

© 2026 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 29: 1-8, 2026.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2026.815>

## Síntesis verde de nano partículas de cobre y su uso potencial contra insectos plaga de importancia agroalimentaria

Arnoldo Enrique Alfaro-Corres<sup>1,2</sup>, Daniel González-Mendoza<sup>2\*</sup>,  
Federico Antonio Gutiérrez-Miceli<sup>3</sup>, Esaú Ruiz-Sánchez<sup>1</sup>,  
Vianey Mendez-Trujillo<sup>4</sup> y Arturo Reyes-Ramírez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal, Conkal 97345, Yucatán, México.

<sup>2</sup>Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, 21000, Mexicali, B.C., México.

<sup>3</sup>Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana, Km. 1080, 29050, Chiapas, México.

<sup>4</sup>Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Baja California, 21000, Mexicali, B.C., México.

Email: \*danielg@uabc.edu.mx

### RESUMEN

Las nanopartículas (NPs) son partículas con un rango de tamaño de 1 a 100 nm. Entre, las más utilizadas están las de cobre (Cu) por disponibles y económicas en comparación con las de plata y oro. Los procesos para obtenerlas pueden ser físicos, químicos y biológicos. Estos últimos considerados los más viables por no generar residuos tóxicos secundarios, ni altos costos de producción. En la síntesis de NPs por medio biológico, el usar extractos vegetales o síntesis verde las hace más simples, rentables, confiables y amigables con el ambiente. Actualmente, se conocen pocos estudios sobre fitotoxicidad, el efecto y la acción en insectos fitófagos. Por lo tanto, la presente revisión se centra en su aplicación para la protección de cultivos de relevancia agroalimentaria, describir los tipos de sales metálicas de Cu empleadas, los extractos vegetales usados, y su posible mecanismo de acción.

**Palabras clave:** nanotecnología, extracto vegetal, actividad biológica, insectos plaga.

### Green synthesis of copper nanoparticles and their potential use against insect pests of agro-food importance

### ABSTRACT

Nanoparticles (NPs) are defined as particles with a size range of 1 to 100 nm. Among metal-based NPs, those derived from copper (Cu) are considered the most economical and readily available compared to those made from elements such as silver and gold. There are various methods for obtaining NPs, including physical, chemical, and biological processes. The biological processes are considered the most viable because they do not generate toxic secondary waste and have low production costs. Within the biological synthesis of NPs, the use of plant extracts, or green synthesis, has proven to be simple, cost-effective, reliable, and environmentally friendly. Currently, there are few studies on the effect and mode of action of green synthesis NPs against phytophagous insects, as well as their phytotoxicity. Therefore, this review focuses on the application of green synthesis Cu-NPs using plant extracts and also addresses the potential of these agents for protecting crops of agri-food importance. Describing the types of Cu metal sales employed and the extracts used for the synthesis of Cu-NPs, and their possible mechanism of action.

**Keywords:** nanotechnology, plant extract, biological activity, insect pests.

## INTRODUCCIÓN

**L**a nanotecnología, es la ciencia que abarca la síntesis, el desarrollo y la aplicación de nanomateriales, el tamaño de las partículas oscila de 1 a 100 nm. Las nanopartículas (NPs) se dividen acorde a su composición química (Kučuk, Primožič, Knez & Leitgeb, 2023). Se utilizan en medicina, alimentos, agricultura e industria, y su importancia se debe a sus propiedades fisicoquímicas comparado con los elementos de donde se obtienen (Kučuk *et al.*, 2023; Ijaz, Gilani & Bukhari, 2020). Sus características están definidas por el tamaño, la forma (esférica, varilla, tubo e irregular), la relación superficie-volumen, la fase cristalina, amorfa y la composición química (metálica, carbono, inorgánica, orgánica y polimérica) parámetros clave que definen una parte de sus propiedades (Athanassiou, Kavallieratos, Benelli, Losic, Usha-Rani & Desneux, 2018; Benelli, Losic, Usha-Rani & Desneux, 2018). Los métodos de síntesis para la obtención de NPs más utilizados hasta el momento son físicos y químicos; sin embargo, por requerir el uso de productos tóxicos y la producción de subproductos nocivos durante el proceso provocan problemas en el medio ambiente (Dikshit *et al.*, 2021); por el contrario la síntesis verde (biológica) es una alternativa que emplea organismos vivos: bacterias, hongos, levaduras, virus, algas o plantas, que son agentes reductores y estabilizadores en la formación de NPs. La síntesis mediada por plantas tiene ventajas sobre los microorganismos al no requerir de mantenimiento en cultivo, ni de la estandarización del crecimiento del organismo o del inóculo, considerados en algunas ocasiones como procesos tediosos y caros (Rónavári *et al.*, 2021).

