



Nanopartículas de cobre y su efecto en el crecimiento y la clorofila de tomates injertados

Luis Eduardo Tamayo-Ruiz*
ORCID: 0000-0002-5377-8233

Leandro Charão-Schwertner**
ORCID: 0000-0002-3597-496X

Andrés Adrián Urías-Salazar*
ORCID: 0000-0003-1113-7785

<https://doi.org/10.29105/cienciauanl28.135-4>

RESUMEN

El cobre es esencial en procesos fisiológicos de las plantas, su aplicación como nanopartículas de cobre (NPCu) puede mejorar el desarrollo vegetal. Este estudio evaluó el efecto de cuatro dosis de NPCu (0, 20, 60 y 100 ppm) y tres tipos de injerto en tomate bajo condiciones controladas. El objetivo fue analizar su impacto en altura, diámetro de tallo y contenido de clorofila. Los resultados mostraron variaciones asociadas al tipo de injerto, mientras que las NPCu no evidenciaron sinergia positiva con injertos. Se recomienda ampliar el número de repeticiones y considerar mediciones fisiológicas más precisas para comprender mejor los efectos de las NPCu en la fotosíntesis.

Palabras clave: fisiología vegetal, estrategias agronómicas, micronutrientes, tecnología experimental.

ABSTRACT

Copper is essential for the physiological processes of plants and its application in the form of copper nanoparticles (CuNPs) may enhance plant development. This study evaluated the effect of four CuNP doses (0, 20, 60, and 100 ppm) and three grafting types in tomato plants grown under controlled conditions. The objective was to analyze their impact on plant height, stem diameter, and chlorophyll content. The results showed variations associated with graft type, while CuNPs did not exhibit a positive synergy with grafting. Increasing the number of replications and incorporating more precise physiological measurements is recommended to better understand the effects of CuNPs on photosynthesis.

Keywords: Plant physiology, agronomic strategies, micronutrients, experimental technology.

El cobre es un micronutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Está vinculado en la activación de enzimas y síntesis de proteínas en especies vegetales. Las nanopartículas de este metal, por su parte, se miden en nanómetros y oscilan en un rango de 1 a 100 nm. Presentan propiedades importantes: inhibir efectivamente el desarrollo de muchos microorganismos patogénicos (Naika *et al.*, 2015), promover el incremento de distintos tipos de plantas (Jahagirdar *et al.*, 2020) y, gracias a sus dimensiones, son de fácil absorción en el sistema vegetal.

Sus beneficios dependen de varios factores: la concentración, los intervalos de aplicación, tamaño y, sobre todo, la especie vegetal (Shalaby *et al.*, 2016), ya que promueve mayor tasa de germinación, crecimiento, nutrición y un incremento de raíces laterales, además contribuye a parámetros fisiológicos y bioquímicos (Jahagirdar *et al.*, 2020; Jalali *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2007).

Bajo esas condiciones, y por las posibilidades que ofrecen las nanopartículas, sería posible adaptarlas al contexto agronómico al potenciarlo con

* Universidad del Valle de México-Campus Victoria, Ciudad Victoria, México.
** Universidade do Estado de Mato Grosso, Mato Grosso, Brasil.
Contacto: tamayo.eduardo@outlook.com

otras prácticas, por ejemplo, los injertos, los cuales permiten incrementar la calidad del fruto, la tasa de absorción de nutrientes y la precocidad del cultivo, sin embargo, son interacciones que deben evaluarse y validarse a través de experimentos (Bayoumi *et al.*, 2022; Davis *et al.*, 2008). Por lo anterior, el objetivo del presente fue considerar los efectos de las dosis de nanopartículas de cobre y plantas injertadas sobre la altura y diámetro de tallo final y contenido de clorofila en un ambiente controlado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Se emplearon plántulas de tomate de las variedades Río Grande y Portainjerto Guardior F1 como material vegetal. Estas se obtuvieron a partir de semillas cultivadas en charolas con sustrato *peatmoss*, los portainjertos, debido a su vigor, fueron sembradas tres días después de las plantas que se injertarían. Los injertos se realizaron a los 32 días a través del método de empalme, se utilizaron clips a manera de soporte de los tallos y tuvieron 48 horas en fase oscura y luego luz difusa con humedad relativa del 90% con el fin de evitar la deshidratación de las uniones entre injerto y portainjerto. Después de 12 días, fueron trasplantadas en bolsas de polietileno negro, rellenas con una mezcla de sustrato compuesta por 50% de *peatmoss*, 25% de perlita y 25% de vermiculita.

