

Nanopartículas de cobre impactan: Actividad enzimática, capsaicinoides, compuestos bioactivos y concentración de cobre en habanero

Copper nanoparticles impact: Enzymatic activity, capsaicinoids, bioactive compounds and copper concentration in habanero peppers

Alexis Gabriel Pivaral-Chávez¹ , Eduardo Arón Flores-Hernández¹ , Urbano Nava-Camberos² , Alma Patricia Galindo-Guzmán^{3*} , Antonio Castillo-Martínez¹ , Alejandro Moreno-Reséndez¹ 

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez S/N, Colonia Valle Verde, CP. 27054. Torreón, Coahuila, México.

²Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango, Carretera Gómez Palacio - Tlahualilo Km. 32. Ej. Venecia, CP. 35000. Gómez Palacio, Durango. México.

³Universidad Politécnica de la Región Laguna. Calle sin nombre, sin número, ejido Santa Teresa, CP. 27942. San Pedro de las Colonias, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia: almagalindo@docentes.uprl.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 05 de marzo 2026

Aceptado: 19 de agosto 2026

RESUMEN. Se analizó la respuesta del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) a la aplicación de nanopartículas de cobre (NPs-Cu), considerando la actividad enzimática, los compuestos bioactivos, capsaicinoides y la concentración de Cu. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos: un testigo y tres dosis de NPs-Cu (2, 4 y 6 mg L⁻¹), con cinco repeticiones por tratamiento. Las aplicaciones se realizaron mediante aspersión foliar a partir de los 20 días después del trasplante, y se repitieron cada 15 días, con un total de cuatro aplicaciones. En los frutos cosechados se determinaron el rendimiento, el contenido de compuestos bioactivos, la actividad enzimática y la concentración de Cu. Los resultados mostraron que la concentración más alta (6 mg L⁻¹) aumentó significativamente la actividad de peroxidasa (87%), la capacidad antioxidante (48%), los flavonoides totales (42%) y la biosíntesis de dihidrocapsaicina (22%). La dosis intermedia (4 mg L⁻¹) aumentó la actividad de la catalasa (79%), mientras que la capsaicina y los fenoles totales no se vieron afectados por los tratamientos. Las dosis intermedia y alta (4 y 6 mg L⁻¹) incrementaron la acumulación de cobre ($\leq 20\%$) en los frutos, evidenciando un efecto dependiente de la dosis y un potencial de biofortificación. El rendimiento de frutos no presentó diferencias significativas entre tratamientos. Las NPs-Cu pueden mejorar el sistema antioxidante, los metabolitos bioactivos y la concentración de cobre sin afectar la producción.

Palabras clave: Capsaicina, capacidad antioxidante, catalasa, dihidrocapsaicina, peroxidasa.

ABSTRACT. The response of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) to copper nanoparticles (Cu-NPs) application was analyzed by assessing enzymatic activity, bioactive compounds, capsaicinoids, and Cu concentration. The experiment was conducted using a completely randomized design with four treatments: a control and three Cu-NPs concentrations (2, 4, and 6 mg L⁻¹), with five replicates per treatment. Foliar applications began 20 days after transplanting and were repeated at 15-day intervals, for a total of four applications. Fruit yield, bioactive compound content, enzymatic activity, and Cu concentration were determined in the harvested fruits. The highest concentration (6 mg L⁻¹) significantly increased peroxidase activity (87%), antioxidant capacity (48%), total flavonoids (42%), and dihydrocapsaicin biosynthesis (22%). The intermediate concentration (4 mg L⁻¹) increased catalase activity by 79%, whereas capsaicin and total phenol contents were not affected by the treatments. The intermediate and highest concentrations (4 and 6 mg L⁻¹) increased Cu accumulation in the fruits by up to 20%, indicating a concentration-dependent response and potential for biofortification. Fruit yield did not differ significantly among treatments. Cu-NPs may enhance the antioxidant system, bioactive metabolites, and Cu concentration without affecting fruit production.

Keywords: Capsaicin, antioxidant capacity, catalase, dihydrocapsaicin, peroxidase.

Como citar: Pivaral-Chávez AG, Flores-Hernández EA, Nava-Camberos U, Galindo-Guzmán AP, Castillo-Martínez A, Moreno-Reséndez A (2026) Nanopartículas de cobre impactan: Actividad enzimática, capsaicinoides, compuestos bioactivos y concentración de cobre en habanero. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(3): e5190. DOI: 10.19136/era.a13n3.5190.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito agrícola ha aumentado el interés por los materiales de entre 1 y 100 nm, denominados nanopartículas, debido a su potencial para favorecer el aprovechamiento de nutrientes y modificar distintas respuestas fisiológicas vegetales (Hossain *et al.* 2020). En distintos cultivos, el suministro de nutrientes mediante nanopartículas se ha relacionado con una mayor productividad (Sánchez-Valdés *et al.* 2024) y con modificaciones favorables del perfil fitoquímico, entre ellas el aumento de fenoles, flavonoides, vitamina C, clorofila y carotenoides, acompañado de una mayor capacidad antioxidante. La exposición a estos nanomateriales también puede estimular enzimas antioxidantes, entre ellas la catalasa y la peroxidasa, que favorecen la eliminación de especies reactivas de oxígeno y reducen el daño celular asociado con el estrés oxidativo (Fortis-Hernández *et al.* 2024b). Otro efecto atribuido a las nanopartículas es la inducción del metabolismo secundario, respuesta que puede reforzar las defensas de la planta ante condiciones bióticas o abióticas adversas (Pérez-Hernández *et al.* 2024).

