

Nanobiofortificación con cobre en sandía

Jazmín M. Gaucin-Delgado¹
Elizabeth Zúñiga-Valenzuela^{2,§}
Salma Carina Pérez-García¹
Cirilo Vázquez-Vázquez²
Ignacio Orona-Castillo²
Héctor D. García-Sánchez²

1 Universidad Politécnica de Gómez Palacio. Carretera El Vergel-La Torreña km 0 820, El Vergel, Gómez Palacio, Durango, México.

2 Facultad de Agricultura y Zootecnia-Universidad Juárez del Estado de Durango. Gómez Palacio, Durango, México.

Autor para correspondencia: elizabeth.zunigaval@yahoo.com.mx

Resumen

Los nanomateriales como las nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) son de suma importancia debido a sus aplicaciones en muy diversos aspectos de la como en la agricultura en la cual permite aumentar las características organolépticas de la parte comestible de la planta. En el presente trabajo consistió en evaluar diferentes concentraciones de NPs de CuO para mostrar su efecto en el rendimiento, calidad del fruto, calidad bioactiva y la concentración del Cu en frutos de sandía. Se evaluaron seis tratamientos de NPs CuO (0, 50, 100, 150, 200, 250 mg L⁻¹). Los resultados muestran que la aplicación foliar de Nps de Cu no afecta el rendimiento; sin embargo, a concentraciones altas aumenta la calidad de fruto, la calidad bioactiva y el contenido de Cu, obteniendo mejores resultados con el tratamiento de 250 mg L⁻¹. Por tanto, con la nanobiofortificación con NPs CuO resulta en frutos de sandía de mejor calidad debido a la acumulación de compuestos bioactivos.

Palabras clave:

Citrullus lanatus, compuestos biactivos, nanopartículas.



Introducción

La nanotecnología es considerada una tecnología de importancia en gran número de áreas de aplicación como es la agronomía, industria, medicina, química entre otras (Urquilla, 2019). Las nanopartículas (NPs) pueden ser sintetizadas a partir de diferentes materiales, así como de elementos naturales que incluyen plantas, bacterias y desechos orgánicos (Gómez-Garzón, 2018), que pueden ser usada para poder incrementar la productividad en los cultivos (Cumplido-Nájera *et al.*, 2019).

Las nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs), al ser sintetizadas por elementos naturales ejercen cierto recubrimiento orgánico que activa en la planta un estrés abiótico (Ananda *et al.*, 2018). Por ello se usa la biofortificación en los cultivos, ya que es una estrategia para aumentar al contenido nutrimental de micronutrientes en los frutos en las plantas (Schiavon *et al.*, 2020).

Además, el cobre al ser un micronutriente esencial en la nutrición mineral de las plantas, participa en reacciones de oxidación-reducción y forma parte de cuproenzimas que participan en procesos fundamentales para las plantas, tales como el transporte de electrones en la fotosíntesis y la respiración, metabolismo de nitrógeno y carbono (León Morales, 2012; López-Lima *et al.*, 2021).

Por otra parte, la sandía es una cucurbitácea que se produce en la mayor parte del mundo y su consumo es importante para los humanos debido a su alto contenido de beta-carotenos, licopeno, antioxidantes, vitaminas (B, C y E) y minerales (fosforo, magnesio, calcio y hierro) (Cavalcante *et al.*, 2019). Además, la sandía es uno de los cultivos más importantes en México debido a la gran cantidad de producción que exporta a nivel internacional (Sandoval *et al.*, 2019). Tan solo en el año México se ubicó en 12° lugar como productor mundial (SIAP, 2021).

Es por ello, que una de las estrategias para aumentar el contenido de Cu en los alimentos es a través de la biofortificación, que consiste en potencializar la bioactividad y contenido de Cu en las partes comestibles de las plantas (Hernández-Hernández *et al.*, 2019). Por lo cual, el objetivo de esta investigación es evaluar diferentes concentraciones de NPs de Cu en el cultivo de sandía, para mostrar su efecto en el rendimiento, calidad bio-activa y la concentración de Cu en los frutos de sandía.

