



FITONANOPARTÍCULAS BIMETÁLICAS DE *Crotalaria longirostrata* Y SU EFECTO ACARICIDA SOBRE *Tetranychus urticae* †

[BIMETALLIC PHYTONANOPARTICLES of *Crotalaria longirostrata* AND THEIR ACARICIDAL ACTIVITY ON *Tetranychus urticae*]

Eugenia León-Jiménez¹, Marcos Cua-Basulto¹, René Garruña-Hernández², Federico Gutiérrez-Micelli³, Daniel González-Mendoza⁴, Horacio Ballina-Gómez¹, Angel Herrera-Gorocica¹ and Esaú Ruiz-Sánchez^{1*}

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal. Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Email: esau.ruiz@itconkal.edu.mx

²CONAHCYT. Instituto Tecnológico de Conkal. Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán. México.

³Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Km 29020. Carretera Panamericana 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

⁴ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera a Delta S/N C.P. 21705 Ejido Nuevo León, Baja California, México.

*Corresponding author

SUMMARY

Background. *Tetranychus urticae* Koch is a species of phytophagous mites with wide importance in the production of fruit and horticultural crops, as well as ornamental species. A strategy that can contribute successfully to the management of mites is the use of metallic phytonanoparticles (NPs) synthesized from plant extracts. **Objective.** To evaluate the acaricidal effect of chipilín (*Crotalaria longirostrata*) bimetallic NPs on *T. urticae* and its phytotoxic activity in eggplants (*Solanum melongena*). **Methodology.** To evaluate mortality, groups of mites were exposed to eggplant leaf discs treated with (NPs), and mortality was recorded at 48 and 96 h. To evaluate the quantum efficiency of chlorophyll, photochemical parameters were measured in the leaves of eggplant plants 40 days after emergence. **Results.** The NPs of Cu-Zn at concentrations of 100 and 150 ppm caused more than 70% mortality in *T. urticae* adults, whereas the NPs of Ag-Zn at concentrations of 50, 100 and 150 ppm caused more than 80% mortality in *T. urticae* eggs. The application of bimetallic NPs from *C. longirostrata* did not cause toxic stress in eggplant plants, as the quantum efficiency of photosystem II was not affected. **Implication.** The use of *C. longirostrata* bimetallic NPs may be an alternative to the chemical acaricides for the management of *T. urticae*. **Conclusion.** The NPs of Cu-Zn and NPs of Ag-Zn produce more than 70% mortality in *T. urticae* adults and eggs.

Key words: Acaricide; ovicidal activity; plant extract; green synthesis.

RESUMEN

Antecedentes. *Tetranychus urticae* Koch, es una especie de ácaro fitófago de amplia importancia a nivel mundial en frutales, hortalizas y ornamentales. Una estrategia que puede contribuir con éxito para el manejo de ácaros es la utilización de fitonanopartículas (NPs) metálicas sintetizadas de extractos vegetales. **Objetivo.** Evaluar el efecto acaricida de las NPs bimetálicas de chipilín (*Crotalaria longirostrata*) sobre *T. urticae* y su actividad fitotóxica en plantas de berenjena (*Solanum melongena*). **Metodología.** Para evaluar la mortalidad, grupos de ácaros se expusieron a discos foliares de berenjena tratados con las NPs, y se registró la mortalidad a las 48 y 96 h. Para evaluar la eficiencia cuántica de la clorofila se midieron parámetros de fotoquímica en las hojas de plantas de berenjena de 40 días de emergencia. **Resultados.** Las NPs de Cu-Zn a concentraciones de 100 y 150 ppm causaron más de 70% de mortalidad en adultos de *T. urticae*, mientras que las NPs de Ag-Zn a concentraciones de 50, 100 y 150 ppm causaron más del 80% de mortalidad en huevos. La aplicación de las NPs bimetálicas de *C. longirostrata* no ocasionó estrés por toxicidad en plantas de berenjena, pues la eficiencia cuántica del fotosistema II no fue afectada. **Implicación.** El uso de NPs bimetálicas de *C. longirostrata* podría ser una alternativa a los acaricidas químicos para el manejo de *T. urticae*. **Conclusión.** Las NPs de Cu-Zn y Ag-Zn producen más del 70% de mortalidad en adultos y huevos de *T. urticae*. **Palabras clave:** Acaricida; actividad ovicida; extracto vegetal; síntesis verde.

† Submitted January 19, 2024 – Accepted January 28, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5412>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = H. Ballina-Gómez: <http://orcid.org/0000-0003-0245-3305>

INTRODUCCIÓN

La araña roja (*Tetranychus urticae*) es una de las plagas de mayor importancia a nivel mundial, ya que causa disminución en el rendimiento de diversos cultivos (Badawy *et al.*, 2018). *T. urticae* es la especie más importante de la familia Tetranychidae, ya que ataca a más de 1,100 especies vegetales de importancia hortícola, frutal y ornamental (Adesanya *et al.*, 2019), ocasionando daños en las hojas y frutos, donde reduce significativamente la resistencia estomática, la tasa fotosintética y respiratoria, así como el potencial productivo (Assouguem *et al.*, 2022). El control de *T. urticae* es una lucha continua, ya que posee la capacidad de desarrollar resistencia a los acaricidas químicos debido a su alta capacidad reproductiva y ciclo de vida corto (Díaz-Arias *et al.*, 2019). Derivado del amplio uso de acaricidas químicos, se ha documentado resistencia a 96 ingredientes activos en *T. urticae* (Adesanya *et al.*, 2021). Por lo anterior, es necesario utilizar nuevas alternativas de manejo que puedan sustituir el uso de acaricidas químicos convencionales (Rincón *et al.*, 2019).