El cobre (Cu) es un micronutriente esencial requerido en pequeñas cantidades por las plantas, pero indispensable para procesos fisiológicos clave como la respiración, la fotosíntesis, la formación de clorofila, el metabolismo de la pared celular, la síntesis de proteínas, la distribución de carbohidratos y la activación de mecanismos de defensa ante enfermedades fúngicas y microbianas (Singh *et al.* 2023). En forma nanoparticulada, el cobre puede actuar como bioestimulante, favoreciendo la absorción de nutrientes y el crecimiento radicular; sin embargo, su efecto depende de la concentración aplicada, ya que dosis elevadas pueden inducir estrés oxidativo, generar fitotoxicidad y propiciar la acumulación del metal en tejidos como raíz, tallo, hojas y frutos (Feigl 2023). Por ello, resulta necesario evaluar no solo los posibles beneficios fisiológicos, sino también los riesgos asociados a su acumulación en órganos comestibles (Gao *et al.* 2023).

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es una de las especies más picantes del mundo y destaca por sus atributos de color, sabor y alta pungencia, características que le confieren un elevado valor comercial (Mohd *et al.* 2019). Además de su importancia gastronómica, se utiliza en la industria farmacéutica, cosmética y química, para la elaboración de ungüentos, cremas, lociones, pinturas y gases lacrimógenos (Ruíz-Lau *et al.* 2011).

En México, su producción alcanzó 27 527.69 t cosechadas en una superficie de 1 484.36 ha; Yucatán, Sinaloa, Campeche, Tabasco y Nayarit fueron los principales estados productores (SIAP 2024), lo que evidencia su relevancia económica y social. La calidad del fruto se asocia con la concentración de metabolitos secundarios, particularmente capsaicinoides y otros compuestos bioactivos, los cuales, además de intervenir en los mecanismos de defensa vegetal, poseen propiedades de interés nutracéutico y farmacológico (Olvera *et al.* 2017).

Por lo anterior, en frutos de chile habanero tratados con NPs-Cu se evaluaron la actividad de catalasa y peroxidasa, los contenidos de capsaicina y dihidrocapsaicina, los fenoles totales, los flavonoides, la capacidad antioxidante y la acumulación de Cu. El propósito fue establecer la respuesta fitoquímica y antioxidante del cultivo a diferentes dosis aplicadas de NPu-Cu.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el ciclo primavera-verano de 2024, en condiciones de invernadero en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, con temperatura y humedad controladas durante todo el ciclo del cultivo. Se utilizaron plántulas de chile habanero variedad “Orange” de la empresa Kristen Seed®, en macetas con sustrato inerte (70% arena + 30% perlita).

Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos y cinco repeticiones por tratamiento, considerando cada repetición como una unidad experimental. Los tratamientos evaluados fueron: un testigo (sin aplicación) y tres tratamientos con nanopartículas de cobre (NPs-Cu) a diferentes dosis (2, 4 y 6 mg L⁻¹). Las nanopartículas de cobre utilizadas fueron sintetizadas mediante un método verde empleando extracto de ajo negro (*Allium sativum* L.) como agente reductor y estabilizante. De acuerdo con los análisis de caracterización, las nanopartículas presentaron un tamaño promedio de 40 nm, morfología laminar con tendencia a la aglomeración en racimos y una pureza del 98%. La aplicación de las NPs-Cu se realizó mediante aspersor manual de presión previa, marca Truper de 2 L. La primera aplicación se efectuó a los 20 días después del trasplante (ddt) y las siguientes se repitieron cada 15 días, acumulando un total de cuatro aplicaciones durante el ciclo del cultivo.

Rendimiento

Los frutos fueron cosechados a los 120 ddt. El rendimiento total se calculó como el peso fresco acumulado de los frutos, obteniéndose a partir de seis cosechas sucesivas. Los frutos se pesaron utilizando una báscula digital modelo Bal-40C (Balance®) y los resultados se expresaron en gramos por planta (g planta⁻¹).

Preparación de extractos y análisis de compuestos bioactivos

Para preparar los extractos se usaron frutos frescos de muestras compuestas. Se tomaron 2 g de habanero y se adicionaron 10 mL de etanol al 80%. La mezcla se agitó de manera continua a 70 rpm durante 24 h a 5 °C y posteriormente se centrifugó a 3 000 rpm por 5 min. El sobrenadante obtenido se empleó para los análisis fitoquímicos correspondientes (Salas-Pérez *et al.* 2018).

Para cuantificar la capacidad antioxidante se empleó el ensayo *in vitro* con el radical DPPH. La absorbancia se registró a 517 nm en un espectrofotómetro UV-visible Jenway® 7305. Cada tratamiento se analizó con tres repeticiones y los valores se expresaron como μmol de Trolox equivalente por 100 g de peso fresco ($\mu\text{Meq Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$) (Brand-Williams *et al.* 1995). El contenido de fenoles totales se cuantificó mediante el método de Folin-Ciocalteu, midiendo la absorbancia a 765 nm y utilizando una curva de calibración con ácido gálico. Los resultados se expresaron como miligramos de ácido gálico equivalente por 100 g de peso fresco (mg AG 100 g⁻¹ PF) (Singleton *et al.* 1999). El análisis de flavonoides totales se realizó siguiendo el método de Lamaison y Carnat (1990), con el que se midió la absorbancia a 510 nm, con tres repeticiones por tratamiento. Los resultados se expresaron como miligramos de quercetina equivalente por 100 g de peso fresco (mg EQ 100 g⁻¹ PF).