Materiales y métodos

Área de estudio

El experimento se realizó bajo condiciones de campo en el ejido 13 de marzo, municipio de Gómez Palacio, Durango, México, el cual se localiza en las coordenadas 25° 29' 0" latitud norte y 103° 44' 25" longitud oeste y 1 110 msnm.

Nanopartículas de óxido de cobre

Las nanopartículas utilizadas en el experimento fueron donados por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México. Nanopartículas de morfología hemisférica, de color negro-marrón de aspecto oscuro (polvo), con un tamaño de 95 nm, teniendo una pureza del 99.8%, y sintetizadas por síntesis verde.

Aplicación de las nanopartículas

Los tratamientos evaluados consistieron en la aplicación foliar de nanopartículas de cobre utilizando las siguientes concentraciones: (0, 50, 100, 150, 200, 250 mg L⁻¹) (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021). El método para preparar las diferentes dosis fue utilizando una solución madre de CuO-NPs. Posteriormente, se prepararon las cinco dosis de nanopartículas en un matraz aforado de un litro, se vertió cada una de las concentraciones de nanopartículas por separado y se completó con agua destilada.

Luego, las soluciones finalizadas se transfirieron a pulverizadores manuales con una capacidad de 1 000 ml. Cada tratamiento se aplicó a cinco plantas, representando una unidad experimental (UE). La aspersión se realizó cada quince días después del trasplante (DAT), hasta concluir el ciclo del cultivo (90 días), con un total de ocho aplicaciones. Estas aplicaciones se realizaron en horario de mañana, concretamente entre las 7:00 y las 9:00 horas, utilizando un aspersora manual. El diseño experimental fue completamente al azar.

Material vegetal y condiciones del cultivo

El material vegetativo utilizado fue sandía roja (*Citrullus lanatus*) híbrido Syngenta®. La siembra directa se realizó el 1 de marzo de 2021. Se construyeron bordos a doble hilera formando una micro-parcela (cama sandillera) a una distancia de 4 m tanto en líneas como entre plantas. La siembra se realizó a espeje depositando de 3 a 4 semillas m^{-1} por golpe a una profundidad de 10 cm. En la zona de riego los bordos se trazaron con anchuras de 1.5 m con un fondo de canal de riego de 30 cm. La densidad de población fue de 3 200 plantas ha^{-1} , densidad de siembra: 1.5 kg ha^{-1} , distancia entre surcos de 2 m y distancia entre plantas de 1 m.

La preparación de suelo agrícola consistió en realizar un barbecho a 30 cm de profundidad, con rastreo doble, añadiendo nivelación al suelo agrícola, edificación de camas sandillera y bordos para conducción en la retención del agua de riego. La dosis de fertilización utilizada fue la de 160-80-00 (N-P₂O₅-K₂O); en la cual se incorporó el fósforo por completo con la mitad de N al momento de iniciar la siembra y el resto del nitrógeno cuando la planta inicio la floración. Los fertilizantes utilizados fueron NH₄H₂PO₄ y (NH₄)₂SO₄. El riego fue proporcionado con agua de la presa Francisco Zarco y agua de pozo profundo. Se aplicó un riego de presembrado de 30 cm, y durante el ciclo vegetativo del cultivo se dieron en total ocho riegos de auxilio con láminas de 15 cm cada uno.

VARIABLES EVALUADAS

Rendimiento y calidad de la fruta

Los frutos fueron cosechados a los 96 días después del trasplante una vez que alcanzaron la madurez comercial (cuando la mancha basal pasa de color blanco a cremoso y con sonidos graves a percusión). Se cuantificó el peso de fruto (PF), en todos los frutos cosechados, mismos que fueron pesados en una báscula digital (Truper®) con capacidad de 20 kg. Los sólidos solubles totales (SST) se midieron con un refractómetro manual (Atago Master 53M).

