< 0.000 1	0.8 x
3	94.984	24.779	217.677	$Y = -1.365 + 0.690$	< 0.000 1	1 x
5	8.753	2.151	20.912	$Y = -0.453 + 0.481$	< 0.000 1	11.77 x
10	1.969	7.698	18.989	$Y = -0.143 + 0.486$	0.000 1	52.34 x

CL_{50} : Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: relación de sinergia en valores de CL_{50} .

- Tabla 3. Dosis letal (CL_{50} ; 24 horas) en ninfas de *B. cockerelli* de lambda cyalotrina a diferentes concentraciones de nanopartículas de grafito.

Table 3. Lethal dose (LC_{50} ; 24 hours) in *B. cockerelli* nymphs of lambda cyalotrin at different concentrations of graphite nanoparticles.

Concentraciones de grafito (%)	CL_{50} (mg/L)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P-valor	RS
Control	285.528	102.086	666.100	$Y = -1.702 + 0.693$	< 0.000 1	
1	246.296	1.285	2404	$Y = -1.890 + 0.790$	0.001 5	1.15 x
3	48.105	1.063	178.533	$Y = -1.153 + 0.685$	< 0.000 1	5.93 x
5	30.914	13.314	55.956	$Y = -0.824 + 0.552$	< 0.0001	9.23 x
10	13.856	0.00265	76.517	$Y = -0.651 + 0.570$	0.000 2	20.60 x

CL_{50} : Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: Relación de sinergia en valores de CL_{50} .

partículas de grafito, representando una RS de 8.59 veces (Tabla 4).

La eficacia de las nanopartículas de carbono para reducir la dosis CL_{50} de diferentes insecticidas coincide con otros registros de la literatura. Wang y col. (2019a), reportaron que la actividad sinérgica del óxido de grafeno, en combinación con el insecticida imidacloprid, contra el insecto barrenador asiático del maíz, redujo la CL_{50} a 2.31 mg/L, exhibiendo una toxicidad de contacto de 1.83 veces. El óxido de grafeno sinérgicamente con el insecticida beta-ciflutrina, aplicado al ácaro *Tetranychus urticae*, documentó una CL_{50} de 2.06 mg/L y una RS de 1.50 veces (Wang y

col., 2019b). Batool y col. (2020), registraron que, al utilizar puntos cuánticos de grafeno como nanotransportadores, cargados con cisteína proteasa como insecticida contra *Tribolium castaneum* y *Rhyzopertha dominica*, redujeron el valor de CL_{50} a 0.759 mg/L y 0.771 mg/L, respectivamente. Wang y col. (2019b), evaluaron la mortalidad del ácaro *Tetranychus truncatus*, con el ingrediente clorpirifos en combinación con el óxido de grafeno, reportando una CL_{50} de ingrediente solo de 3.21 mg/L y del nanocompuesto de 2.07 mg/L, indicando que la CL_{50} bajó con la adición de óxido de grafeno, presentando una RS del nanocompuesto para el valor de CL_{50} , 1.55 veces en la actividad insecticida en re-

■ Tabla 4. Dosis letal (CL_{50} ; 24 horas) en ninfas de *B. cockerelli* de dimetoato a diferentes concentraciones de nanopartículas de grafito.

Table 4. Lethal dose (LC_{50} ; 24 hours) in *B. cockerelli* nymphs of dimethoate at different concentrations of graphite nanoparticles.

Concentraciones de grafito (%)	CL_{50} (mg/L)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P-valor	RS
Control	492.357	379.235	632.533	$Y = -2.637 + 0.979$	< 0.000 1	
1	282.487	79.330	773.191	$Y = -1.742 + 0.710$	< 0.000 1	1.74 x
3	133.004	28.661	341.736	$Y = -1.726 + 0.812$	< 0.000 1	3.70 x
5	84.670	9.691	249.654	$Y = -1.468 + 0.761$	< 0.000 1	5.81 x
10	57.316	7.589	158.969	$Y = -1.413 + 0.803$	< 0.000 1	8.59 x

CL_{50} : Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: Relación de sinergia en valores de CL_{50} .

lación con el producto solo. Liu y col. (2022), documentaron la nanoformulación de óxido de grafeno cargado con abamectina contra el insecto dorso de diamante (*Plutella xylostella*), registraron el valor de CL_{50} de 1.503 mg/L para la abamectina sola y una CL_{50} de 0.996 mg/L para abamectina cargada en óxido de grafeno.

Los resultados de este trabajo muestran que las nanopartículas derivadas del carbono presentan un prometedor potencial en el control de diferentes insectos, incluyendo el *B. cockerelli*, al reducir las dosis de los productos químicos.