Capsaicinoides

El contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), utilizando un equipo VARIAN con bomba de gradiente ternario PROSTART 230, inyección manual y detector UV/VIS VARIAN PROSTART® 310, siguiendo la metodología de Morán-Bañuelos *et al.* (2008). Se realizaron tres repeticiones por tratamiento.

Actividad enzimática

Para obtener el extracto crudo con actividad enzimática, los frutos de habanero se lavaron, desinfectaron y secaron, después una muestra de 100 g y se homogeneizó con 50 mL de solución amortiguadora de fosfato de potasio 0.1 M en una licuadora, agitando la mezcla en intervalos de 30 s durante 3 min. El homogeneizado se mantuvo a 4 °C durante 24 h. Posteriormente, se filtró con gasa para eliminar residuos sólidos y se centrifugó a 4 000 rpm durante 20 min a 4 °C. El sobrenadante obtenido se empleó para la determinación de catalasa (CAT) y peroxidasa (POD), expresando los resultados como unidades de CAT mg g⁻¹ PF (Blackwell *et al.* 1990) y unidades de POD mg g⁻¹ PF (Pascual *et al.* 1983), respectivamente.

Concentración de cobre

El Cu presente en los frutos se cuantificó por espectrofotometría de absorción atómica en modo flama, utilizando un equipo PERKIN-ELMER® 2380 y una curva externa de calibración, conforme a Allan (1971). Los valores se reportaron como miligramos por kilogramo de peso seco.

Análisis estadístico

Se aplicó un ANOVA correspondiente al diseño completamente al azar. Cuando se detectaron efectos significativos, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con $P \leq 0.05$. El procesamiento estadístico se efectuó en SAS® OnDemand for Academics.

RESULTADOS

Rendimiento

El análisis estadístico del rendimiento de frutos de habanero mostró que el tratamiento con 6 mg L⁻¹ de NPs-Cu presentó el mayor valor, con 413.33 g, lo que representó un incremento de 3% con respecto al tratamiento control (400.71 g), sin registrarse diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$). Por otra parte, el tratamiento con 4 mg L⁻¹ registró 401.67 g, equivalente a una ligera disminución del 0.20% en comparación con el control, mientras que el tratamiento de 2 mg L⁻¹ de las NPs-Cu presentó el valor más bajo (398.33 g), con una reducción del 0.60% respecto al tratamiento control (Figura 1).

Capacidad antioxidante

Los resultados del análisis estadístico para capacidad antioxidante mostraron diferencias significativas. El tratamiento testigo presentó el valor más bajo (12.71 µMeq Trolox 100 g⁻¹ PF). La aplicación de 2 mg L⁻¹ incrementó la capacidad antioxidante a 18.83, aumentando 33% con respecto al testigo. De manera similar, la dosis de 4 mg L⁻¹ registró un incremento del 38% en comparación

con el tratamiento control. El valor más alto se obtuvo con la concentración de 6 mg L⁻¹ (24.367 µMeq Trolox 100 g⁻¹), mostrando un incremento del 48% respecto al testigo. De acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), la dosis de 6 mg L⁻¹ fue estadísticamente superior a los demás tratamientos; las dosis de 2 y 4 mg L⁻¹ no difirieron entre sí, y solo fueron significativamente mayores que el testigo (Figura 2).

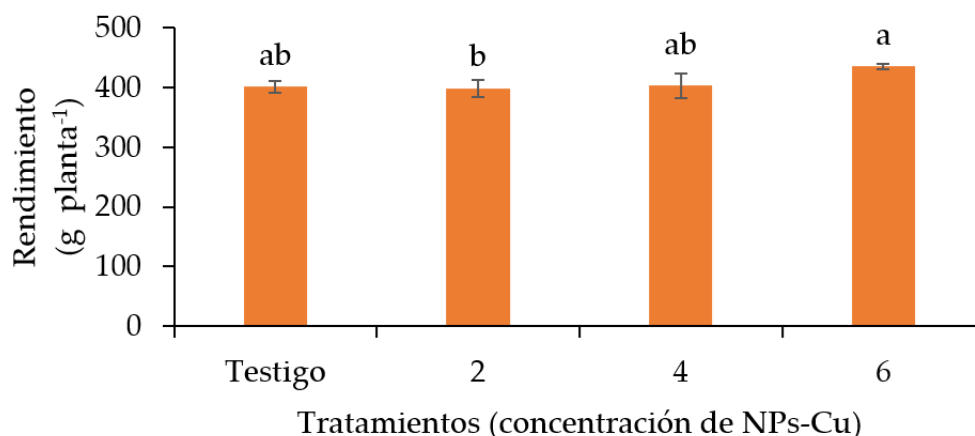


Figura 1. Rendimiento en gramos de frutos de chile habanero por planta por efecto de la aplicación foliar de NPs-Cu. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican separación estadística entre tratamientos mediante Tukey ($P \leq 0.05$).