Todo el proceso de injertos y experimental se llevó a cabo bajo condiciones controladas en una cámara ambiental Biotronette III, con una temperatura media de 25.5°C y una humedad relativa del 92%. Se estableció un ciclo de luz/oscuridad de 12 horas con lámparas de

Tabla I. Detalle de los tratamientos establecidos en el experimento.	
Condición de injerto	Dosis de nanopartículas de Cobre (ppm)
No Injertado (Ni)	0
	20
	60
	100
Autoinjertado (Ai)	0
	20
	60
	100
Injertado (In)	0
	20
	60
	100

crecimiento de amplio espectro, un total de 12 tratamientos (tabla I), cada uno con tres repeticiones, y cada planta considerada como una unidad experimental. Para la prueba se empleó un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 3x4, donde el primer factor fueron las condiciones de injerto (CI) y las dosis de nanopartículas de cobre (NPsCu), incluido un testigo.

Las tres aplicaciones de nanopartículas de cobre se realizaron en las hojas mediante atomizadores, con intervalos de siete días. Cada planta fue aislada para recibir su respectivo tratamiento, mientras que en los testigos se empleó agua destilada. En todos los casos se administró una descarga promedio de 2 ml por planta.

Cuarenta días después del trasplante, se registraron las siguientes variables: altura (AP) en cm, diámetro de tallo (DT) en mm y contenido relativo de clorofila en unidades SPAD, determinados en una o dos hojas de la zona media (ZM1, ZM2) y dos hojas de la zona superior (ZS1, ZS2) de cada planta. El índice SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) permite estimar de manera rápida y no destructiva la cantidad de clorofila, la cual está estrechamente relacionada con la capacidad fotosintética y se basa en la absorbancia de la luz en longitudes de onda específicas. Las mediciones se llevaron a cabo con un dispositivo medidor de clorofila (Minolta SPAD 502). Los datos recopilados fueron analizados utilizando el paquete estadístico JMP Pro, versión 13.0.0. Se realizó un análisis de varianza, seguido de comparaciones de medias Tukey, con un nivel de significancia establecido en p=0.05.

RESULTADOS

Basado en el análisis de varianza se visualiza que las nanopartículas tienen un efecto significativo sobre la altura, el diámetro del tallo y unidades SPAD de la zona media y superior de la planta (tabla II); por su parte, el injerto presenta influencia en la altura, el diámetro de tallo y parcialmente en las unidades SPAD de la zona superior. No se detectaron interacciones relevantes entre el injerto y las nanopartículas de cobre en ninguna de las variables analizadas. En otras aplicaciones de nanopartículas de silicio en el cultivo de tomate, se promovieron altos niveles de minerales, fitohormonas y otros compuestos en plantas injertadas (Sayed *et al.*, 2022), por lo que en este caso se descarta la sinergia potencial de las nanopartículas de cobre e injertos de plántulas de tomate.

Tabla II. Significancia estadística y coeficientes de determinación (R²) de los efectos de la condición de injerto (CI) y dosis de nanopartículas de cobre (NPsCu) sobre variables morfológicas y fisiológicas de la planta.				
Variable	R²	CI	NPsCu	CI X NPsCu
Enero	0.73	<0.001	0.0011	NS
Febrero	0.57	0.011	0.0125	NS
Marzo	0.48	NS	0.0071	NS
Abril	0.58	NS	0.0005	NS
Mayo	0.44	NS	0.0258	NS
Junio	0.42	0.047	NS	NS

Con relación a la variable altura de planta, se presentó un cambio en función de las dosis de nanopartículas (figura 1a); en ese sentido, la administración de NPsCu puede incrementarla (Priyanka *et al.*, 2019). Con base en lo anterior, la aplicación de 20 ppm de NPsCu generó mayor altura, sin embargo, fue contrastante respecto a la porción de 60 ppm de NPsCu, la cual pudo provocar toxicidad que dio lugar a un registro inferior.

Por su parte, la altura de plantas no injertadas fue superior a las injertadas y autoinjertadas (figura 1b), pero es importante considerar que esto puede ser compensado por el rendimiento de fruto (Sora *et al.*, 2019). Tales hallazgos permiten descartar la sinergia de las nanopartículas e injerto al menos para la variable altura de planta. En cuanto al diámetro de tallo, la cantidad de 100 ppm lo incrementó, posiblemente por su rol en la síntesis de lignina (Li *et al.*, 2023), un polímero que refuerza la estructura de las plantas (Maceda *et al.*, 2022), por lo que pudiera relacionarse el diámetro de tallo registrado con la dosis de 20 ppm de NPsCu.