El uso de la nanotecnología ha tenido un impacto reciente en el desarrollo de nuevos bioplaguicidas. En la última década se ha intensificado la investigación de nanopartículas metálicas sintetizadas a partir de extractos de plantas, debido a que pueden potencializar su efecto letal (Athanassiou *et al.*, 2018). Dependiendo del número de metales que constituyen las NPs pueden clasificarse como, mono, bi, tri o multimetálicas. Existen varios estudios que han demostrado el efecto de las fitonanopartículas bimetalicas en la mortalidad de varias especies de plagas. Por ejemplo, Méndez-Trujillo *et al.* (2019, 2022) observaron que NPs bimetalicas de Cu-Zn de *Prosopis juliflora* y *Crotalaria longirostrata* causaron entre 33-63% de mortalidad en *Phenacoccus solenopsis*. Sarhozaki *et al.* (2020) encontraron que las NPs de Zn de *Azadirachta indica* causaron más de 65% de mortalidad en huevos y ninfas de *Bemisia tabaci*. Por su parte, el efecto de las NPs en *T. urticae* no ha sido documentado en detalle, los pocos trabajos existentes han documentado alto potencial acaricida. Por ejemplo, las NPs de Ag sintetizadas a partir de *Glycine max* causaron mortalidades del 90-100% (Manoj y Patil, 2021). De igual manera, las nanoemulsiones a partir de aceites esenciales de *Callistemon viminalis*, *Origanum vulgare* y dos monoterpenos (limoneno y pulegona) causaron 100% de mortalidad en *T. urticae* (Badawy *et al.*, 2018).

El chipilín (*C. longirostrata*) es una Fabaceae nativa del sur de México, que contiene alcaloides tóxicos para diversos herbívoros que consumen su follaje, los componentes activos incluyen ácidos fenólicos (ácido gálico, cafeico y ferúlico), así como hidrocarburos, diterpenos, fenoles, alcaloides y alto contenido de

monocrotalina (Cruz-Rodríguez *et al.*, 2020). El uso de *C. longirostrata* podría ser una alternativa biorracional y amigable con el ambiente para el manejo de *T. urticae*, de tal manera que su uso para la síntesis de NPs contribuiría significativamente a la prospección de agentes biorracionales de manejo de plagas en la agricultura. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto acaricida de las fitonanopartículas bimetalicas de *C. longirostrata* en adultos y huevos de *T. urticae*, y su actividad fitotóxica en plantas de berenjena (*Solanum melongena*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Síntesis de de fitonanopartículas bimetalicas y preparación de tratamientos

Para la preparación del extracto acuoso de *C. longirostrata*, se colocaron 10 g de hojas secas en un matraz volumétrico y se añadieron 100 ml de agua destilada. Se calentó y mantuvo a 60 °C durante 20 minutos, posteriormente, la mezcla se filtró y centrifugó a 3000 rpm durante 15 minutos. El sobrenadante se usó para mezclar con las soluciones bimetalicas para llevar a cabo la síntesis de las NPs.

Las soluciones bimetalicas de cobre-zinc (Cu-Zn) y plata-zinc (Ag-Zn) se prepararon por separado, ambas a 10 mM. Las soluciones de Cu-Zn se prepararon utilizando sales de CuSO₄ y AgNO₃, y las de Ag-Zn se prepararon usando CuSO₄ y ZnSO₄ (Méndez-Trujillo *et al.*, 2019). Para la síntesis de las NPs se mezclaron 10 ml de extracto acuoso de *C. longirostrata* y 40 ml de la solución bimetalica correspondiente. Las mezclas se colocaron en una autoclave a 15 psi (120 °C) durante 15 minutos. Al finalizar la síntesis, se centrifugaron las fitonanopartículas a 3000 rpm durante 15 minutos y el sobrenadante se colocó en un matraz y se refrigeró. La síntesis de las nanopartículas bimetalicas se confirmó con análisis por microscopio electrónico de barrido (JEOL 64000; Tokio, Japón), donde se observó agregados esféricos con tamaños de 41 a 67 µm, esta sección del proceso de síntesis de NPs ha sido previamente reportado por el grupo de trabajo (Méndez-Trujillo *et al.*, 2022).

Los tratamientos fueron: control (agua destilada); extracto acuoso puro de *C. longirostrata* (10% p/v); solución bimetalica cobre-zinc a 10 mM (Sol. Cu-Zn) y solución bimetalica Ag-Zn a 10 mM (Sol. Ag-Zn). Las fitonanopartículas de cobre-zinc (NPs Cu-Zn) y fitonanopartículas de plata-zinc (NPs Ag-Zn) se evaluaron en tres concentraciones 50, 100 y 150 ppm. Las concentraciones se determinaron por colorimetría de acuerdo con el método empleado por Méndez-Trujillo *et al.* (2019).