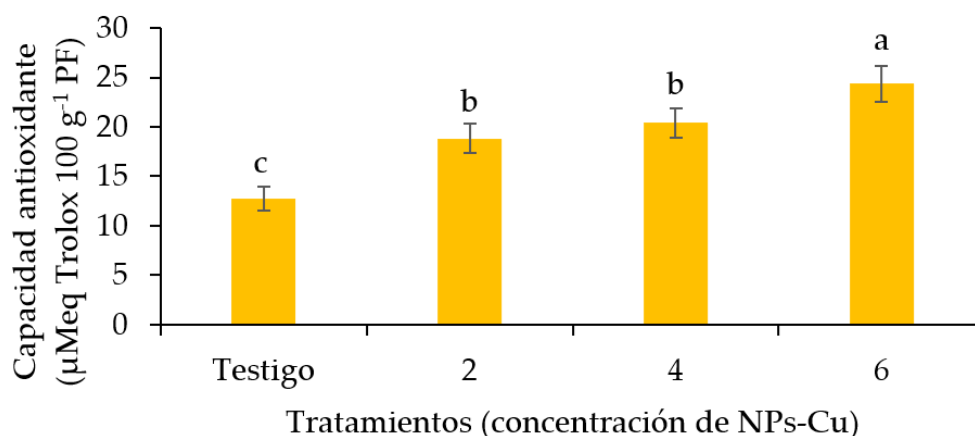


Figura 2. Capacidad antioxidante en frutos de chile habanero por efecto de la aplicación foliar de NPs-Cu. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican separación estadística entre tratamientos mediante Tukey ($P \leq 0.05$).

Fenoles totales

Del ANOVA aplicado al contenido total de fenoles no se registraron diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, la aplicación de las diferentes dosis de NPs-Cu no tuvo efecto significativo en las plantas tratadas de habanero (Figura 3).

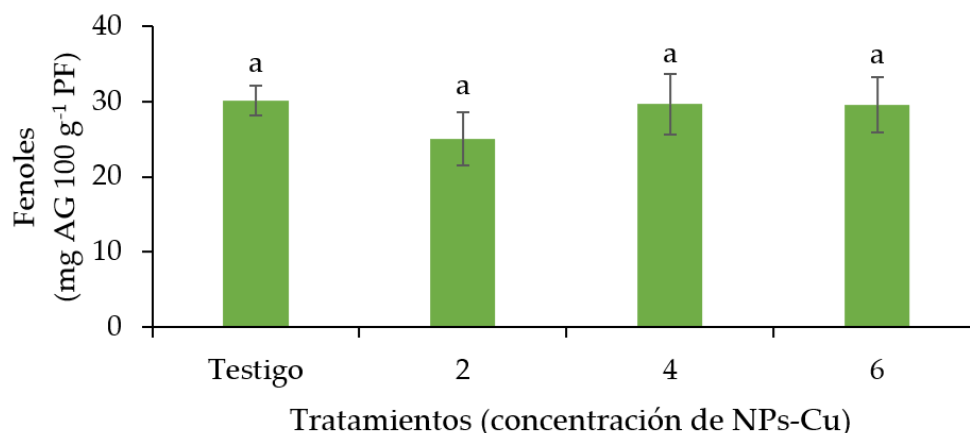


Figura 3. Fenoles totales en frutos de chile habanero por efecto de la aplicación foliar de NPs-Cu. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican separación estadística entre tratamientos mediante Tukey ($P \leq 0.05$).

Flavonoides totales

Para los flavonoides totales el análisis estadístico mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento testigo presentó el valor más bajo (26.113 mg EQ 100 g⁻¹ PF), mientras que las aplicaciones de 2, 4 y 6 mg L⁻¹ de las NPs-Cu incrementaron significativamente el contenido de flavonoides en 30, 38 y 42% (Figura 4). De acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), todos los tratamientos con NPs-Cu fueron estadísticamente superiores al testigo. Estos resultados indican que la aplicación de las NPs-CU incrementó significativamente la síntesis de este metabolito secundario, mostrando una respuesta positiva con las dosis aplicadas.

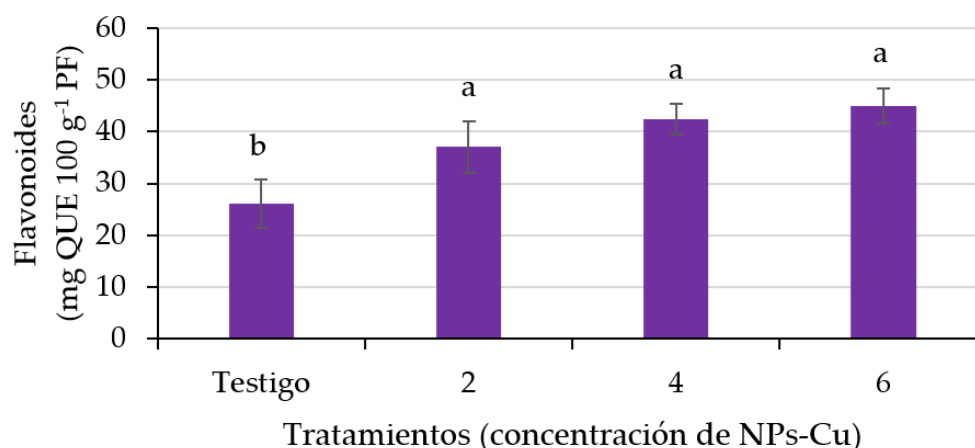


Figura 4. Flavonoides totales en frutos de chile habanero por efecto de la aplicación foliar de NPs-Cu. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican separación estadística entre tratamientos mediante Tukey ($P \leq 0.05$).