Compuestos bioactivos

Procesamiento de muestras

Se amalgamaron 2 g de fruto de melón con 10 ml de etanol al 80%. La mezcla se mantuvo en agitación durante un día usando un agitador "Stuart". Posteriormente, los tubos se sometieron a centrifugación a 120 x g durante el mismo tiempo. El sobrenadante, denominado extracto etanólico (EE), se separó para procedimientos analíticos posteriores.

Contenido fenólico

El contenido fenólico total se cuantificó mediante el método de Folin-Ciocalteu (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2021). Las muestras se cuantificaron con un espectrofotómetro ultravioleta (UV)-Vis a 760 nm (GENESYS 10S UV-Vis) y los resultados se expresaron como mg GAE 100 g⁻¹ de peso fresco (PF).

Contenido de flavonoides

El método de colorimetría cuantificó el contenido de flavonoides (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2021). Las muestras se cuantificaron con un espectrofotómetro ultravioleta (UV)-Vis a 510 nm (GENESYS 10S UV-Vis) y los resultados se expresaron como mg QE 100 g⁻¹ PF.

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante total se midió mediante el método DPPH+ (Brand-Williams *et al.*, 1995). Las muestras se cuantificaron con un espectrofotómetro ultravioleta (UV)-Vis a 517 nm (GENESYS 10S UV-Vis) y los resultados se presentan en forma de μM equivalente de Trolox 100 g⁻¹ PF.

Vitamina C

Se determinó mediante titulación según el método descrito en Hernández-Hernández *et al.* (2019). Luego se midió la absorbancia de las muestras a 515 nm usando un espectrofotómetro UV-Vis GENESYS 10S). Los resultados se expresan como mg de vitamina C por 100 g-1 PF.

Licopeno

Se realizó por el método reportado por Gómez-Romero *et al.* (2007), con algunas modificaciones. Las absorbancias se midieron por tres veces usando un espectrofotómetro UV-Vis (UV-Vis GENESYS 10S), rango de longitud de onda a 340-1 000 nm y un ancho de banda espectral: 5 nm a 503 nm. Se utilizó hexano absoluto como blanco. Las cantidades de licopeno en los tejidos se calcularon utilizando la siguiente fórmula: Licopeno (mg/kg)= (x/y) × A503 × 3.12, donde: x= cantidad de hexano (ml); y= el peso de la muestra; A= absorbancia a 503 nm y 3.12= coeficiente de extinción. Los resultados se expresaron en mg kg⁻¹.

Actividad enzimática

El superóxido dismutasa (SOD) (U ml⁻¹, donde U se define como la cantidad de enzima necesaria para exhibir 50% de dismutación del radical superóxido) se determinó mediante el kit SOD Cayman 706002[®] (Hernández-Hernández *et al.*, 2019).

La catalasa (CAT) (U TP⁻¹), donde U es igual al equivalente mM de H₂O₂ consumido por mililitro por minuto) se analizó por el método de Luna *et al.* (2019) y se realizó en dos pasos, [en el momento 0 (T0) y en el momento 1 (T1)]. La absorbancia se midió en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Fisher Scientific, modelo G10S, Waltham, MA, EE. UU.) a 270 nm.

El glutatión peroxidasa (GPX) [U por gramo de proteínas totales (U TP⁻¹), donde U es igual al equivalente mM de glutatión reducido (GSH) por mililitro por minuto] se evaluó mediante el método de Cosat Da y Shaiama, (2016). La absorbancia se midió mediante un espectrofotómetro UV-Vis (Mettler toledo, modelo UV7) a 412 nm.

Contenido de cobre

El contenido de cobre en sandía se determinó por espectrofotometría de absorción atómica. La pulpa de sandía fue secada en la estufa a 70 °C en papel estraza y posteriormente se maceró en un mortero. Se cuantificó Cu en el espectrofotómetro de absorción atómica (AA) los resultados fueron expresados en μg kg⁻¹ peso seco (AOAC, 1990).