En la síntesis mediada por plantas sólo se requiere de un extracto obtenido de una de sus partes raíz, tallo, hoja, fruto y semilla cuyo contenido de flavonoides, fenoles y otros compuestos fenólicos son agentes reductores y estabilizadores de las NPs (Badeggi *et al.*, 2020). El empleo de metales, como el cobre para la obtención de nanopartículas es de interés por su amplia utilidad en el sector agroalimentario para el control de fitopatógenos, principalmente, de enfermedades provocadas por hongos (Rai *et al.*, 2018). Además de que en la actualidad este metal es la base para la formulación de los agroquímicos oxiclورو de cobre  $[\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCl}_2]$ , hidróxido de cobre  $[\text{Cu}(\text{OH})_2]$  y sulfato de cobre ( $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ), (Burandt, Deising & von Tiedemann, 2024). No obstante, su uso exige grandes cantidades, lo que representa un riesgo a la salud del ecosistema, pero en forma de nanopartícula es una alternativa que disminuye su concentración y aumenta su eficacia en el control de las plagas. La acción del metal estriba en que al permeabilizar la membrana plasmática se presenta una fuga de sus componentes celulares. Otra vía es la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) generadas, ya sea por la aceptación o donación de electrones de cobre ( $\text{Cu}^+$  y  $\text{Cu}^{2+}$ ), lo que origina estrés oxidativo en los lípidos de la membrana, aminoácidos y ácidos nucleicos; y por último está la alteración de los sitios activos de las enzimas que ocurre cuando el cobre compite con otros metales esenciales y evita

que las proteínas se unan con el cofactor correcto e inhibe su funcionalidad (Giachino & Waldron, 2020; Arendsen, Thakar & Sultan, 2019; Lemire, Harrison & Turner, 2013; Warnes & Keevil, 2011; Warnes, Caves & Keevil, 2012). En años recientes son diversos los estudios realizados en torno a la aplicación de las nanopartículas, en el control de patógenos que afectan los cultivos, en especial el uso de nanopartículas derivadas del Cu contra insectos plaga. Por lo que la presente revisión tiene el objetivo de abordar aspectos de la síntesis de fitonanopartículas de cobre, su acción contra los insectos y la posible fitotoxicidad en las plantas.

## SÍNTESIS VERDE DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

La síntesis de nanopartículas (NPs) se realiza a través de tres métodos: **a)** físicos; **b)** químicos y **c)** biológicos (síntesis verde), con ventajas y desventajas, respectivamente (Tabla I). Sin embargo, el uso de los métodos físicos y químicos ocasionan bajo rendimiento, consumo alto de energía o la generación de residuos contaminantes, por esto se encontró en las nanopartículas una opción amigable con el ambiente. Es la biosíntesis de NPs del método biológico (llamado química verde) el más viable, es un proceso eficiente por generar una mínima cantidad de compuestos tóxicos al ambiente y se protege la salud humana (Gebreslassie & Gebremeskel, 2024). La síntesis verde involucra los agentes biológicos virus, bacterias, hongos, algas y plantas (Pandit *et al.*, 2022), de estas últimas el uso de diferentes extractos vegetales provenientes de la raíz, tallo, hoja, semilla, epicarpio de frutos y flores representan una opción para fabricar NPs (Huynh *et al.*, 2020; Amaliyah, Pangesti, Masruri, Sabarudin & Sumitro, 2020), al obtener de ellos una gran variedad de fitoquímicos: los flavonoides, polifenoles, alcaloides, terpenoides, saponinas, vitaminas, polisacáridos y proteínas con acción de agentes reductores, protectores y estabilizadores en la biosíntesis y al reducir el metal, el proceso de síntesis es más rápido que el uso de microorganismos. La biorreducción de NPs metálicas con extractos de las plantas se realiza en tres etapas: (Figura 1); **i)** activación, es la subsecuente reducción y nucleación (autoorganización de una nueva estructura) de los iones metálicos. Los grupos carbonilo, hidroxilo, amino y metóxido son los principales grupos funcionales presentes en las plantas que están implicados en la reducción de iones metálicos por medio de interacciones electrostáticas (Küünal, Rauwel & Rauwel, 2018); **ii)** crecimiento, aquí las pequeñas NPs adyacentes se unen espontáneamente y forman partículas de mayor tamaño; y **iii)** terminación, define la forma de las NPs acompañada de un aumento en la estabilidad termodinámica (Makarov *et al.*, 2014).

En la síntesis de NPs de Cu se utilizaron diversas sales metálicas del metal entre estas (sulfato de cobre y cloruro de cobre) también extractos foliares de *Euphorbia esula* y *Ginkgo biloba* NPs esféricas de 15-100 nm, en su reducción y estabilización intervinieron los flavonoides, ácidos fenólicos,

Tabla I. Principales ventajas y desventajas de los métodos de síntesis de nanopartículas.

Métodos físicos	Métodos químicos	Métodos verdes
<b>Ventajas</b>		
Control en la obtención de tamaño y forma de las nanopartículas	Síntesis de nanopartículas de diferentes materiales	Sustentable con el ambiente
Proceso escalable	Producción en gran escala de los nanomateriales	Nanomateriales compatibles y no tóxicos
Nanopartículas de gran pureza	Control de sus propiedades (eg., tamaño y funcionalidad)	Consumo de poca energía en su fabricación y no genera residuos tóxicos
<b>Desventajas</b>		
Alto consumo de energía y costos económicos	Alto consumo de energía	Escalamiento limitado
Genera residuos tóxicos	Genera residuos tóxicos	Reproducibilidad
Limitada producción de nanomateriales	Requiere procesos adicionales para su funcionalidad	Limitado control sobre las propiedades físicas de los nanomateriales