Actividad enzimática de la catalasa y peroxidasa

Los resultados muestran que la actividad de catalasa fue significativamente mayor en los tratamientos con 4 y 6 mg L⁻¹ de NPs-Cu en comparación con el testigo y el tratamiento de 2 mg L⁻¹. El tratamiento con 4 mg L⁻¹ presentó la actividad más alta, con un incremento de 79%, seguido por el de 6 mg L⁻¹ con 46% más de catalasa que el testigo. En cambio, el testigo y la dosis más baja

(2 mg L⁻¹) mostraron valores similares y significativamente menores. Estos resultados indican que la aplicación de NPs-Cu a 4 mg L⁻¹ fue la más efectiva para estimular la actividad de catalasa, mientras que dosis más bajas no generaron un efecto significativo y la dosis más alta (6 mg L⁻¹) presentó un incremento moderado, pero menor que la dosis intermedia (Figura 5).

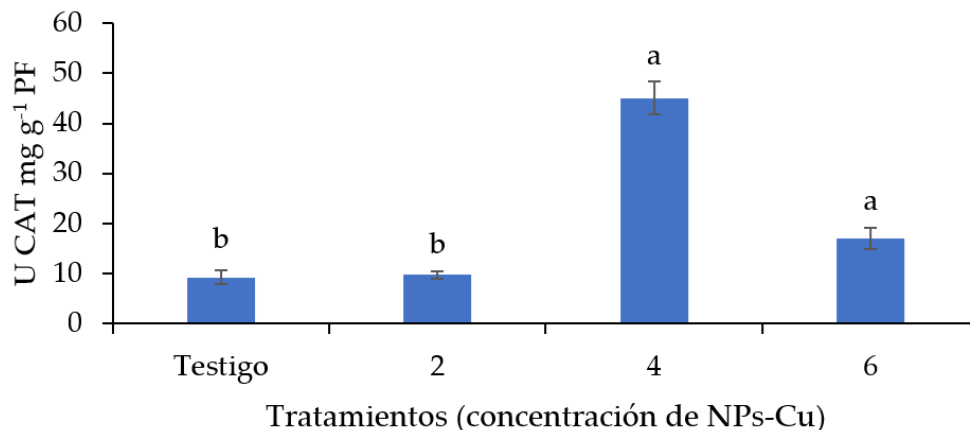


Figura 5. Actividad enzimática de la catalasa por efecto de la aplicación foliar de NPs-Cu. Las barras representan la media ± desviación estándar. Letras diferentes indican separación estadística entre tratamientos mediante Tukey ($P \leq 0.05$).

En cuanto a la actividad de la peroxidasa, el tratamiento con 6 mg L⁻¹ aumentó la actividad de la enzima en un 87% en comparación con el testigo, seguido de la concentración de 4 mg L⁻¹, que mostró un incremento del 77%; mientras que el tratamiento con 2 mg L⁻¹ no presentó diferencias significativas con el testigo (Figura 6). Los resultados evidencian que las dosis más altas de NPs-Cu estimularon significativamente la actividad de peroxidasa, potenciando el sistema antioxidante del chile habanero, mientras que las dosis más bajas no difirieron significativamente del control.

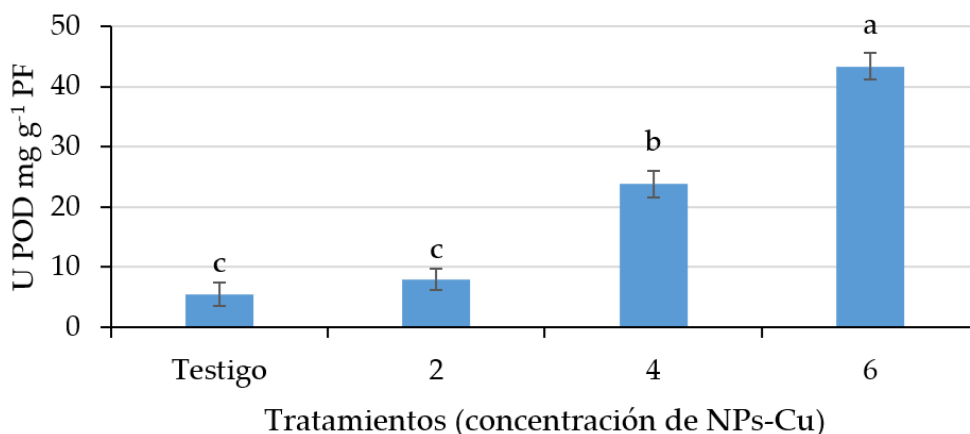


Figura 6. Actividad enzimática de la peroxidasa por efecto de la aplicación foliar de NPs-Cu. Las barras representan la media ± desviación estándar. Letras diferentes indican separación estadística entre tratamientos mediante Tukey ($P \leq 0.05$).

Concentración de capsaicinoides

Los resultados mostraron que la concentración de dihidrocapsaicina aumentó 22% en el tratamiento de 6 mg L⁻¹ de las NPs-Cu, mientras que las demás dosis (2 y 4 mg L⁻¹) no difirieron significativamente del control. Esto indica que solo la dosis más alta de NPs-Cu fue capaz de estimular de manera notable la biosíntesis de dihidrocapsaicina en los frutos de chile habanero. En contraste, la concentración de capsaicina no presentó diferencias significativas entre tratamientos ($P > 0.05$) (Tabla 1). Esto sugiere que la biosíntesis de capsaicina puede ser menos sensible a la aplicación de NPs-Cu o que otros factores fisiológicos del cultivo regulan su acumulación de manera más estricta.