Análisis de datos estadísticos

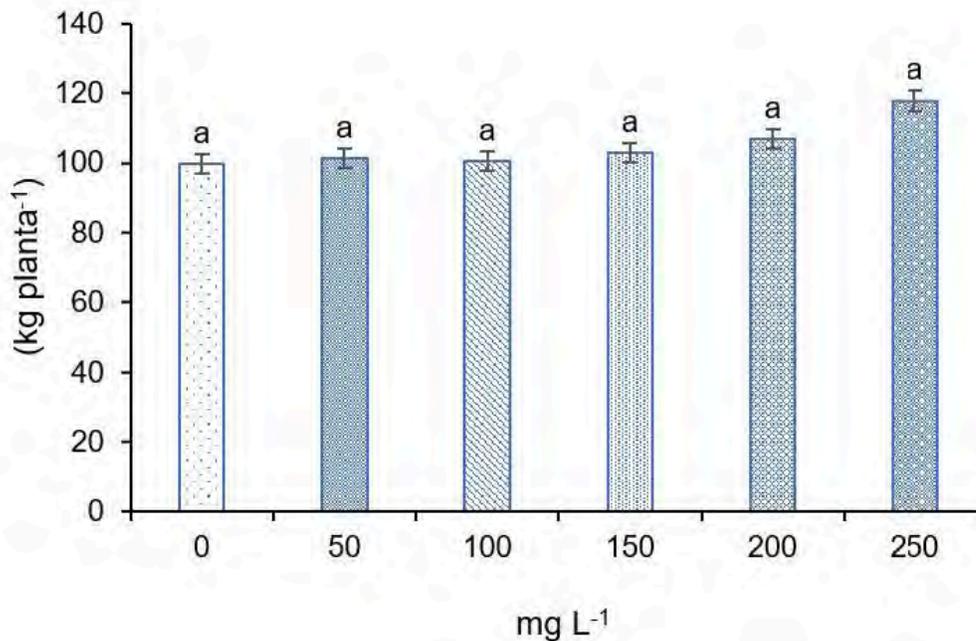
Los datos se evaluaron mediante análisis de varianza unidireccional y comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el software STATISTICA (versión 10.0; StatSoft, Tulsa, OK, EE. UU.).

Resultados y discusión

Rendimiento

La aplicación foliar de NPs CuO no afectó el rendimiento (Figura 1); sin embargo, el mayor peso del fruto se logró en las tratadas con la dosis de 250 mg L⁻¹. Las sandías tratadas con NP CuO obtuvieron un mayor rendimiento en comparación con el tratamiento control. El cobre se encuentra entre los ocho micronutrientes esenciales necesarios para el crecimiento de las plantas (Nazir *et al.*, 2019) y está asociado con numerosos procesos fisiológicos y bioquímicos (García-Bueno y Marín, 2021).

Figura 1. Rendimiento del cultivo de sandía por efecto de las diferentes concentraciones de Cu-NPs aplicadas vía foliar. Letras diferentes indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tukey.



Además, es un componente estructural de numerosas proteínas reguladoras y desempeña funciones clave al participar en la respiración mitocondrial, el metabolismo de la pared celular, el transporte fotosintético de electrones, las respuestas al estrés oxidativo, la síntesis de proteínas, la señalización hormonal y la detección de etileno (Li *et al.*, 2019; Nazir *et al.*, 2019). Además, se puede incorporar proteínas transportadoras de electrones (Pilon *et al.*, 2006; Zhang y Liu, 2020), afectar positivamente el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Cota-Ruiz *et al.*, 2022).

Esto último probablemente sea debido al efecto bioquímico de la regulación positiva del estrés oxidativo causado por el Cu. Por otro lado, altas concentraciones de NPs Cu pueden provocar en la planta que la homeostasis redox celular se altere, lo que resulta en una acumulación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS) que dañan las biomoléculas (lípidos, proteínas y ADN) e inhiben el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Zhao *et al.*, 2022).