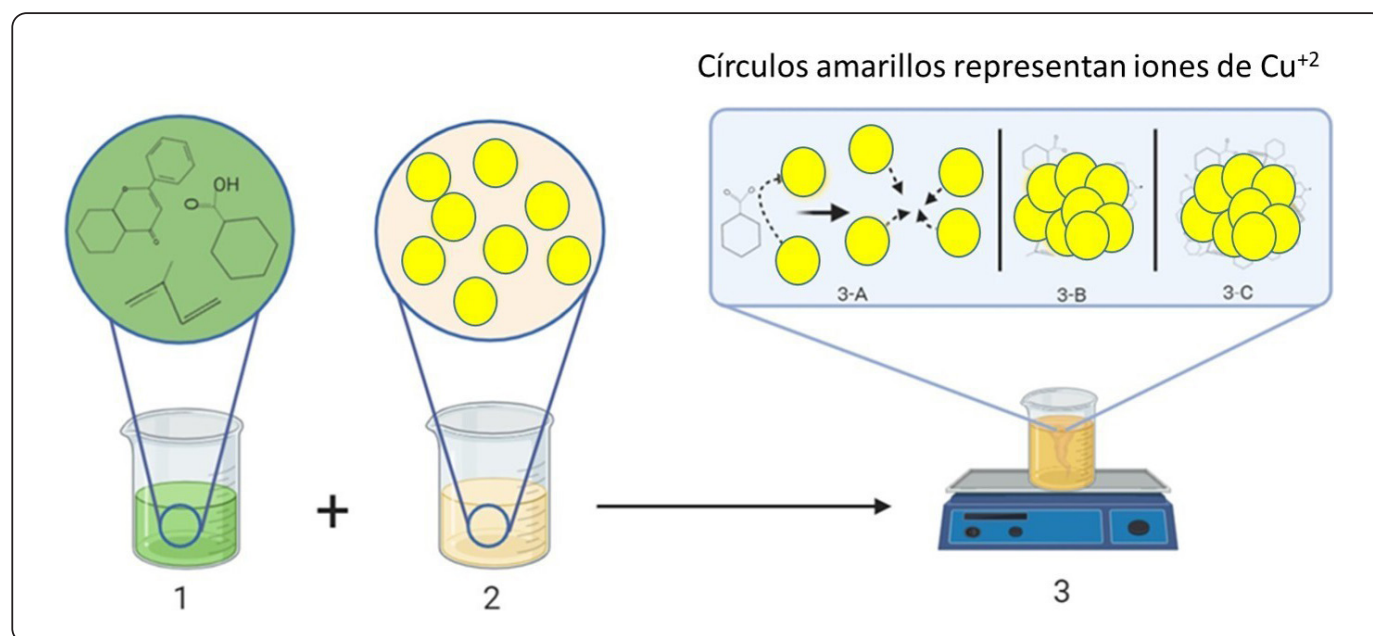


Figura 1. Síntesis de NPs de Cu con extractos vegetales: 1) Fitoquímicos del extracto vegetal y 2) Sal metálica de cobre; 3) Interacción del Cu con fitoquímicos; Reducción y nucleación de los iones de cobre (3-A); Crecimiento de las NPs (3-B) y Estabilización de las CuNPs con los compuestos bioactivos de la planta (3-C). Figura creatividad personal de Alfaro-Corres, A. E., (primer autor de este artículo).

quercetina y polifenoles (Nasrollahzadeh, Sajadi & Khalaj, 2014; Nasrollahzadeh & Sajadi, 2015). Con el nitrato de cobre y los extractos foliares de *Justicia spicigera* y *Hibiscus rosasinensis* obtuvieron NPs de 53-500 nm, cuya aparición responsabilizan a los flavonoides, fenoles, alcoholes y estructuras aromáticas (González-Mendoza *et al.*, 2019; Subbaiya & Selvam, 2015). Otro ejemplo, la mezcla de sulfato de cobre y el extracto de dátiles sin semilla, dio NPs de 78 nm, los fitoquímicos fenoles

y flavonoides las estabilizaron (Mohamed, 2020). La síntesis de NPs de acetato de cobre y extractos de *Caloropsis procera*, *Azadirachta indica* y *Quercus robur* dio por resultado un tamaño de 34-48 nm cilíndricas y cuasiesféricas, e involucrados en su reducción y estabilización el grupo OH presente en polifenoles (flavonoides), amidas, ésteres, fenoles aromáticos y taninos (Abbas, Nasreen, Haroon & Aqeel Ashraf, 2020; Sorbiun, Shayegan, Ramazani & Taghavi, 2018; Reddy, 2017).

## ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE LAS NPs DE CU DE SÍNTESIS VERDE CONTRA INSECTOS FITÓFAGOS

El uso de diversos metales, en la síntesis verde de NPs y aplicada al control de plagas polífagas es relativamente nueva; sin embargo, se encuentran trabajos con las siguientes especies: *Callosobruchus* spp. y *Spodoptera* spp.; de interés alimentario *Drosophila melanogaster* y *Bactrocera dorsalis*. Las NPs de Cu, Ag y Zn, reducidas con extractos de *Ocimum sanctum*, *Glycine max* y *Eriobotrya japonica* tienen actividad larvicida contra *Callosobruchus chinense* y *Sitophilus oryzae* (Hamdy *et al.*, 2023; Wazid, Prabhuraj, Harishchanra, Shakuntala & Sharanagouda, 2020; Hosamani, Patil, Chandrashekar, Benagi & Nandihalli, 2020). Por otra parte, NPs de Ag, de Zn y extractos de *Ocimum basilicum*, *Syzygium aromaticum*, *Jatropha curcas*, *Lantana camara*, *Eucalyptus globulus*, *Allium sativum*, *Zingiber officinale*, *Acacia catechu* y *Leonotis nepetifolia* fueron efectivas en larvas, pupas y adultos de *Spodoptera* spp. y *Helicoverpa armigera* (Shabir, Sarwar & Ali, 2023; Baranitharan *et al.*, 2021; Manimegalai, Raguvaran, Kalpana & Maheswaran, 2020). En el insecto *Tuta absoluta*, que afecta cultivos hortícolas, el extracto de *Trigonella foenum-graecum* a base de nanopartículas de hierro tuvo un efecto larvicida (Ramkumar, Asokan, Ramya & Gayathri, 2020). En otros estudios las NPs de Cu y de Cu/Zn/Mn y los extractos de *Prosopis juliflora*, *Pluchea sericea* y *Capsicum chinense* tuvieron un efecto biocida y una disminución en la viabilidad celular en *Phenacoccus solenopsis* (Alfaro-Corres *et al.*, 2023; León-Jiménez, Valdez-Salas, Gonzalez-Mendoza & Tzintun-Camacho, 2019). Finalmente, las NPs de Cu y extractos de *Azadirachta indica*, *Pongamia pinnata*, *Lantana camara* y *Citrus reticulata* eliminaron el 100% de las termitas (*Odontotermes* y *Microtermes obesi*) en condiciones de campo (Shiny, Sundararaj, Mamatha & Lingappa, 2019). Con respecto a las plagas de interés alimentario, hubo una disminución en larvas y adultos de *D. melanogaster* y *B. dorsalis* con las NPs y los extractos de *Coriandrum sativum*, *Blumea balsamifera*, *Cymbopogon citratus* y *Tridax procumbens* (Paragas & Viloría, 2024; Paragas, Cruz & Fiegalan, 2020; Sood, Kaur, Singh, Kumar & Khatri, 2019).

## MODO DE ACCIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS DE COBRE EN INSECTOS

La toxicidad de las NPs contra insectos se ha centrado en evaluar los mecanismos fisiológicos y en menor medida su acción a nivel bioquímico o molecular (Athanassiou *et al.*, 2018). En general, la acción de las fitonanopartículas metálicas está centrada en la generación de anomalías fisiológicas, estructurales, bioquímicas y genotóxicas en los insectos. Por ejemplo, se ha demostrado que las NPs metálicas son capaces de adherirse a la superficie del cuerpo del insecto debido a cargas electrostáticas, reducen la permeabilidad de la procutícula (exocutícula y la endocutícula), provocando deshidratación, necrosis en la hipodermis, despigmentación cuticular, destrucción muscular y muerte del insecto (Hashem, Awadalla, Zayed & Benielli, 2018; Stadler, López-García, Gitto & Buteler, 2017). Además del daño físico

por contacto, las NPs-metálicas inducen a estrés oxidativo y afectan la actividad de las siguientes enzimas antioxidantes: la superóxido dismutasa, la catalasa, la glutatión S-transferasa y la acetilcolinesterasa (Sezer Tuncsoy *et al.*, 2019); igual sucede con las funciones del insecto crecimiento, reproducción y locomoción (Hu, Hou, Zhu & Lin, 2020). También, se conoce que las NPs metálicas incrementan la metilación global del ADN con repercusión en cambios epigenéticos, daños y rupturas en su cadena, incluso, daño en los diversos componentes de la célula y apoptosis celular (Wamucho, Heffley & Tsyusko, 2020; Mao, Chen, Wang & Yan, 2018). De forma más específica, el modo de acción de las nanopartículas se clasifica en estrés oxidativo, estrés no oxidativo y liberación de iones metálicos (León-Jiménez *et al.*, 2019), (Figura 2).

El primero: **i)** estrés oxidativo, involucra directamente la inducción de las siguientes especies reactivas de oxígeno (ROS): el radical superóxido ( $O_2\cdot^-$ ), el radical hidroxilo ( $\cdot OH$ ), el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y el oxígeno singulete ( $^1O_2$ ); el segundo: **ii)** estrés no oxidativo, tiene que ver con la interacción de las NPs metálicas con la membrana y sus componentes celulares lo que genera, la reducción de diversos procesos metabólicos, el metabolismo de nucleótidos, los carbohidratos, los aminoácidos y la energía, lo que conlleva finalmente al daño celular; el tercero: **iii)** liberación de iones metálicos, es gradual en las NPs metálicas y son absorbidos a través de las membranas celulares. Una vez dentro de la célula, se lleva a cabo la interacción entre los iones metálicos con los grupos funcionales de diversas proteínas y de los ácidos nucleicos (tiol (-SH), amino (-NH), y grupos carboxilo (-COOH), respectivamente). Lo anterior causa cambios estructurales en la célula y actividades enzimáticas aberrantes que perturban los procesos fisiológicos normales (León-Jiménez *et al.*, 2019).