Tabla 1. Concentración de capsaicinoides en los frutos de chile habanero

Tratamientos (NPs-Cu)	Dihidrocapsaicina (mg kg ⁻¹ PS)	Capsaicina (mg kg ⁻¹ PS)
Control	4438.81 ± 362.51 ^b	9383.61 ± 636.01 ^a
2 mg L ⁻¹	4637.34 ± 214.79 ^b	10239.8 ± 1041.44 ^a
4 mg L ⁻¹	4644.02 ± 246.73 ^b	9579.54 ± 1106.70 ^a
6 mg L ⁻¹	5662.28 ± 405.25 ^a	10260.84 ± 302.73 ^a

Se presentan medias ± desviación estándar. Dentro de cada columna, letras diferentes identifican diferencias entre tratamientos según Tukey ($p \leq 0.05$).

Concentración de cobre

Los resultados muestran que, en los frutos de chile habanero, aumentó significativamente la concentración de Cu con la aplicación de las NPs a 4 y 6 mg L⁻¹, alcanzando valores de 14 y 20% más, respectivamente, en comparación con el testigo y la dosis más baja de las NPS-Cu (2 mg L⁻¹); estos dos últimos tratamientos no mostraron diferencias significativas entre sí (Figura 7). Esto indica que existe un efecto dependiente de la concentración de las nanopartículas sobre la acumulación de cobre en el fruto. Las aplicaciones de 4 y 6 mg L⁻¹ de NPs-Cu incrementaron la concentración de cobre sin comprometer la seguridad del cultivo; mientras que la dosis más baja no fue suficiente para inducir cambios significativos en la acumulación de este microelemento.

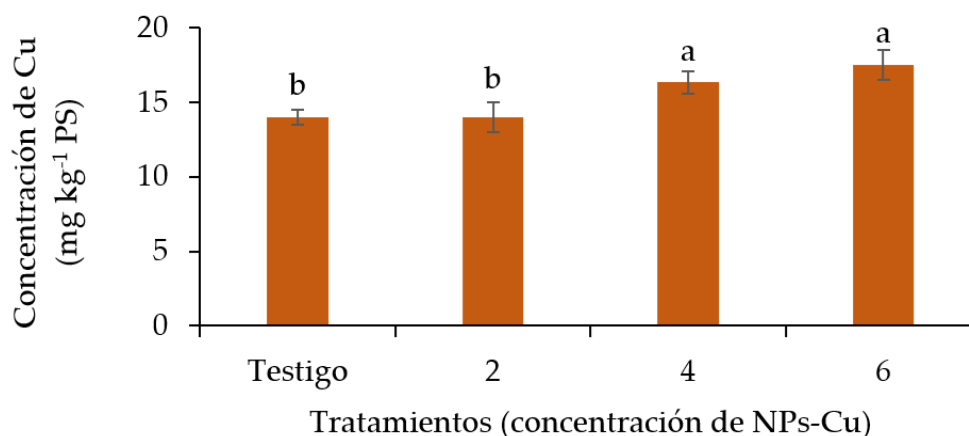


Figura 7. Concentración de cobre en frutos de chile habanero por efecto de la aplicación foliar de NPs-Cu. Las barras representan la media ± desviación estándar. Letras diferentes indican separación estadística entre tratamientos mediante Tukey ($P \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

Rendimiento

El rendimiento en *Capsicum* está estrechamente relacionado con la capacidad de la planta para mantener su equilibrio fisiológico frente al estrés. La aplicación de NPs-Cu no generó incrementos significativos en el rendimiento de frutos, aunque la dosis de 6 mg L⁻¹ mostró un incremento del 3% respecto al testigo. Este comportamiento sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, las nanopartículas no tuvieron un efecto determinante sobre la productividad. Estos resultados difieren de lo reportado por Buendía-García *et al.* (2024), quienes observaron incrementos significativos en el rendimiento tras la aplicación de NPs-Cu, lo que indica que la respuesta puede depender de factores como la dosis, el cultivo o las condiciones ambientales. No obstante, coincide con lo señalado por Díaz-Parra *et al.* (2025), quienes mencionan que los efectos de los nanomateriales sobre el rendimiento están asociados con el estado fisiológico de la planta.

Capacidad antioxidante

En contraste, la capacidad antioxidante mostró un incremento significativo en todos los tratamientos con NPs-Cu, siendo la dosis de 6 mg L⁻¹ la más efectiva, con un aumento del 48% respecto al testigo. Este resultado confirma que las nanopartículas de cobre estimulan mecanismos de defensa antioxidante, lo que coincide con Siddiqi y Husen (2020). Este resultado puede explicarse por la inducción de respuestas antioxidantes que permiten la neutralización de especies reactivas de oxígeno (ERO), tal como lo describen Peralta-Pérez y Volke-Sepúlveda (2012), contribuyendo a mantener la estabilidad fisiológica de la planta bajo condiciones de estrés.

Fenoles totales

En el caso de los fenoles totales, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica que las dosis de NPs-Cu evaluadas no fueron suficientes para inducir cambios en este metabolito. Este resultado contrasta con lo reportado por Genady *et al.* (2016), quienes observaron incrementos en fenoles tras la aplicación de nanopartículas de cobre, lo que sugiere que la respuesta puede depender de la concentración, el tipo de nanopartícula o las condiciones experimentales. Por lo tanto, es necesario profundizar en la optimización de dosis para promover la acumulación de este tipo de compuestos.