Calidad del fruto

La aplicación de nanopartículas de óxido de cobre afectó significativamente en la calidad del fruto de sandía principalmente los sólidos solubles totales (SST) en un 58%, por otra parte, en acides titulable e índice de madurez no mostraron diferencia significativa (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto de la aplicación de CuO-NPs en la calidad de frutos de sandía.

Tratamiento (mg L ⁻¹)	Sólidos solubles totales (°Brix)	Firmeza (Newton)	Acides titulable (% AcC)	Índice de madurez
0	7.666 ab ¹	19.62 bc	0.477 a	18.559 a
50	7 b	25.42 a	0.574 a	12.534 a
100	8 ab	21.12 b	0.3878 a	20.691 a
150	8.333 ab	18.05 bc	0.3716 a	17.443 a
200	8.666 a	17.03 c	0.5934 a	14.598 a
250	8 ab	16.62 c	0.3258 a	24.872 a

* = letras diferentes indican diferencia significativa ($p \neq 0.05$) según la prueba de Tukey.

En cuanto al incremento de SST en los frutos tratados con NPs Cu, probablemente se deba a que el Cu promueve el aumento de la concentración de azúcares solubles (sacarosa, glucosa y fructosa) que participan como osmoprotectores durante el ajuste osmótico, así como provocar la activación de las cuproenzimas, antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD) y ascorbato peroxidasa (APX), y el sistema antioxidante no enzimático en el que se encuentran los compuestos fenólicos, con el fin de mantener las especies reactivas de oxígeno (ROS), como el O₂ y H₂O₂ en niveles mínimos (Shabbir *et al.*, 2020a) y esto a su vez tiene un efecto preponderante en la acumulación de sólidos solubles en frutas (Mir *et al.*, 2021).

Así mismo las frutas de sandía varían no solo en tamaño y forma, sino también en la acumulación de varios metabolitos, los más obvios incluyen los metabolitos importantes para la horticultura de la pigmentación externa e interna, los volátiles responsables del aroma de la fruta y los carbohidratos y ácidos orgánicos responsables de la dulzura y la acidez (Naz *et al.*, 2020).