CONCLUSIONES

Los tres insecticidas mostraron ser eficientes contra ninfas de *B. cockerelli* en el siguiente orden: imidacloprid, lambda cyalotrina y dimetoato. La combinación de los tres compuestos químicos con nanopartículas de grafito se incrementó notablemente a partir de

los tratamientos de 500 mg/L de insecticida al 3 % y 5 % de nanopartículas de grafito. La mejor combinación fue el insecticida imidacloprid-nanopartículas de grafito al 10 % con una dosis letal de 1.96 mg/L y una relación de sinergia de 52.34 %. Las nanopartículas de grafito mostraron ser una alternativa a considerar para incrementar el control de *B. cockerelli* mediante el uso de insecticidas.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada durante la realización de la estancia posdoctoral en el departamento de parasitología agrícola, dentro del laboratorio de toxicología, perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

DECLARACIÓN DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflicto de interés alguno.

REFERENCIAS

- Batool, M., Hussain, D., Akrem, A., Najam-ul-Haq, M., Saeed, S., Zaka, S. M., Nawaz, M. S., Buck, F., & Saeed, Q. (2020). Graphene quantum dots as cysteine protease nanocarriers against stored grain insect pests. *Scientific Reports*, 10(1), 3444. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60432-5>.
- Behbudi, G. (2020). Mini review of graphene oxide

for medical detection and applications. *Advances in Applied NanoBio-Technologies*, 1(3), 63-66.

Butler, C. D. & Trumble, J. T. (2012). Identification and impact of natural enemies of *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Trioziidae) in Southern California. *Journal of Economic Entomology*, 105(5), 1509-1519. <https://doi.org/10.1603/EC12051>.

- Chen, Z., Zhao, J., Liu, Z., Bai, X., Li, W., Guan, Z., Zhou, M., & Zhu, H. (2022). Graphene-Delivered Insecticides against Cotton Bollworm. *Nanomaterials*, 12(16), 2731. <https://doi.org/10.3390/nano1216273>.
- Dziewięcka, M., Pawlyta, M., Majchrzycki, Ł., Balin, K., Barteczko, S., Czerkawska, M., & Augustyniak, M. (2021). The structure-properties-cytotoxicity interplay: A crucial pathway to determining graphene oxide biocompatibility. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 5401. <https://doi.org/10.3390/ijms22105401>.
- EPPO, Organización Europea y Mediterránea de Protección de las Plantas (2014). *Bactericera cockerelli* PARZCO. [En línea]. Disponible en: <http://www.eppo.int>. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2024.
- Henderson, C. F. & Tilton, E. W. (1955). Tests with acaricides against the brown wheat mite. *Journal of Economic Entomology*, 48(2), 157-161.
- IRAC, Insecticide Resistance Action Committee (2024). Modes de action. [En línea]. Disponible en: <https://irac-online.org/methods/psylla-spp-all-stages/>. Fecha de consulta: 8 de enero de 2025.
- Kumar, D. & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/foods6010008>.
- Li, C., Hu, C., Zhi, J., Yue, W., & Li, H. (2022). Effects of nano-graphene oxide on the growth and reproductive dynamics of *Spodoptera frugiperda* based on an age-stage, two-sex life table. *Insects*, 13(10), 929. <https://doi.org/10.3390/insects13100929>.
- Liu, J., Luo, Y., Jiang, X., Sun, G., Song, S., Yang, M., & Shen, J. (2022). Enhanced and sustained pesticidal activity of a graphene-based pesticide delivery system against the diamondback moth *Plutella xylostella*. *Pest Management Science*, 78(12), 5358-5365. <https://doi.org/10.1002/ps.7158>.
- Liu, D. & Trumble, J. T. (2006). Ovipositional preferences, damage thresholds, and detection of the tomato-potato psyllid *Bactericera cockerelli* (Homoptera: Psyllidae) on selected tomato accessions. *Bulletin of Entomological Research*, 96(2), 197-204. <https://doi.org/10.1079/BER2005416>.
- Liu, X., Vinson, D., Abt, D., Hurt, R. H., & Rand, D. M. (2009). Differential toxicity of carbon nanomaterials in *Drosophila*: larval dietary uptake is benign, but adult exposure causes locomotor impairment and mortality. *Environmental Science & Technology*, 43(16), 6357-6363.
- Lozano-Gutiérrez, J., Chávez-Brizuela, A., Lara-Herrera, A., España-Luna, M. P., Balleza-Cadengo, J. D. J. y Hernández-Muñoz, C. A. (2018). Poblaciones de *Bactericera cockerelli* Sulc. 1909 (HEMIPTERA: PSILLIDAE) en 50 cultivares de chile (*Capsicum annum* L.) en Morelos, Zacatecas, México, 5, 354-357. <https://doi.org/10.48779/ba80-a717>.
- Mogul, M. G., Akin, H., Hasirci, N., Trantolo, D. J., Gresser, J. D., & Wise, D. L. (1996). Controlled release of biologically active agents for purposes of agricultural crop management. *Resources, Conservation and Recycling*, 16(1-4), 289-320. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00063-1).
- Munyanza, J. E. (2013). *Bactericera cockerelli*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=289067>. Fecha de consulta: 8 de diciembre de 2024.
- Olanian, O., Rodríguez-Gasol, N., Cayla, N., Michaud, E., & Wratten, S. D. (2020). *Bactericera cockerelli* (Sulc), a potential threat to China's potato industry. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(2), 338-349. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62754-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62754-1).
- Ramírez-Dávila, J. F., Porcayo-Camargo, E. y Sánchez-Pale, J. R. (2012). Análisis de la distribución espacial de *Bactericera Cockerelli* Sulc (HEMIPTERA: TRIOZIDAE) en *Solanum Tuberosum* L. En *Donato Guerra México*, 12(1), 12-24. <https://hdl.handle.net/10893/4083>.
- Rivera-Martínez, R., Ramírez-Dávila, J. F., Martínez-Quiroz, M. y González-Huerta, A. (2020). Modelización espacial de ninfas de *Bactericera cockerelli* Sulc. en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) por medio de técnicas geoestadísticas. *Biotecnia*, 22(1), 142-152. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>.
- Rodríguez, G. C. y Kharissova, O. V. (2008). Propiedades y aplicaciones del grafeno. *Ingenierías*, 11 (38), 17-23.
- SADER, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2024). México, entre los principales productores de chile verde en el mundo: agricultura. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura>. Fecha de consulta: 19 de noviembre de 2024.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquero (2024). Principales estados productores de chile verde en México: agricultura. [En línea]. Disponible en: siap.gob.mx/cierreagricola/. Fecha de consulta: 18 de noviembre de 2024.