Flavonoides totales

Por otro lado, los flavonoides totales incrementaron significativamente en todos los tratamientos con NPs-Cu, mostrando una respuesta positiva dependiente de la concentración. Este comportamiento indica que las nanopartículas favorecen la síntesis de metabolitos secundarios asociados con la defensa vegetal. Estos resultados coinciden con lo reportado por Shelke *et al.* (2023), quienes destacan el papel de los flavonoides en la neutralización de ERO. Asimismo, estos resultados respaldan lo señalado por Pivaral *et al.* (2026), quienes mencionan que las nanopartículas pueden estimular la acumulación de compuestos bioactivos, contribuyendo a mejorar la calidad fitoquímica de los cultivos.

Actividad enzimática de la catalasa y peroxidasa

En relación con la actividad enzimática, se observó que las actividades de catalasa y peroxidasa aumentaron de forma significativa en las dosis medias y altas de NPs-Cu. La mayor actividad de catalasa se registró en la dosis de 4 mg L⁻¹, mientras que la peroxidasa alcanzó su valor máximo con 6 mg L⁻¹. Estos resultados evidencian una respuesta diferencial dependiendo de la enzima y la concentración aplicada. Este comportamiento coincide con lo reportado por Fortis-Hernández *et al.* (2024b), quienes señalaron que las nanopartículas pueden estimular enzimas antioxidantes. Este efecto puede atribuirse al cobre como cofactor enzimático, tal como lo menciona Akhtar *et al.* (2026), lo que favorece la activación de rutas metabólicas relacionadas con la defensa.

Concentración de capsaicinoides

En cuanto a los capsaicinoides, la dihidrocapsaicina aumentó significativamente únicamente en la dosis de 6 mg L⁻¹, mientras que la capsaicina no mostró cambios significativos. Esto sugiere una respuesta específica en la ruta biosintética de estos compuestos. Este resultado coincide parcialmente con Fernández *et al.* (2016), quienes señalan que los capsaicinoides tienen actividad antioxidante en *Capsicum*. Sin embargo, el efecto limitado observado sugiere que la regulación de estas rutas metabólicas es compleja y dependiente de la dosis, como también lo indican Fortis-Hernández *et al.* (2024a) y Pérez-Hernández *et al.* (2024).

Concentración de cobre

Finalmente, la acumulación de cobre en los frutos con la aplicación de NPs-Cu coincide con lo reportado por Buendía-García *et al.* (2024), quienes observaron incrementos significativos en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.). Asimismo, estudios previos han demostrado que las nanopartículas mejoran la absorción y translocación de micronutrientes en los tejidos vegetales (Feigl 2023), lo que puede favorecer procesos metabólicos dependientes de este elemento.

CONCLUSIONES

Las respuestas del chile habanero a las NPs-Cu dependieron de la concentración y de la variable analizada. Los tratamientos de 4 y 6 mg L⁻¹ estimularon CAT y POD, además de incrementar la capacidad antioxidante y los flavonoides. La dihidrocapsaicina respondió a la concentración más alta, mientras que la capsaicina y los fenoles totales permanecieron sin cambios. La aplicación también favoreció la acumulación de Cu en los frutos, pero no modificó significativamente el rendimiento respecto al testigo. Estos resultados muestran el potencial de las NPs-Cu para inducir respuestas antioxidantes y promover la biofortificación; no obstante, se requieren estudios adicionales para definir dosis óptimas y conocer sus efectos prolongados sobre el crecimiento, la fisiología y la calidad del fruto.

AGRADECIMIENTOS

Alexis Gabriel Pivaral Chávez agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado durante la realización de los estudios de doctorado,

el financiamiento otorgado que hizo posible el desarrollo de la presente investigación. De igual manera, se reconoce el respaldo institucional y académico que contribuyó al cumplimiento de los objetivos del estudio a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN).

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores señalan que no existen conflictos de interés.

LITERATURA CITADA

- Akhtar MT, Lu Z, Ren SX, Zou HL, Noor I, Jin B (2026) Copper homeostasis: Crosstalk with plant secondary metabolism and stress responses. *Plant Science* 362: 112795. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112795>
- Allan JE (1971) The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy. Varian techtron, Walnut Creek, California, USA 15p.
- Blackwell RD, Murray AJS, Lea PJ (1990) Enzymes of photorespiratory carbon pathway. In: Lea PJ (ed) *Methods in plant biochemistry*. Academic Press. USA. pp. 129-144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-461013-2.50015-0>
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C (1995) Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology* 28: 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Buendía-García A, Paredes-Jácome JR, Guillén-Enríquez RR, Márquez-Guerrero SY, Preciado-Rangel P, Ramírez-Gottfried RI (2024) La biofortificación con nanopartículas de cobre mejora el rendimiento y compuestos bioactivos en frutos de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 15(8). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i8.3851>
- Díaz-Parra DG, García-Casillas LA, Velasco-Ramírez SF, Guevara-Martínez SJ, Zamudio-Ojeda A, Zuñiga-Mayo VM, Rodríguez-Guzmán E, Melchor-González A, Lomelí-Rosales DA, Velázquez-Juárez G (2025) Role of metal-based nanoparticles in *Capsicum* spp. plants. *ACS Omega* 10(11): 10756-10768. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11102>
- Feigl G (2023) The impact of copper oxide nanoparticles on plant growth: a comprehensive review. *Journal of Plant Interactions* 18(1): 2243098. <https://doi.org/10.1080/17429145.2023.2243098>
- Fernández BG, Liazid A, Azaroual L, Palma M, García BC (2016) Capsaicinoid contents in peppers and pepper-related spicy foods. *International Journal of Food Properties* 19(3): 485-493. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.968468>
- Fortis-Hernández M, Pivaral-Chávez AG, Galindo-Guzmán AP, Preciado-Rangel P, Ruiz-Ortega FJ, Trejo-Valencia R (2024b) Nanopartículas de óxido de zinc para incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11(1). <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3939>
- Fortis-Hernández M, Sánchez-Estrada A, Hernández-Cruz D, Lagunes-Fortiz E, Betancourt-Galindo R, Fortiz-Hernández J (2024a) La biofortificación con nanopartículas de óxido de zinc vía foliar aumenta la acumulación de biomasa y calidad fitoquímica de la lechuga. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 120(4): 344-359. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.009>
- Gao M, Chang J, Wang Z, Zhang H, Wang T (2023) Advances in transport and toxicity of nanoparticles in plants. *Journal of Nanobiotechnology* 21(1): 75. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01830-5>