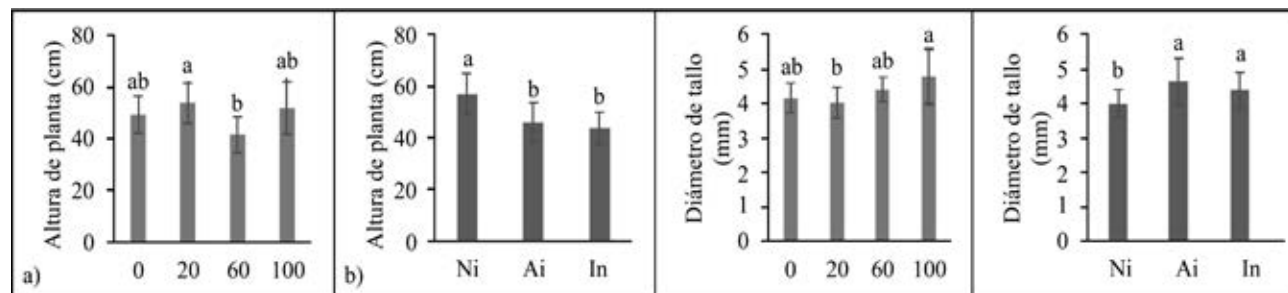


Figura 1. Efecto de las dosis de NPsCu (0, 20, 60 y 100 ppm) y tratamientos de injerto (No injerto: Ni; Autoinjertado: Ai; Injertado: In, en la altura de planta (a, b) y diámetro de tallo (c, d). Las barras muestran la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas Tukey: $p < 0.05$.

En los injertos, éste es influenciado por su condición de injerto, ya que el menor se presentó en plantas no injertadas. Además, el diámetro de tallo podría asociarse con mayor transporte de nutrientes y agua a través de la planta, lo que puede representar una ventaja para la producción de frutos (Al-Harbi *et al.*, 2018).

Desde un punto de vista teórico, se esperaba que la aplicación de nanopartículas de cobre aumentara la capacidad fotosintética, según el índice SPAD de la ZM1 (figura 2a); en contraste, las dosis de 60 ppm de NPsCu presentaron un índice SPAD bajo, sin embargo, se registró una alza al utilizar una concentración de 100 ppm de NPsCu. Esa misma dinámica se halló en ZM2 (figura 2d), por lo que el uso de nanopartículas para el incremento de la capacidad fotosintética podría ser un aspecto acumulativo, es decir, altas dosis con mayor periodicidad de las NPsCu o en su caso la cantidad en particular tuvo un nulo efecto basado en el tratamiento sin aplicación de NPsCu.

En este contexto, sería necesario realizar pruebas adicionales con otras dosis y frecuencias. Establecido lo anterior, es importante considerar que niveles óptimos de cobre pueden mejorar la fotosíntesis de la planta (Aqeel *et al.*, 2023). Por su parte, los injertos no presentaron diferencias, es decir, la cantidad de

clorofila no es afectada por la condición de injerto para la ZM1 y ZM2 de las plantas de tomate.

La dinámica de la ZS1 fue similar a la de la ZM1, lo que indica que las NPsCu tienen un efecto significativo sobre el contenido de clorofila (figura 3a), pero se requieren cantidades más elevadas para lograr un resultado positivo en la fotosíntesis, por lo que hay que considerar que las dosis excesivas pueden frenar procesos importantes en esta (Pádua *et al.*, 2010). Sin embargo, en otra revisión de la zona superior (figura 3c), los valores fueron similares y no exhibieron diferencias significativas, lo que podría atribuirse a lecturas insuficientes.

En el caso de los injertos, no mostraron incrementos en la zona superior (figura 3b), de modo que la dinámica puede ser contrastante entre hojas muestreadas (figura 3d). Las plantas autoinjertadas presentaron valores SPAD mayores en comparación con las no injertadas, lo que podría indicar que el procedimiento de autoinjerto aumenta la capacidad fotosintética, en cambio, demuestra que el injerto utilizado, en función de las unidades SPAD, no contribuye a la eficiencia en la fotosíntesis. Al respecto, algunos injertos tienen entre sus características ser efectivos para aprovechar el nitrógeno del suelo así como mejorar la tasas fotosintética (Zhang *et al.*, 2021).