## FITOTOXICIDAD DE LAS CuNPs

Los estudios de la acción tóxica de las NPs metálicas en las plantas demostraron no ser perjudiciales y sí positivos (Zhang, Chen, Jia, Huang, Ji & Zhao, 2021), ya que se mejoran los parámetros morfométricos y físicos de germinación, longitud de raíz, altura de brotes, número de hojas y peso (fresco y seco) en *Cicer arietinum* y *Triticum aestivum* (Kausar *et al.*, 2022; Sathiyabama, Indhumathi & Amutha, 2020); a nivel bioquímico, se incrementa el contenido de pigmentos fotosintéticos, contenido de fenoles, azúcares, proteínas, enzimas antioxidantes, metabolitos secundarios, la acumulación de los compuestos bioactivos vitamina C, licopeno y los flavonoides en frutos de *Triticum aestivum* y *Solanum lycopersicum* (Kausar *et al.*, 2022; Ashraf *et al.*, 2021). También las NPs metálicas obtenidas por síntesis verde suelen ser menos tóxicas que las de síntesis química. Sin embargo, los resultados a veces contradictorios, hacen necesario realizar más estudios sobre su aplicación en el control de insectos, incluso por la complejidad en la respuesta de la planta que puede estar influenciada por propiedades de las NPs (tamaño, concentración, recubrimiento), el sistema vegetal

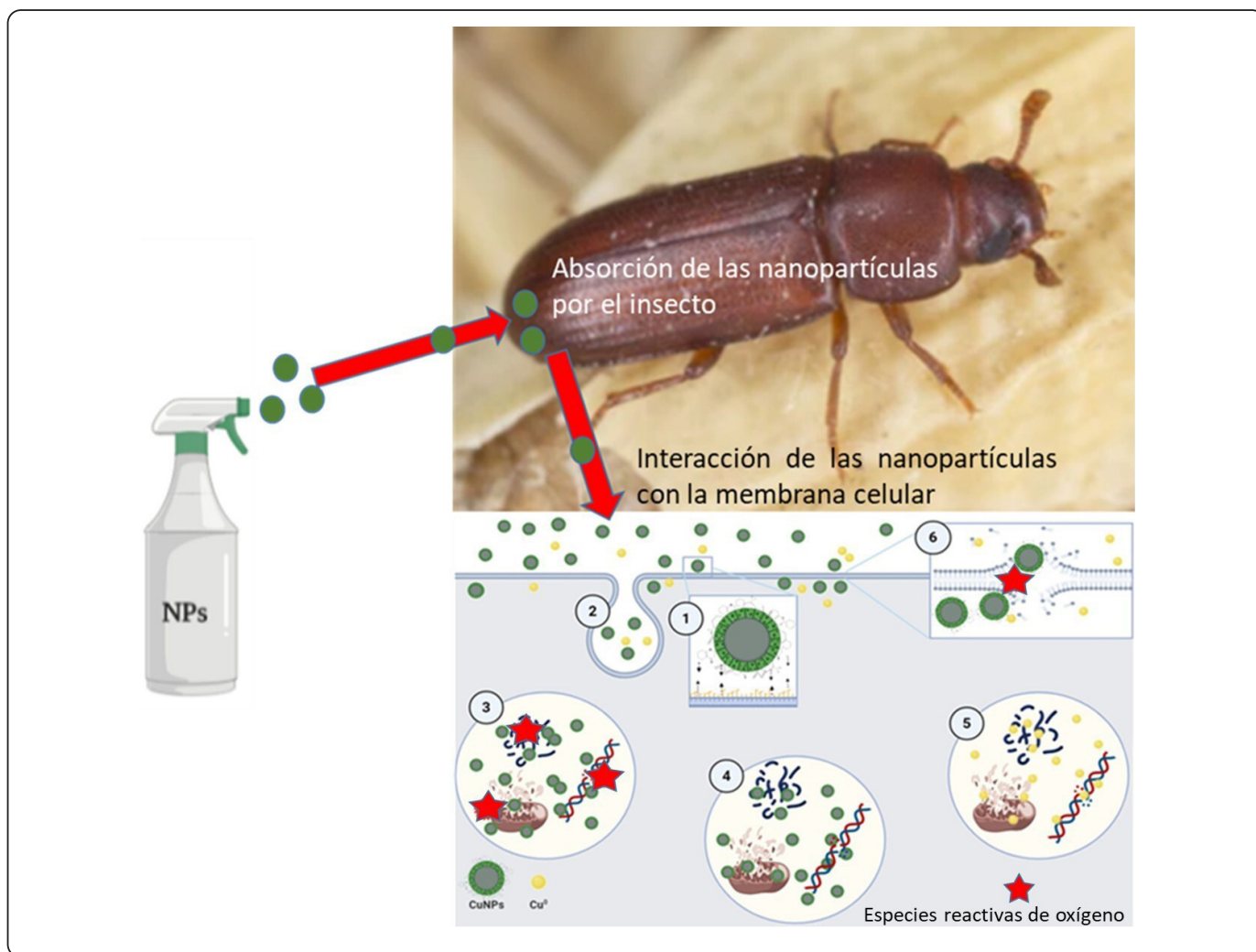


Figura 2. Mecanismos hipotéticos de acción de las nanopartículas en los insectos: 1) Interacción entre los fitoquímicos del extracto vegetal presentes en la superficie de la NP de Cu y la membrana; 2) Penetración de las NPs a la membrana celular mediante endocitosis; 3) Estrés oxidativo inducido por especies reactivas de oxígeno; 4) Estrés no oxidativo provocado por la adición de NPs a biomoléculas; 5) Liberación de iones de cobre y unión con biomoléculas; 6) Pérdida de la integridad de la membrana provocado por los iones de cobre y ROS. Figura creatividad personal de Alfaro-Corres, A. E., (primer autor de este artículo)