Establecimiento de colonia de *T. urticae*

Se recolectó adultos *T. urticae* de plantas adultas de papaya (*Carica papaya* L.) establecidas en traspatio en el municipio de Conkal, Yucatán. Las colonias no habían sido expuestas a acaricidas. Las hojas infestadas con ácaros se fijaron con clips a la parte apical de plantas sanas de berenjena (*Solanum melongena* L.) de tres semanas de edad, establecidas en un invernadero con techo de plástico lechoso y paredes de malla antiáfidos, en el Instituto Tecnológico de Conkal. Las condiciones ambientales dentro del invernadero fueron: temperatura de 25-37°C, humedad relativa de 70-90 %, y fotoperiodo de 14 h luz:10 h oscuridad. Posterior a tres semanas de la infestación inicial de las hojas, se tuvieron colonias de *T. urticae* con individuos de diferentes estados de desarrollo para los bioensayos.

Evaluación de mortalidad de adultos de *T. urticae*

Para el ensayo de mortalidad en adultos de *T. urticae* se usó el método de inmersión foliar. Se cortaron discos foliares de berenjena (*Solanum melongena*) de 5 cm de diámetro y se sumergieron por 10 segundos en las soluciones correspondientes a cada tratamiento de manera individual. Como control se usó agua destilada. Después de la inmersión, los discos se secaron a temperatura ambiente por 30 minutos. La unidad experimental consistió en cajas Petri de 9 cm de diámetro por 1 cm de altura, donde los discos foliares se colocaron con el lado axial hacia arriba sobre algodón húmedo y los bordes de los discos foliares se cubrieron con algodón húmedo para evitar que los ácaros escaparan. En cada disco se transfirieron 20 adultos y se registró la mortalidad a las 48 y 96 horas después de la exposición. Los ácaros que no se movían después de ser tocados con un cepillo fino se consideraban muertos. Una caja Petri representó una repetición. Se evaluaron diez repeticiones por tratamiento (Cua-Basulto *et al.*, 2022).

Evaluación de actividad ovicida

Para el ensayo de mortalidad de huevos, 10 hembras adultas se transfirieron a discos de hojas de berenjena de 5 cm de diámetro. Los discos foliares se colocaron sobre algodón húmedo en cajas Petri (9 cm de diámetro). Después de 24 horas se retiraron todos los adultos, dejando los huevos en el disco foliar. Se eliminaron algunos huevos para dejar solo 15 huevos por disco foliar. Los discos foliares que contienen los huevos se tomaron cuidadosamente con pinzas y se sumergieron durante 10 segundos en las soluciones correspondientes a cada tratamiento de manera individual. Como control se usó agua destilada. Posteriormente, los discos foliares tratados se secaron durante 30 min a temperatura ambiente y se volvieron a colocar en las cajas Petri de donde se tomaron

inicialmente. Las cajas Petri se mantuvieron a temperatura ambiente (24-30 °C) durante 7 días. Luego se registró la mortalidad de los huevos, considerando como huevos muertos aquellos que no eclosionaron. Una caja Petri representó una repetición. Se incluyeron diez repeticiones por tratamiento (Cua-Basulto *et al.*, 2022).

Evaluación de la fotoquímica de la hoja de berenjena

Para evaluar la eficiencia cuántica de la clorofila se midieron parámetros de fotoquímica en las hojas, se utilizó un fluorómetro de amplitud modulada (JUNIOR-PAM, WALZ, Germany). Para estas evaluaciones se utilizó un lote de plantas de berenjena de 40 días de emergencia, establecidas en macetas de plástico de 1 L, mantenidas en condiciones de invernadero (25-35°C, H.R. 55-75%) y un fotoperiodo natural de 13 h luz y 11 h oscuridad). Las soluciones correspondientes a cada tratamiento y agua destilada (control), se aplicaron a las plantas con la ayuda de un atomizador manual, hasta el punto de goteo. Las evaluaciones se hicieron antes de la aplicación de los tratamientos, indicado como 0 h, y a las 6, 12 y 24 horas posteriores a la aplicación. Antes de cada medición las hojas se adaptaron a la oscuridad por 30 minutos. Por cada tratamiento se evaluaron 10 plantas, dos hojas por planta.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño experimental completamente al azar. Debido a que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad y homocedasticidad, el análisis de los datos se realizó usando un modelo lineal generalizado (GLM) de Poisson, y se utilizó una prueba post-hoc de Bonferroni para comparación de medias ($p < 0.05$), utilizando el programa IBM SPSS Statistics.