- Trujillo-García, J., Lozano-Gutiérrez, J., España-Luna, M. P., Lara-Herrera, A. y Balleza-Cadengo, J. J. (2018). Parasitismo de *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Psyllidae) en dos cultivares de chile guajillo en invernadero. *Entomología Mexicana*, 5, 160-163. <https://doi.org/10.48779/xm0m-w095>.
- Tucuch-Haas, J. I., Silva-Aguayo, G., & Rodríguez-Maciel, J. C. (2020). Oviposition of *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae) on *Capsicum chinense* (Jacq) treated with spiromesifen or spirotetramat. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 43(3), 317-323. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.317>.
- Vega-Gutiérrez, M. T., Rodríguez-Maciel, J. C., Díaz-Gómez, O., Bujanos-Muñiz, R., Mota-Sánchez, D., Martínez-Carrillo, J. L. y Garzón-Tiznado, J. A. (2008). Susceptibilidad a insecticidas en dos poblaciones mexicanas del salerillo, *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae). *Agrociencia*, 42(4), 463-471. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v42n4/v42n4a9.pdf>.
- Venugopal, N. V. S. & Sainadh, N. V. S. (2016). Novel polymeric nanoformulation of Mancozeb-An eco-friendly nanomaterial. *International Journal of Nanoscience*, 15(04), 1650016. <https://doi.org/10.1142/S0219581X16500162>.
- Villegas-Rodríguez, F., Marín-Sánchez, J., Delgado-Sánchez, P., Torres-Castillo, J. A., & Alvarado-Gómez, O. G. (2014). Management of *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae) in greenhouses with entomopathogenic fungi (Hypocreales). *Southwestern Entomologist*, 39(3), 613-624. <https://doi.org/10.3958/059.039.0320>.
- Wang, X., Xu, J., Sun, T., & Ali, S. (2021). Synthesis of Cordyceps fumosorosea-biochar nanoparticles and their effects on growth and survival of *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Frontiers in Microbiology*, 12, 630220. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.630220>.
- Wang, X., Xie, H., Wang, Z., & He, K. (2019b). Graphene oxide as a pesticide delivery vector for enhancing acaricidal activity against spider mites. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 173, 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.10.010>.
- Wang, X., Xie, H., Wang, Z., He, K., & Jing, D. (2019a). Graphene oxide as a multifunctional synergist of insecticides against lepidopteran insect. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 75-84. <https://doi.org/10.1039/C8EN00902C>.
- Xiang, Y., Wang, M., Sun, X., Cai, D., & Wu, Z. (2014). Controlling pesticide loss through nanonetworks. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(4), 918-924.