utilizado (especie, tejido, etapa de desarrollo) y la metodología experimental (medio, método de exposición, tiempo de exposición), (Yan & Chen, 2019). Finalmente, la síntesis verde de nanopartículas metálicas de cobre, además de las alternativas ya citadas, una ventaja más, es que la interacción del metal con los fitoquímicos de la planta hace posible controlar en algunos casos el tamaño y la forma de las NPs sintetizadas, dos de los principales factores que influyen en su actividad biológica. Con respecto al modo de acción de las NPs, en los insectos plaga algunos son hipotéticos y otros limitados a diferentes niveles de organización (bioquímico, molecular, fisiológico y poblacional) que nos permiten tener una visión amplia de cómo actúan y aunque muestran una notable actividad contra bacterias, hongos y plagas, aún quedan preguntas por responder, relacionadas

con la toxicidad que pueden provocar en organismos que no son el objetivo y en las posibles consecuencias al ambiente cuando se emplean elementos no esenciales como la plata o el arsénico. Por ese motivo, las nano formulaciones a base de cobre representan una alternativa biotecnológica viable para la reducción en el uso de agroquímicos y sus efectos tóxicos en el ambiente.

### CONCLUSIONES

La aplicación de la síntesis verde para la obtención de fitonanopartículas a base de cobre y control de insectos plaga, representa una alternativa viable en los sistemas agrícolas. No obstante, se requieren estudios eco toxicológicos sobre su posible impacto en estos ecosistemas y su incidencia en

la estabilidad, eficacia y efectividad en el campo; además de considerar que su implementación requiere de cuidado en el diseño y adaptación al tipo de cultivo, condiciones del suelo, tipo de cultivo y plaga, por la complejidad de la interacción de los nano materiales-planta-insecto y la posibilidad de generar efectos no deseados en la microbiota benéfica del agro-ecosistema o en los organismos superiores.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de doctorado otorgada a Arnoldo E. Alfaro-Corres.

#### REFERENCIAS

- Abbas, S., Nasreen, S., Haroon, A. & Aqeel Ashraf, M. (2020). Synthesis of silver and copper nanoparticles from plants and application as adsorbents for naphthalene decontamination. *Saudi Journal of Biological Science*, **27(4)**, 1016-1023. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.02.011>
- Alfaro-Corres, A. E., González-Mendoza, D., Ruiz-Sánchez, E., Ail-Catzim, C., Valdez-Salas, B., Gutiérrez-Miceli, F., Reyes-Ramirez, A. & Pierre, J. F. (2023). Insecticidal activity and physicochemical characterization of nanoparticle from foliar extract of *Capsicum chinense*. *Journal of Renewable Materials*, **11(11)**, 3933-3943. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.031129>
- Amaliyah, S., Pangesti, D. P., Masruri, M., Sabarudin, A. & Sumitro, S. B. (2020). Green synthesis and characterization of copper nanoparticles using *Piper retrofractum* Vahl extract as bioreductor and capping agent. *Heliyon*, **6(8)**, e04636. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04636>
- Arendsen, L.P., Thakar, R. & Sultan, A.H. (2019). The use of copper as an antimicrobial agent in health care, including obstetrics and gynecology. *Clinical Microbiology Reviews*, **32**, e00125-18. <https://doi.org/10.1128/CMR.00125-18>
- Ashraf, H., Anjum, T., Riaz, S., Ahmad, I. S., Irudayaraj, J., Javed, S., Qaiser, U. & Naseem, S. (2021). Inhibition mechanism of green-synthesized copper oxide nanoparticles from *Cassia fistula* towards *Fusarium oxysporum* by boosting growth and defense response in tomatoes. *Environmental Science: Nano*, **8**, 1729-1748. <https://doi.org/10.1039/D0EN01281E>
- 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. *Journal of Pest Science*, **91(1)**, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0>
- Badeggi, U. M., Ismail, E., Adeloye, A. O., Botha, S., Badmus, J. A., Marnewick, J. L., Cupido, C. N. & Hussein, A. A. (2020). Green synthesis of gold nanoparticles capped with procyanidins from *Leucosidea sericea* as potential antidiabetic and antioxidant agents. *Biomolecules*, **10(3)**, 452. <https://doi.org/10.3390/biom10030452>
- Baranitharan, M., Alarifi, S., Alkahtani, S., Ali, D., Elumalai, K., Pandiyan, J., Krishnappa, K., Rajeswary, M. & 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)**, 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.09.024>
- Burandt, Q. C., Deising, H. B. & von Tiedemann, A. (2024). Further limitations of synthetic fungicides use and expansion of organic agriculture in Europe will increase the environmental and health risks of chemical crop protection caused by copper-containing fungicides. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **43(1)**, 19-30. <https://doi.org/10.1002/etc.5766>
- Dikshit, P. K., Kumar, J., Das, A. K., Sadhu, S., Sharma, S., Singh, S., Gupta, P. K. & Kim, B. S. (2021). Green synthesis of metallic nanoparticles: Applications and limitations. *Catalysts*, **11(8)**, 902. <https://doi.org/10.3390/catal11080902>
- Gebreslassie, Y. T. & Gebremeskel, F. G. (2024). Green and cost-effective biofabrication of copper oxide nanoparticles: Exploring antimicrobial and anticancer applications. *Biotechnology Reports*, **4**, e00828. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00828>
- Giachino, A. & Waldron, K. J. (2020). Copper tolerance in bacteria requires the activation of multiple accessory pathways. *Molecular Microbiology*, **114(3)**, 377-390. <https://doi.org/10.1111/mmi.14522>
- González-Mendoza, D., Valdez-Salas, B., Bernardo-Mazariegos, E., Tzintzun-Camacho, O., Gutiérrez-Miceli, F., Ruiz-Valdiviezo, V., Rodríguez-Hernández, L. & Sanchez-Viveros, G. (2019). Influence of monometallic and bimetallic phytonanoparticles on physiological status of mesquite. *Open Life Sciences*, **14(1)**, 62-68. <https://doi.org/10.1515/biol-2019-0008>
- Hamdy, E., Al-Askar, A. A., El-Gendi, H., Khamis, W. M., Behiry, S. I., Valentini, F., Abd-Elsalam, K. A. & Abdelkhalik, A. (2023). Zinc oxide nanoparticles biosynthesized by *Eriobotrya japonica* leaf extract: characterization, insecticidal and antibacterial properties. *Plants*, **12(15)**, 2826. <https://doi.org/10.3390/plants12152826>
- Hashem, A. S., Awadalla, S. S., Zayed, G. M. & Benielli, G. (2018). *Pimpinella anisum* essential oil nanoemulsions against *Tribolium castaneum*—insecticidal activity and mode of action. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 18802–18812. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2068-1>
- Hosamani, G. B., Patil, R. R., Chandrashekhar, S. S., Benagi, V. I. & Nandihalli, B. S. (2020). Sunlight mediated green synthesis of silver nanoparticles from soybean seed and its bio-efficacy on *Callosobruchus chinensis* (L.). *Journal of Experimental Zoology*, **23(2)**, 1091-1095
- Hu, C., Hou, J., Zhu, Y. & Lin, D. (2020). Multigenerational exposure to TiO<sub>2</sub> nanoparticles in soil stimulates stress