- Genady EA, Qaid EA, Fahmy AH (2016) Copper sulfate nanoparticales *in vitro* applications on *Verbena bipinnatifida* Nutt. Stimulating growth and total phenolic content increasments. International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences 5(1): 196-202.
- Hossain Z, Yasmeen F, Komatsu S (2020) Nanoparticles: synthesis, morphophysiological effects, and proteomic responses of crop plants. International Journal of Molecular Sciences 21(9): 3056. <https://doi.org/10.3390/ijms21093056>
- Lamaison JLC, Carnat A (1990) Contents in main flavonoid compounds of *Crataegus Monogyna* Jacq. and *Crataegus laevigata* (Poiret) D. C. flowers at different development stages. Pharmaceutica Acta Helvetica 65: 315-320.
- Mohd HN, Yusof NA, Yahaya AF, Mohd RNN, Othman R (2019) Carotenoids of capsicum fruits: Pigment profile and health-promoting functional attributes. Antioxidants 8(10): 469. <https://doi.org/10.3390/antiox8100469>
- Morán-Bañuelos SH, Aguilar-Rincón VH, Corona-Torres T, Castillo-González F, Soto-Hernández RM, San Miguel-Chávez R (2008) Capsaicinoides en chiles nativos de Puebla, México. Agrociencia 42(7): 807-816.
- Olvera GC, Zavala D, Inungaray MLC (2017) Análisis fitoquímico: Una herramienta para develar el potencial biológico y farmacológico de las plantas. Tlatemoani: Revista Académica de Investigación 8(24): 71-86.
- Pascual MR, Pereda CM, Pérez R (1983) Inverse correlation between estrogen receptor content and peroxidase activity in human mammary tumors. Neoplasma 30: 611-613.
- Peralta-Pérez MdelR, Volke-Sepúlveda TL (2012) La defensa antioxidante en las plantas: Una herramienta clave para la fitorremediación. Revista Mexicana de Ingeniería Química 11(1): 75-88.
- Pérez-Hernández H, López-Valdez F, Juárez-Maldonado A, Méndez-López A, Sarabia-Castillo CR, García-Mayagoitia S, Torres-Gómez AP, Valle-García JD, Pérez-Moreno AY (2024) Implicaciones de los nanomateriales utilizados en la agricultura: una revisión de literatura de los beneficios y riesgos para la sustentabilidad. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología 17(32). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69720>
- Pivaral CAG, Flores HEA, Moreno RA, Galindo GM, Galindo GAP (2026) Importancia y perspectiva futura de las nanopartículas para desencadenar metabolitos secundarios en las plantas. Agraria 23(1). <https://doi.org/10.59741/agraria.v23i1.705>
- Ruiz-Lau N, Medina-Lara F, Martínez-Estévez M (2011) El chile habanero: su origen y usos. Ciencia 63(3): 70-76.
- Salas-Pérez L, Borroel-García VJ, Ramírez-Aragón MG, Moncayo-Luján MDR (2018) Efecto de la adición de ácido ascórbico y té de composta en la producción y capacidad antioxidante de forraje hidropónico de maíz. Nova Scientia 10(20): 47-63. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1168>
- Sánchez-Valdés S, Rodríguez-González JA, Sánchez-Martínez AC, Bustos K, Vargas CM, Cruz ML, Torres-González J, Ramírez-Barron SN (2024) Tendencias en el uso de nanopartículas en la agricultura. Revista Latinoamericana de Difusión Científica 6(11): 20-39. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12686022>
- Shelke DB, Islam NF, Chambhare MR, Sonawane HB, Patowary R, Prasad R, Sarma H (2023) Enhancing secondary metabolites and alleviating environmental stress in crops with mycogenic nanoparticles: A comprehensive review. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 52: 102805. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102805>
- SIAP (2024) Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. Fecha de consulta: 17 de febrero de 2026.
- Siddiqi KS, Husen A (2020) Current status of plant metabolite-based fabrication of copper/copper oxide nanoparticles and their applications: a review. Biomaterials Research 24(1): 11. <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00188-1>

- Singh DS, Sharma V, Kumar SA, Singh SY, Hossain A, Verma V, Singh P, Kaur GM, Singh J, Singh BS, Verma G, Singh J, Singh P (2023) Agronomic biofortification of forage crops with zinc and copper for enhancing nutritive potential: a systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 103(4): 1631-1643. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12353>
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-Raventós RM (1999) Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology* 299(7): 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)