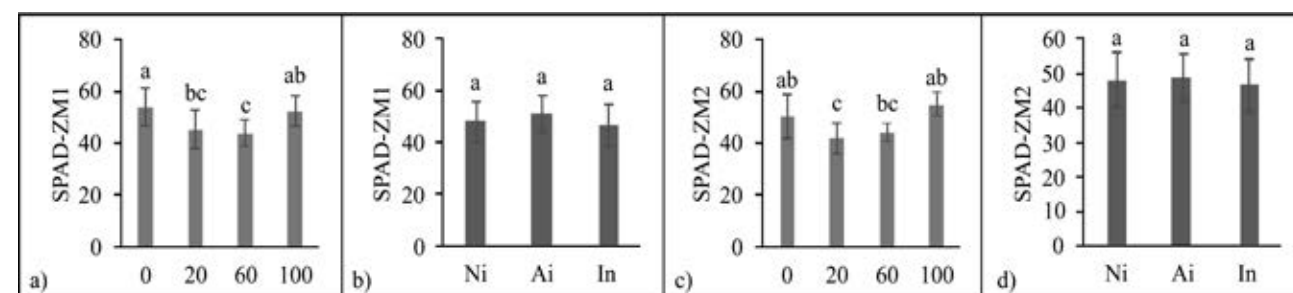


Figura 2. Efecto de las dosis de NPsCu (0, 20, 60 y 100 ppm) y tratamientos de injerto (No injerto: Ni; Autoinjertado: Ai; Injertado: In, sobre el índice SPAD de la zona media 1 (ZM1) de la planta (a, b) e índice SPAD de la zona media 2 (ZM2) de la planta (c, d). Las barras muestran la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas Tukey: $p < 0.05$.

ANÁLISIS REFLEXIVO

Aunque algunos de los resultados obtenidos en el experimento parecen estar asociados con los métodos aplicados, aquellos que no mostraron diferencias significativas podrían deberse a la variabilidad intrínseca de los datos. Inicialmente, se esperaba que cada tratamiento evidenciara efectos claros, especialmente en la interacción de los factores, dada la posible sinergia entre ellos. Además, las condiciones experimentales fueron controladas rigurosamente, consi-

derando variables como el tipo de suelo, temperatura, humedad y la luz en la cámara de crecimiento, lo que apuntaba a un escenario propicio para obtener efectos significativos.

Este hallazgo inesperado invita a reflexionar sobre dos aspectos fundamentales: primero, es posible que sea necesario revisar el diseño experimental, incrementando el número de repeticiones con el objetivo de reducir la variabilidad observada; aumentándolas mejoraría la precisión de los resultados y bajaría la influencia de factores externos. Segundo, es importante considerar el método utilizado al determinar

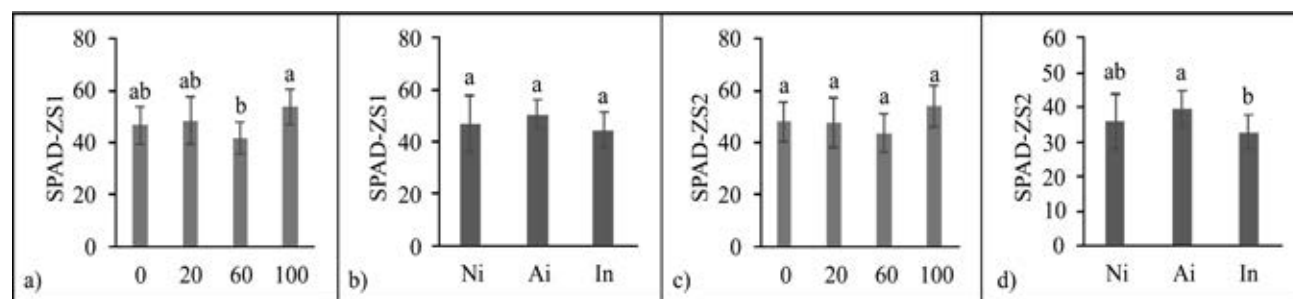


Figura 3. Efecto de las dosis de NPsCu (0, 20, 60 y 100 ppm) y tratamientos de injerto (No injerto: Ni; Autoinjertado: Ai; Injertado: In, sobre el índice SPAD de la zona superior 1 (ZS1) de la planta (a, b) e índice SPAD de la zona superior 2 (ZS2) de la planta (c, d). Las barras muestran la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas Tukey: $p < 0.05$.

las variables, especialmente la clorofila. Un enfoque más exacto pudiera incluir el uso de un equipo que mida la actividad fotosintética, abarcando parámetros como la tasa de transpiración, la fotosíntesis y la concentración de CO₂ intercelular. Asimismo, se buscaría evaluar la posibilidad de medir la clorofila mediante espectrofotometría, con el fin de obtener registros más robustos.