RESULTADOS

Efecto de las NPs en la mortalidad de adultos y huevos de *T. urticae*

El efecto de las NPs en la mortalidad de adultos de *T. urticae* fue significativamente diferente entre tratamientos. A las 48 h ($\chi^2_{(9,190)}=13.54$; $p<0.01$), las NPs de Cu-Zn a 100 ppm y las NPs de Ag-Zn a 100 y 150 ppm causaron mayor mortalidad en adultos de *T. urticae* (Figura 1A). A las 96 h ($\chi^2_{(9,190)}=19.58$, $p<0.01$), las NPs de Cu-Zn a 100 y 150 ppm causaron mayor mortalidad, con valores superiores al 70 % seguidas de las NPs de Ag-Zn a 100 ppm que causaron 65 % de mortalidad en adultos de *T. urticae* (Figura 1B). El efecto de estas NPs fue mayor que el efecto de las soluciones bimetalicas (Sol. Cu-Zn y Sol. Ag-Zn) y del extracto acuoso puro (Ext. Acuoso), los cuales causaron menos del 40% de mortalidad.

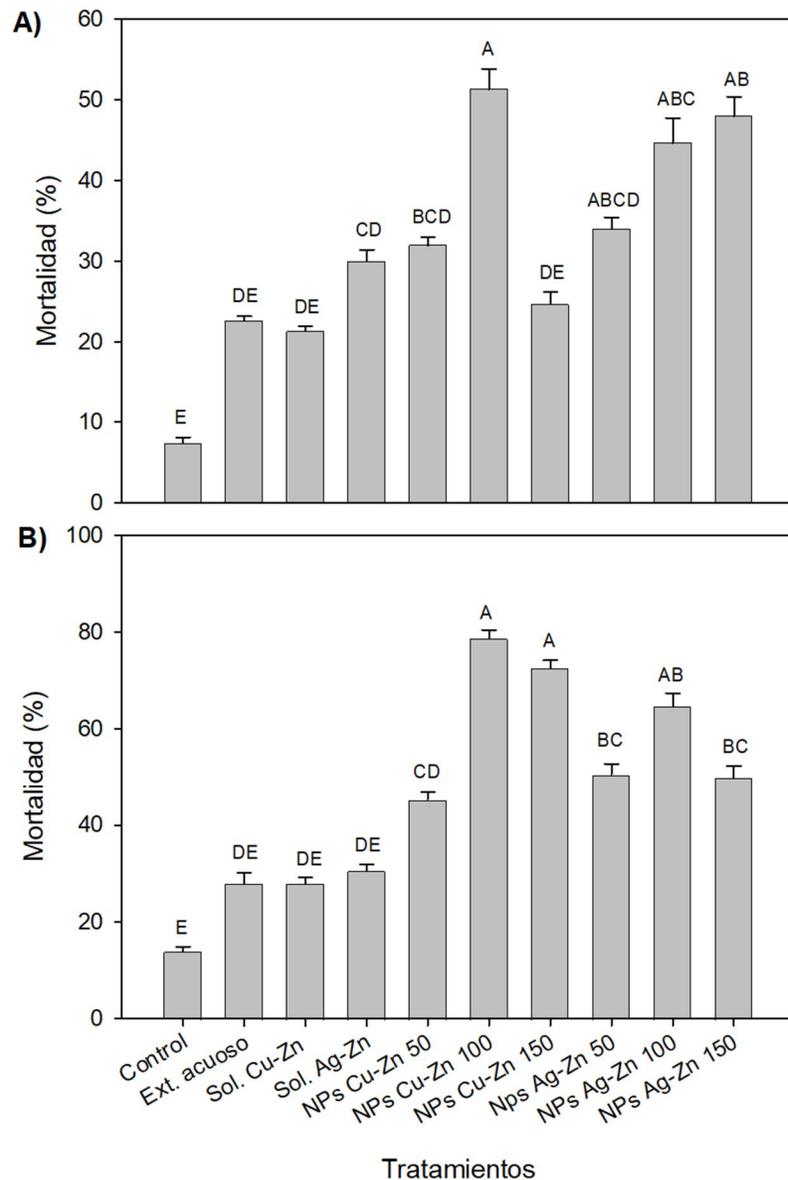


Figura 1. Mortalidad de adultos de *T. urticae* a las 48 h ($\chi^2_{(9,190)}=13.54$, $p<0.01$) y 96 h ($\chi^2_{(9,190)}=19.58$, $p<0.01$) por efecto de las aplicaciones de fitonanopartículas de *C. longirostrata*. Las barras representan promedios y error estándar. Letras diferentes en la parte superior de las barras indican diferencias significativas (GLM, Bonferroni, $p<0.05$).

El efecto de las NPs en la mortalidad de huevos de *T. urticae* fue significativamente diferente entre tratamientos ($\chi^2_{(9,80)}=25.90$, $p<0.01$). Las NPs de Ag-Zn a 50, 100 y 150 ppm causaron los mayores porcentajes de mortalidad, con valores $>80\%$. El efecto de estas NPs fue significativamente mayor al de la solución bimetalítica correspondiente (Sol. Ag-Zn) y el extracto acuoso puro (Ext. acuoso), que causaron entre 40-50% de mortalidad de huevos de *T. urticae* (Figura 2).