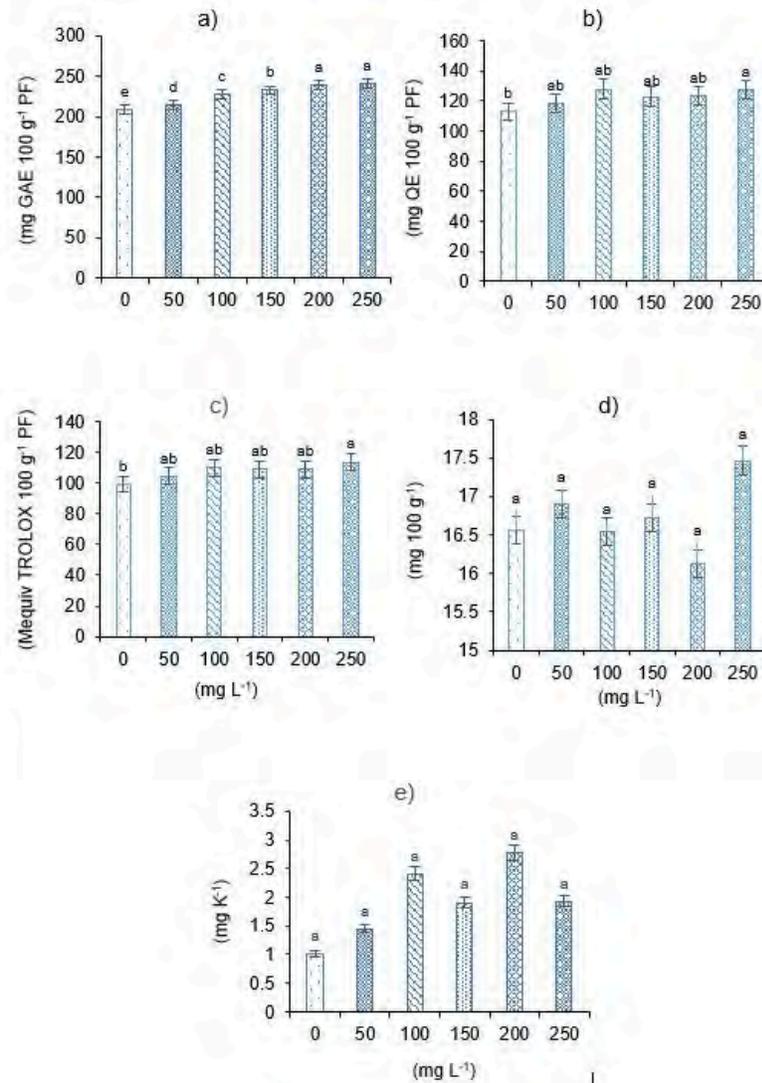
Además, las hormonas de la fruta, como el etileno y el ácido abscísico, y la composición de la pulpa (celulosa, hemicelulosa y pectina) determinan la maduración de la fruta, su vida útil y las composiciones químicas que influyen en la calidad del producto, como la firmeza de la fruta, la masticabilidad y gomosidad de la pulpa y la madurez (Anees *et al.*, 2021). Esto concuerda con lo señalado por Deng *et al.* (2022), quienes mencionan que aplicaciones foliares de Cu mejoran los sólidos solubles y la calidad de los frutos.

Calidad bioactiva

La aplicación foliar de nanopartículas de óxido de cobre mostro diferencias significativa para fenoles totales, flavonoides, capacidad antioxidante (Figura. 2) en los frutos de sandía, siendo el tratamiento de 250 mg L⁻¹ de CuO NPs el que obtuvo mayor concentración, superando en un 15.76%, respectivamente al testigo en fenoles totales, en flavonoides hasta un 12.96%, en capacidad antioxidante superando al testigo en un 14.79%, mientras que en vitamina C y en licopeno no existió diferencia significativa entre los tratamientos.



Figura 2. Efecto de la concentración de NPs Cu aplicado foliarmente sobre el contenido de fenoles totales (a); flavonoides totales (b); capacidad antioxidante (c); vitamina C (d) y licopeno (e) en frutos de sandía. Los valores promedio en columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas ($p \leq 0,05$).



Las CuO-NPs tienen potentes funciones antioxidantes, mejorando así la calidad bioactiva de la parte comestible del cultivo (Lasso-Robledo *et al.*, 2022) y reduciendo la producción de ROS, como O₂ y H₂O₂ (Kusiak *et al.*, 2023). Las NPs CuO en concentraciones adecuadas mejoran la calidad nutraceútica y acumulación de compuestos bioactivos (Kusiak *et al.*, 2023). A una concentración de 250 mg L⁻¹ de NPs Cu en cucurbitáceas tiene efecto positivo en la eliminación de radicales libres, capacidad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos (Fortis *et al.*, 2022).