Si bien existen técnicas, por ejemplo, el suavizado de datos, que ofrecen respuestas más favorables, pueden comprometer la exactitud de los hallazgos. Por ello es crucial aceptar los resultados tal cual son, ya que forman parte integral del proceso de investigación y aprendizaje. Este tipo de situaciones no sólo ayuda a mejorar futuros trabajos, también refuerza la importancia de mantener la objetividad en el análisis de los datos.

REFERENCIAS

Bayoumi, Yousry, Shalaby, Tarek, Abdalla, Zakaria F., *et al.* (2022). Grafting of Vegetable Crops in the Era of Nanotechnology: A photographic Mini Review, *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 6(2022), 133-148.

Aqeel, Umra, Aftab, Tariq, Khan, M. Masroor A., *et al.* (2023). Excessive copper induces toxicity in *Mentha arvensis* L. by disturbing growth, photosynthetic machinery, oxidative metabolism and essential oil constituents, *Plant Stress*, 8, 100161.

Davis, Angela R., Perkins-Veazie, Penelope, Hassell, Richard, *et al.* (2008). Grafting effects on vegetable quality, *HortScience*, 43(6), 1670-1672, <http://doi.org/10.21273/hortsci43.6.1670>

Jahagirdar, Ajinkya S., Shende, Sudhir S., Gade, Aniket K., *et al.* (2019). Bioinspired synthesis of

copper nanoparticles and its efficacy on seed viability and seedling growth in mungbean (*Vigna radiata* L.), *Current Nanoscience*, 16(2), 246-252. <http://doi.org/10.2174/1573413715666190325170054>

Jalali, K., Nouairi, Issam, Kallala, Nadia, *et al.* (2018). Germination, seedling growth, and antioxidant activity in four legume (*Fabaceae*) species under copper sulphate fungicide treatment, *Pakistan Journal of Botany*, 50(4), 1599-1606.

Li, Yaping, Shi, Shuqian, Zhang, Ya, *et al.* (2023). Copper stress-induced phytotoxicity associated with photosynthetic characteristics and lignin metabolism in wheat seedlings, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 254, 114739.

Maceda, Agustín, Soto-Hernández Marcos, Peña-Valdivia, Cecilia B., *et al.* (2022). Lignina: composición, síntesis y evolución, *Madera y bosques*, 27(2), <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>

Naika, H. Raja, Lingaraju, K., Manjunath, K., *et al.* (2015). Green synthesis of CuO nanoparticles using *Gloriosa superba* L. extract and their antibacterial activity, *Journal of Taibah University for Science*, 9(1), 7-12, <http://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.04.006>

Pádua, Mario, Cavaco, Ana M., Aubert, Serge, *et al.* (2010). Effects of copper on the photosynthesis of intact chloroplasts: interaction with manganese, *Physiologia Plantarum*, 138(3), 301311.

Sayed, Eman G., Mahmoud, Abdel W. M., El-Mogy, Mohamed M., *et al.* (2022). The effective role of nano-silicon application in improving the productivity and quality of grafted tomato grown under salinity stress, *Horticulturae*, 8(4), 293.

Shalaby, Tarek A., Bayoumi, Yousry, Abdalla, Neama, *et al.* (2016). Nanoparticles, soils, plants and sustainable agriculture. In: S. Ranjan, N. Dasgupta, & E. Lichtfouse, (Eds) *Nanoscience in food and agriculture 1*, Springer, Berlin, 283312, http://doi.org/10.1007/978331939303-2_10

Singh, Dharam, Nath, Kamlesh, Sharma, Yogesh K. (2007). Response of wheat seed germination and seedling growth under copper stress, *Journal of Environmental Biology*, 28(2), 409-414.

Sullivan, Brooke K., Keough, Michael, Govers, Laura L. (2022). Copper sulphate treatment induces Heterostera seed germination and improves seedling growth rates, *Global Ecology and Conservation*, 35, e02079, <http://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02079>

Recibido: 23/02/2025
Aceptado: 07/10/2025

Descarga aquí nuestra versión digital.