Efecto de las NPs en la fotoquímica de la hoja de berenjena

Para la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II (Fv/Fm), se observó que la aplicación de las NPs, las soluciones bimetalíticas y el extracto acuoso no tuvo efecto significativo sobre esta variable en ninguna de las evaluaciones realizadas, incluyendo tres evaluaciones posteriores a la aplicación de las NPs h, 6 h ($\chi^2_{(9,120)}=5.837$; $p>0.05$), 12 h ($\chi^2_{(9,120)}=3.727$; $p>0.05$) y 24 h ($\chi^2_{(9,120)}=4.93$; $p>0.05$) (Figura 3).

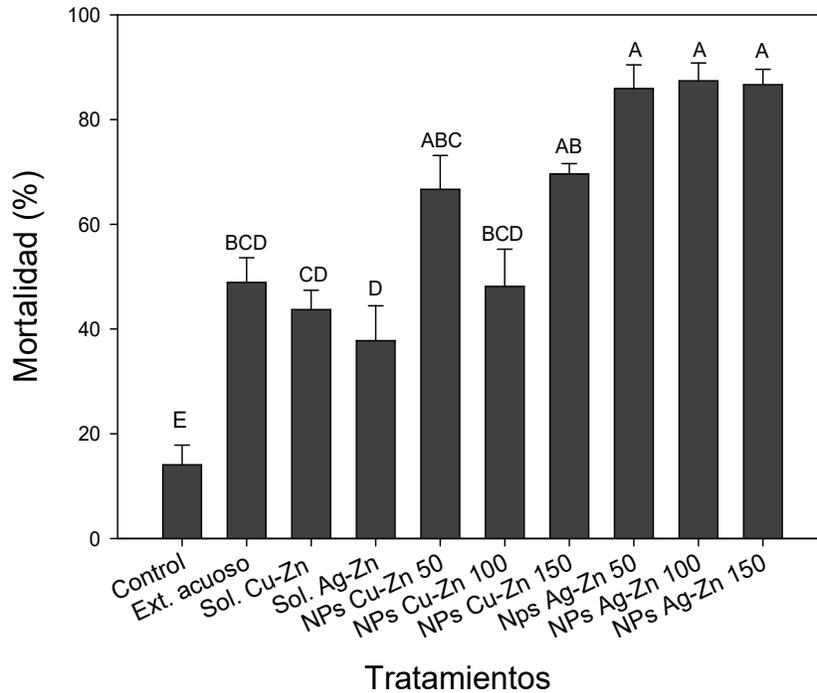


Figura 2. Mortalidad de huevos de *T. urticae* ($\chi^2_{(9,80)}=25.90$, $p<0.01$) por efecto de las aplicaciones de fitonanopartículas de *C. longirostrata*. Las barras representan promedios y error estándar. Letras diferentes en la parte superior de las barras indican diferencias significativas (GLM, Bonferroni, $p<0.05$).

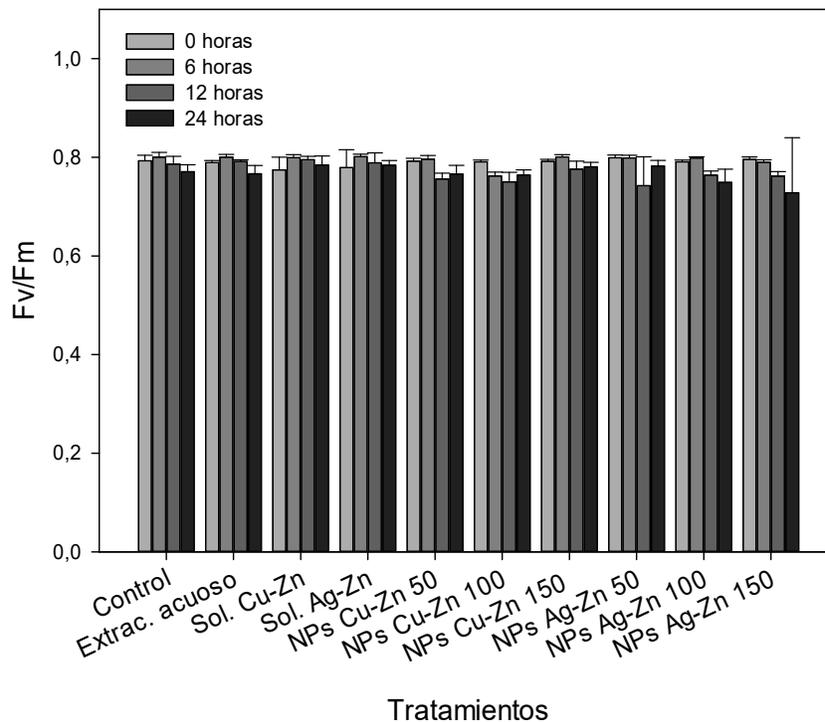


Figura 3. Eficiencia cuántica máxima del fotosistema II (Fv/Fm) en hojas de berenjenas tratadas con fitonanopartículas de *C. longirostrata*. Las evaluaciones se hicieron a las 0 h ($\chi^2_{(9,120)}=1.867$; $p>0.05$), 6 h ($\chi^2_{(9,120)}=5.837$; $p>0.05$), 12 h ($\chi^2_{(9,120)}=3.727$; $p>0.05$) y 24 h ($\chi^2_{(9,120)}=4.93$; $p>0.05$) después del tratamiento a las plantas de berenjena. No se observó diferencia significativa entre tratamientos (GLM, Bonferroni, $p>0.05$).