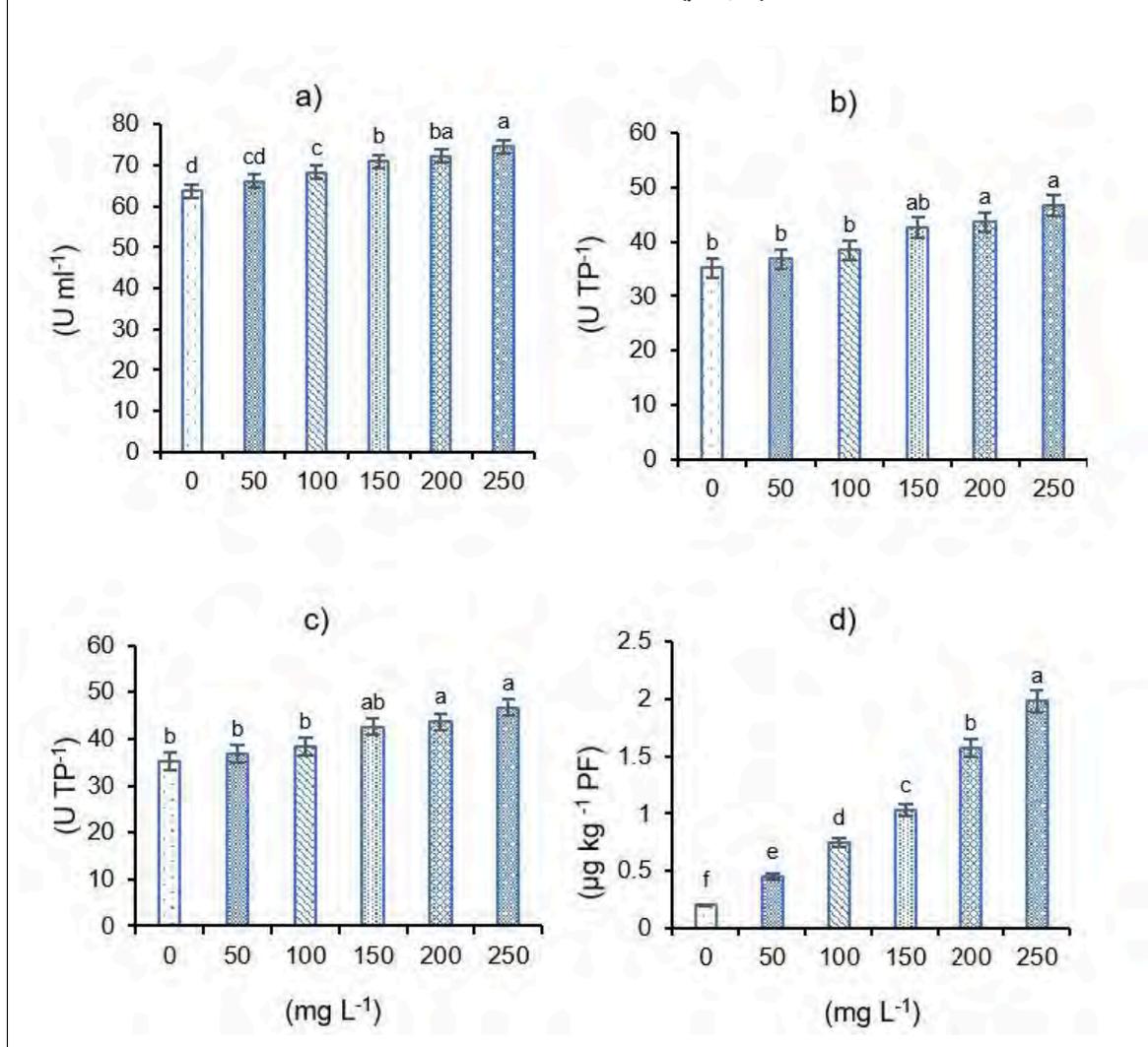
El contenido de licopeno en el fruto de sandía aumentó significativamente con la dosis de 250 mg L⁻¹, en comparación con el tratamiento control y dosis mayores de CuO NPs. La sandía se caracteriza por varios compuestos bioactivos mostrando diferentes estructuras químicas, como carotenoides, luteína, fenólicos y citrulina. Aunado a esto cuando la futa de sandía pasa de verde a rojo se activan el sistema antioxidante, de los carotenoides y las xantofias, responsables del diferente color de la pulpa de la sandía.