- resistance and longevity of survived *C. elegans* via activating Insulin/IGF-like signaling. *Environmental Pollution*, **263**, 114376. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114376>
- Huynh, K. H., Pham, X. H., Kim, J., Lee, S. H., Chang, H., Rho, W. Y. & Jun, B. H. (2020). Synthesis, properties, and biological applications of metallic alloy nanoparticles. *International Journal of Molecular Science*, **21(14)**, 5174. <https://doi.org/10.3390/ijms21145174>
- Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A. & Bukhari, A. (2020). Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, **13(3)**, 223-245. <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>
- Kausar, H., Mehmood, A., Khan, R. T., Ahmad, K. S., Hussain, S., Nawaz, F., Iqbal, M. S., Nasir, M. & Ullah, T. S. (2022). Green synthesis and characterization of copper nanoparticles for investigating their effect on germination and growth of wheat. *PLOS ONE*, **17(6)**, e0269987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269987>
- Kučuk, N., Primožič, M., Knez, Ž. & Leitgeb, M. (2023). Sustainable biodegradable biopolymer-based nanoparticles for healthcare applications. *International Journal of Molecular Sciences*, **24(4)**, 3188. <https://doi.org/10.3390/ijms24043188>
- Küünal, S., Rauwel, P. & Rauwel, E. (2018). Plant extract mediated synthesis of nanoparticles. En Elsevier eBooks (pp. 411-446). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-51254-1.00014-2>
- Lemire, J. A., Harrison, J. J. & Turner, R. J. (2013). Antimicrobial activity of metals: mechanisms, molecular targets and applications. *Nature Reviews Microbiology*, **11**, 371-384. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3028>
- León-Jimenez, E., Valdez-Salas, D., Gonzalez-Mendoza, B. & Tzintun-Camacho, O. (2019). Synthesis and insecticide activity of Cu-nanoparticles from *Prosopis juliflora* (Sw) DC and *Pluchea sericea* (Nutt.) on *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera, Pseudococcidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, **78(2)**, 12–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.25085/rsea.780202>
- Makarov, V. V., Love, A. J., Sinitsyna, O. V., Makarova, S. S., Yaminsky, I. V., Taliany, M. E. & Kalinina, N. O. (2014). Green nanotechnologies: synthesis of metal nanoparticles using plants. *Acta Naturae*, **6(1)**, 35-44.
- Manimegalai, T., Raguvaran, K., Kalpana, M. & Maheswaran, R. (2020). Green synthesis of silver nanoparticle using *Leonotis nepetifolia* and their toxicity against vector mosquitoes of *Aedes aegypti* and *Culex quinquefasciatus* and agricultural pests of *Spodoptera litura* and *Helicoverpa armigera*. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 42103-43116. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10127-1>
- 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)**, 2445. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20728-z>
- Mohamed, E. A. (2020). Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. *Heliyon*, **6(1)**, e03123. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03123>
- Nasrollahzadeh, M. & Sajadi, S. M. (2015). Green synthesis of copper nanoparticles using *Ginkgo biloba* L. leaf extract and their catalytic activity for the Huisgen [3+2] cycloaddition of azides and alkynes at room temperature. *Journal of Colloid and Interface Science*, **457**, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.07.004>
- Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M. & Khalaj, M. (2014). Green synthesis of copper nanoparticles using aqueous extract of the leaves of *Euphorbia esula* L. and their catalytic activity for ligand-free ullmann-coupling reaction. *RSC Advance*, **4**, 47313– 47318. <https://doi.org/10.1039/C4RA08863H>
- Pandit, C., Roy, A., Ghotekar, S., Khusro, A., Islam, M. N., Emran, T. B., Lam, S. E., Khandaker, M. U. & Bradley, D. A. (2022). Biological agents for synthesis of nanoparticles and their applications. *Journal of King Saud University-Science*, **34**, 101869. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101869>
- Paragas, D. S. & Viloría, J. L. (2024). Green synthesis of silver and copper nanoparticle for potential biopesticide application against oriental fruit fly (*Bactrocera dorsalis* Hendel). *Letters in Applied NanoBioScience*, **13(1)**, 31. <https://doi.org/10.33263/LIANBS131.031>
- Paragas, D. S., Cruz, K. D. C. & Fiegalan, E. R. (2020). Green synthesized copper nanoparticles from *Blumea balsamifera* Linn. leaves and its biocidal activities against *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, **24(3)**, 436-448.
- Rai, M., Ingle, A. P., Pandit, R., Paralikar, P., Shende, S., Gupta, I., Biswas, J. K. & da Silva, S. S. (2018). Copper and copper nanoparticles: role in management of insect-pests and pathogenic microbes. *Nanotechnology Reviews*, **7(4)**, 303-315. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0031>
- Ramkumar, G., Asokan, R., Ramya, S. & Gayathri, G. (2020). Characterization of *Trigonella foenum-graecum* derived iron nanoparticles and its potential pesticidal activity against *Tuta absoluta* (Lepidoptera). *Journal of Cluster Science*, **23**, 1185-1190. <https://doi.org/10.1007/s10876-020-01867-8>
- Reddy, K. R. 2017. Green synthesis, morphological and optical studies of CuO nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, **1150**, 553–557. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.09.005>
- Rónavári, A., Igaz, N., Adamecz, D. I., Szerencsés, B., Molnar, C., Kónya, Z., Pfeiffer, I. & Kiricsi, M. (2021). Green silver and gold nanoparticles: Biological synthesis approaches and potentials for biomedical applications. *Molecules*, **26(4)**, 844. <https://doi.org/10.3390/molecules26040844>
- Sathiyabama, M., Indhumathi, M. & Amutha, T. (2020). Preparation and characterization of curcumin functionalized copper nanoparticles and their application enhances disease resistance in chickpea against wilt