DISCUSIÓN

Actualmente la búsqueda de alternativas sustentables de manejo de *T. urticae* incluye una amplia gama de estrategias, incluyendo el uso de microorganismos y derivados vegetales. En este sentido las NPs obtenidas de la síntesis de extractos acuosos vegetales representan una opción prometedora. El presente estudio muestra que las NPs bimetalicas de *C. longirostrata* tuvieron altos efectos tóxicos letales contra adultos y huevos de *T. urticae*. Las NPs de mayor efecto fueron Cu-Zn contra adultos y Ag-Zn contra huevos. De acuerdo con los resultados fue evidente el aumento en efecto de las NPs comparado con el efecto de los extractos acuosos. Este efecto pudiera estar asociado al incremento en la entrada de las NPs a través de la cutícula, y en consecuencia un aumento en el transporte de las NPs al interior de las células, donde los metabolitos vegetales y los iones metálicos se separan y cada componente ejerce su efecto (El-Saadony *et al.*, 2020).

Es importante notar que los mayores efectos sobre adultos de *T. urticae* lo tuvieron las NPs que contenían Cu. Este ion metálico por sí mismo tiene altos efectos acaricidas en adultos de *T. urticae* (Cronholm *et al.*, 2013; Mumcuoglu *et al.*, 2008). La acción del Cu en los ácaros se debe a varios factores, incluyendo inhibición de la actividad de algunas enzimas claves en los procesos bioquímicos y fisiológicos (Al-Azzazy and Ghani, 2023). Por su parte, las NPs que contenían Ag tuvieron mayor efecto ovicida. Esto pudo deberse a que el Ag puede tener alta penetración a través del corion del huevo y efectos significativos en la embriogénesis (El-Ashmouny *et al.*, 2022). Los efectos ovicidas de NPs que contienen Ag no han sido registrados en ácaros fitófagos, pero si han sido ampliamente documentados en otros artrópodos, como los insectos plaga *Culex quinquefasciatus*, *Spodoptera littoralis*, *Helicoverpa armigera*, *Tribolium castaneum* y *Sitophilus oryzae* (Baranitharan *et al.*, 2021; Madhiyazhagan *et al.*, 2016).

En general los estudios sobre evaluación de efectividad de NPs en *T. urticae* son escasos. En los trabajos documentados evaluaron el efecto de NPs de Ag a partir de extractos de *Glycine max*. Los resultados mostraron altos efectos letales (90-100% mortalidad) en ninfas y adultos (Manoj y Patil, 2021). Estos efectos son más altos que los observados en la presente evaluación, lo cual sugiere que otras especies vegetales podrían ser fuente de extractos de mayor efectividad que *C. longirostrata*. Incluso, en insectos se observó que las NPs bimetalicas de *C. longirostrata* mostraron efectos letales moderados, con valores promedios de 60% de mortalidad de adultos de *P. solenopsis* (Méndez-Trujillo *et al.*, 2019, 2022). Un aspecto importante por resaltar es que la efectividad de las NPs se incrementa a través del tiempo. En el presente

estudio, se notó claramente que las NPs incrementaron su efectividad de las 48 h a las 96 h, donde las NPs más efectivas causaron entre 45-50% y 70-80% de mortalidad de adultos de *T. urticae*, respectivamente. Lo anterior hace suponer que el efecto de las NPs en los ácaros plagas tomaría tiempo, y que no se podría ver el efecto inmediatamente después de la aplicación.

Existe evidencia que las NPs pueden tener efectos sobre los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas, en algunos casos estos efectos pueden traducirse en serio estrés por toxicidad (Ahmad *et al.*, 2022). El efecto negativo (fitotoxicidad) de las NPs está relacionada con las características fisicoquímicas, la concentración utilizada, el tipo de extracto y la capacidad de desintoxicación de la especie vegetal (Essa *et al.*, 2021). En el presente trabajo se observó que la aplicación foliar de NPs bimetalicas de *C. longirostrata* no tuvo efectos negativos en la fotoquímica de las plantas de berenjena. Se infiere entonces que los efectos fitotóxicos causados por las NPs metálicas dependen en gran medida del extracto vegetal usado en la síntesis y de la susceptibilidad de la especie vegetal tratada. Por ejemplo, las NPs de Ag sintetizadas a partir de extractos de *Hyptis suaveolens* no tuvieron efectos negativos en la fisiología y fotoquímica (Fv/Fm) de plantas de *Prosopis juliflora* (Valdez-Salas *et al.*, 2020), en contraste, las NPs de Ag y Cu de *Justicia spicigera* mostraron reducción significativa en el contenido de clorofila y eficiencia fotoquímica de *Prosopis glandulosaquienes* (González-Mendoza *et al.*, 2019).