- pathogen. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **29**, 101823. <https://doi.org/1016/j.bcab.2020.101823>
- Sezer-Tuncsoy, B., Tuncsoy, M., Gomes, T., Sousa, V., Ribau-Teixeira, M., Bebianno, M. J. & Ozalp, P. (2019). Effects of copper oxide nanoparticles on tissue accumulation and antioxidant enzymes of *Galleria mellonella* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **102**, 341–346. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2529-8>
- Shabir, A., Sarwar, Z. M. & Ali, H. (2023). Eco-friendly approaches of zinc oxide and silver nitrate nanoparticles along with plant extracts against *Spodoptera litura* (Fabricius) under laboratory conditions. *Agricultural Science*, **106** (4), 00368504231219171. <https://doi.org/10.1177/00368504231219171>
- Shiny, K. S., Sundararaj, R., Mamatha, N. & Lingappa, B. (2019). A new approach to wood protection: preliminary study of biologically synthesized copper oxide nanoparticle formulation as an environmental friendly wood protectant against decay fungi and termites. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, **21**(3), 347-357. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000307>
- Sood, K., Kaur, J., Singh, H., Kumar, A. S. & Khatri, M. (2019). Comparative toxicity evaluation of graphene oxide (GO) and zinc oxide (ZnO) nanoparticles on *Drosophila melanogaster*. *Toxicology Reports*, **26**, 768–781. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.07.009>
- Sorbiun, M., Shayegan, M. E., Ramazani, A. & Taghavi, F. S. (2018). Green synthesis of zinc oxide and copper oxide nanoparticles using aqueous extract of oak fruit hull (Jaft) and comparing their photocatalytic degradation of basic violet 3. *International Journal of Environmental Research*, **12**(1), 29–37. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0064-4>
- 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.
- Subbaiya, R. & Selvam, M. (2015). Green synthesis of copper nanoparticles from *Hibiscus rosa-sinensis* and their antimicrobial, antioxidant activities. *Research Journal Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences*, **6**(2), 1183–1190.
- Wamucho, A., Heffley, A. & Tsyusko, O. V. (2020). Epigenetic effects induced by silver nanoparticles in *Caenorhabditis elegans* after multigenerational exposure. *Science of The Total Environment*, **725**, 138523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138523>
- Warnes, S. L. & Keevil, C. W. (2011). Mechanism of copper surface toxicity in vancomycin-resistant enterococci following wet or dry contact. *Applied and Environmental Microbiology*, **77**(17), 6049–6059. <https://doi.org/10.1128/AEM.00597-11>
- Warnes, S. L., Caves, V. & Keevil, C. W. (2012). Mechanism of copper surface toxicity in *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* involves immediate membrane depolarization followed by slower rate of DNA destruction which differs from that observed for gram-positive bacteria. *Environmental Microbiology*, **14**(7), 1730–1743. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02677.x>
- Wazid, N. S., Prabhuraj, A., Harishchanra, N. R., Shakuntala, N. M. & Sharanagouda, H. (2020). The persistence of residual toxicity of zinc, copper and silica green nanoparticles against important storage pests. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, **8**(5), 1207- 1211.
- Yan, A. & Chen, Z. (2019). Impacts of silver nanoparticles on plants: A focus on the phytotoxicity and underlying mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**(5), 1003. <https://doi.org/10.3390/ijms20051003>
- Zhang, H., Chen, S., Jia, X., Huang, Y., Ji, R. & Zhao, L. (2021). Comparison of the phytotoxicity between chemically and green synthesized silver nanoparticles. *Science of the Total Environment*, **752**, 142264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142264>.