En resumen, los resultados mostraron que las NPs bimetalicas de *C. longirostrata* tuvieron efectos letales significativos en *T. urticae*. Se observó también que las NPs bimetalicas de *C. longirostrata* no tuvieron efectos negativos en la fisiología de las plantas de berenjena. Este trabajo genera antecedentes sólidos para la posterior evaluación acaricida de estas NPs contra otras especies de ácaros fitófagos o su aplicación en cultivos de campo.

CONCLUSIÓN

Las NPs bimetalicas sintetizadas a partir de extractos acuosos de *C. longirostrata* causaron altos porcentajes de mortalidad de adultos y huevos de *T. urticae*. En particular sobresalen los efectos de las NPs de Cu-Zn y Ag-Zn, las cuales podrían ser buenas candidatas para usarse como una alternativa para el control de *T. urticae*. Además, se observó que las NPs bimetalicas no causaron efectos fitotóxicos en las plantas de berenjena.

La aplicación de las NPs ofrece una alternativa viable como acaricida biorracional para el manejo de *T. urticae* en solanáceas cultivadas. El presente estudio contribuye a la evaluación de nuevas NPs de síntesis

verde para generar alternativas sustentables para el manejo de *T. urticae*. Hace falta otras evaluaciones del efecto de las NPs en condiciones de cultivo de campo para demostrar su efectividad en el manejo integrado de plagas.

Acknowledgements

The authors thank Arnoldo Alfaro-Corres for his technical assistance in the manuscript writing.

Funding. This work was funded by Tecnológico Nacional de México. Research project number 17932.23-P, granted to Esau Ruiz-Sánchez.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. Not applicable.

Data availability. The data is available upon request, with the corresponding author esau.ruiz@itconkal.edu.mx

Author contribution statement (CRediT). Eugenia León-Jiménez, conceptualization, methodology, visualization and writing original draft; Marcos Cua-Basulto, methodology, writing original draft; René Garruña-Hernández, methodology, validation and formal analysis; Federico Gutiérrez-Micelli, methodology, validation and formal analysis; Angel Herrera-Gorocica, writing original draft; Daniel González-Mendoza, conceptualization, methodology and writing original draft; Horacio Ballina-Gómez, methodology, validation and formal analysis; E. Ruiz-Sánchez, conceptualization, resources, supervision, writing original draft, writing review and editing.

REFERENCES

- Adesanya, A.W., Beauchamp, M.J., Lavine, M.D., Lavine, L.C., Zhu, F. and Walsh, D.B., 2019. Physiological resistance alters behavioral response of *Tetranychus urticae* to acaricides. *Scientific Reports*, 9(1), pp. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55708-4>
- Adesanya, A.W., Lavine, M.D., Moural, T.W., Lavine, L.C., Zhu, F. and Walsh, D.B., 2021. Mechanisms and management of acaricide resistance for *Tetranychus urticae* in agroecosystems. *Journal of Pest Science*, 94(3), pp. 639-663. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01342-x>
- Al-Azzazy, M.M. and Ghani, S.B.A., 2023. Field evaluation of the efficacy of copper nanoparticles against mites associated with orange trees. *Brazilian Journal of Biology*, 84, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.270451>.
- Ahmad, A., Hashmi, S.S., Palma, J.M. and Corpas, F.J., 2022. Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology. *Chemosphere*, 290, 133329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133329>
- Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Benelli, G., Losic, D., Usha, R.P. and Desneux, N., 2018. Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. *Journal of Pest Science*, 91(1), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0>
- Assouguem, A., Kara, M., Mechchate, H., Korkmaz, Y.B., Benmessaoud, S., Ramzi, A., Abdullah, K.R., Noman, O.M., Farah, A., Lazraq, A. 2022. Current Situation of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) in Northern Africa: The sustainable control methods and priorities for future research. *Sustainability*, 14(4), pp. 2395. <https://doi.org/10.3390/su14042395>
- Baranitharan, M., Alarifi, S., Alkahtani, S., Ali, D., Elumalai, K., Pandiyan, J., Krishnappa, K., Rajeswary, M., and Govindarajan, M. 2021. Phytochemical analysis and fabrication of silver nanoparticles using *Acacia catechu*: An efficacious and ecofriendly control tool against selected polyphagous insect pests. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), pp. 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.09.024>
- Cronholm, P., Karlsson, H.L., Hedberg, J., Lowe, T.A., Winnberg, L., Elihn, K., Wallinder, I.O. and Möller, L., 2013. Intracellular uptake and toxicity of Ag- and CuO nanoparticles—a comparison between nanoparticles and their corresponding metal ion. *Small*, 9(7), pp. 970-982. <http://dx.doi.org/10.1002/sml.201201069>
- Cruz-Rodríguez, R.I., Cruz-Salomón, A., Ruiz-Lau, N., Pérez-Villatoro, J.I., Esquinca-Avilés, H.A. and Meza-Gordillo, R., 2020. Potential application of *Crotalaria longirostrata* branch extract to reduce the severity of disease caused by Fusarium. *Agronomy*, 10(4), pp. 1-11. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040524>
- Cua-Basulto, M.E., Ruiz-Sánchez, E., Chan-Cupul, W., Reyes-Ramírez, A., Ballina-Gómez, H. and Hernández Núñez, E., 2022. Efecto de acaricidas químicos en la mortalidad de la araña roja *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25, pp. 1-9.

- Díaz-Arias, K.V., Rodríguez-Maciel, J.C., Lagunes-Tejeda, A., Aguilar-Medel, S., Tejeda-Reyes, M.A. and Silva-Aguayo, G., 2019. Resistance to abamectin in field population of *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) associated with cut rose from state of México, México. *Florida Entomologist*, 102(2), pp. 428-430. <https://doi.org/10.1653/024.102.0222>
- El-Ashmouny, R.S., Rady, M.H., Merdan, B.A., El-Sheikh, T.A.A., Hassan, R.E. and El Gohary, E.G.E., 2022. Larvicidal and pathological effects of green synthesized silver nanoparticles from *Artemisia herba-alba* against *Spodoptera littoralis* through feeding and contact application. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(1), pp. 239-253. <https://doi.org/10.1080/2314808X.2022.2063012>
- El-Saadony, M.T., Abd El-Hack, M.E., Taha, A.E., Fouda, M.M., Ajarem, J.S., Maodaa, N.S., Allam A.A. and Elshaer, N., 2020. Ecofriendly synthesis and insecticidal application of copper nanoparticles against the storage pest *Tribolium castaneum*. *Nanomaterials*, 10(3), 587. <https://doi.org/10.3390/nano10030587>
- Essa, H.L., Abdelfattah, M.S., Marzouk, A.S., Shedeed, Z., Guirguis, H.A. and El-Sayed, M.M.H., 2021. Biogenic copper nanoparticles from *Avicennia marina* leaves: Impact on seed germination, detoxification enzymes, chlorophyll content and uptake by wheat seedlings. *PLoS One*, 16(4), e0249764. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249764>
- González-Mendoza, D., Valdez-Salas, B., Bernardo-Mazariegos, E., Tzintzun-Camacho, O., Gutiérrez-Miceli, F., Ruíz-Valdiviezo, V., Rodríguez-Hernández, L. and Sánchez-Viveros, G., 2019. Influence of monometallic and bimetallic phytonanoparticles on physiological status of mesquite. *Open Life Sciences*, 14(1), pp. 62-68. <https://doi.org/10.1515/biol-2019-0008>
- Madhiyazhagan, P., Murugan, K., Kumar, A.N., Nataraj, T., Subramaniam, J., Chandramohan, B., Panneerselvam, C., Dinesh, D., Suresh, U., Nicoletti, M., Alsalthi, M.S., Devanesan, S. and Benelli, G., 2016. One pot synthesis of silver nanocrystals using the seaweed *Gracilaria edulis*: biophysical characterization and potential against the filariasis vector *Culex quinquefasciatus* and the midge *Chironomus circumdatus*. *Journal Applied Phycology*, 29(1), pp. 649-659. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0953-x>
- Manoj, H. and Patil, R.R., 2021. Effect of soybean-based silver nanoparticles AgNps against sucking pest, mite *Tetranychus urticae*. *The Pharma Innovation Journal*, 10(12), pp. 3095-3096.
- Méndez-Trujillo, V., Valdez-Salas, B., Carrillo-Beltrán, M., Curiel-Álvarez, M.A., Tzintzun-Camacho, O., Ceceña-Duran, C. and González-Mendoza, D., 2019. Green synthesis of bimetallic nanoparticles from *Prosopis juliflora* (Sw) DC., and its effect against cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae). *Phyton, International Journal of Experimental Botany*, 88, 269. <https://doi.org/10.32604/phyton.2019.xxx>
- Méndez-Trujillo, V., Valdez-Salas, B., Carrillo-Beltrán, M., Curiel-Álvarez, M.A., Beltrán-Partida, E., Alfaro-Corres, A., Ruiz-Sánchez, E., Bautista-Trujilli, G., Tzintzun-Camacho, O., Grimaldo-Juarez, O., Ceceña-Duran, C., Ail-Catzin, C. and González-Mendoza, D., 2022. Insecticidal effect of green bimetallic nanoparticles from *Crotalaria Longirostrata* on Cotton Mealybug, *Phenacoccus solenopsis*. *Journal of Renewable Materials*, 10(10), pp. 2543-2552. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.020965>
- Rincón, R.A., Rodríguez, D. and Coy-Barrera, E., 2019. Botanicals against *Tetranychus urticae* Koch under laboratory conditions: A survey of alternatives for controlling pest mites. *Plants*, 8, 272. <https://doi.org/10.3390/plants8080272>
- Sarhozaki, M.T., Aramideh, S., Akbarian, J. and Pirsá, S., 2020. Effects of ZnO nanoparticles and Kaolin in combination with NeemAzal-T/S against *Bemisia tabaci* and its parasitoid *Eretmocerus mundus* on cotton. *Chemical Review & Letters*, 3, pp. 131-139. <https://doi.org/10.22034/CRL.2020.235381.1066>
- Valdez-Salas, B., Beltrán-Partida, E., Méndez-Trujillo, V. and González-Mendoza, D., 2020. Silver nanoparticles from *Hpytus suaveolens* and their effect on biochemical and physiological parameter in mesquite plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 28, 101733. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101733>