El licopeno es el principal carotenoide presente en las sandías de pulpa roja y rosada (Kang *et al.*, 2010). En la cual la sandía representa una fuente importante de carotenoides en los que oscila entre 15 mg/kg en la pulpa roja (Zamuz *et al.*, 2021). A medida que el fruto se vuelve rojo, el ascorbato y el glutatión disminuyen a medida que avanza la maduración del fruto.

Esta disminución se debe a la presencia de carotenoides (licopeno y β -caroteno), activados principalmente en la etapa de madurez del fruto. Además, la buena cantidad de polifenoles totales, vitamina C, citrulina y el excelente aporte de licopeno, que representa más del 40% respecto al tomate crudo, dan una medida de la importancia de esta fruta respecto a otros cultivos considerando los efectos beneficiosos de estos compuestos sobre la salud humana.

Las CuO NPs modificaron significativamente la actividad enzimática super oxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y glutatión en frutos de sandía (Figura 3). El uso de NPs en la la dosis de 250 mg L⁻¹ aumentó la actividad enzima en un 16.87, 32.67 y 15.26% con respecto al tratamiento sin nanopartículas. El cobre interactúa en el metabolismo celular de las plantas como centros catalíticos de proteínas al regular las actividades enzimáticas (Saleem *et al.*, 2020).

Figura 3. Efecto de la concentración de NPs Cu aplicado foliarmente sobre el contenido SOD (a), CAT (b), Glutatión (c) y contenido de Cu en los frutos de sandía (d). *Los valores promedio en columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas ($p \leq 0,05$).



El sistema antioxidante enzimático que comprende superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR), peroxidasa (POX), y antioxidantes no enzimáticos como vitaminas, flavonoides, estilbenos y carotenoides, apagar el exceso de ROS, proporcionando así un escudo contra el estrés oxidativo (Sachdev *et al.*, 2021).

Por tanto, las CuO-NPs podrían mejorar el mecanismo de defensa antioxidante enzimático de los frutos de sandía. Además, los CuO-NPs también se consideran como un importante activador de la enzima PAL en las plantas las cuales son el principal precursor de la síntesis de fenilpropanoides en plantas que actúan como inhibidores de la formación de oxígeno singlete, captadores de radicales libres y agentes reductores contra el estrés abiótico y biótico (Gaucin *et al.*, 2022).

Contenido de cobre en pulpa de sandía

La adición de 250 mg L⁻¹ incrementó el contenido de Cu en frutos de sandía, existe una correlación positiva entre el cobre en frutos y la dosis aplicada ($r^2= 0.99$) (Figura. 3d). el contenido de Cu en el cultivo depende de la edad de la planta, la especie vegetal y la forma química del elemento que se aplica, su concentración y el método de aplicación (Santás-Miguel *et al.*, 2023).

Estudios anteriores muestran que la biofortificación aumenta significativamente la cantidad de elementos esenciales en la parte comestible de las plantas (Buturi *et al.*, 2021), lo que puede aumentar en cultivos biofortificados con Cu hasta un 20% con respecto a cultivos no tratados (Fortis *et al.*, 2022b). El Cu en las plantas se metaboliza junto con el zinc dentro de los tejidos vegetales, transformándose en cuproenzimas (Rietra *et al.*, 2017) acelerando en el transporte, acumulación, volatilización y tolerancia al Cu en la planta (Guardiola-Márquez *et al.*, 2022).

Conclusiones

La aplicación foliar de CuO-NPs mejora la calidad bioactiva, la capacidad antioxidante y la concentración de Cu en frutos de sandía, además de aumentar la actividad de las enzimas (GPX, CAT y SOD), sin efectos negativos sobre el rendimiento. Por tanto, con la aplicación de CuO-NPs se producen frutos de sandía de mejor calidad para la dieta humana debido a la acumulación de compuestos bioactivos.

Bibliografía

- 1 Ananda-Murthy, H. C.; Abebe, B. A.; Prakash C. H. and Shantaveerayya, K. S. 2018. A review on green synthesis and applications of Cu and CuO nanoparticles. *Material Science Research India*. 15(3):279-295.
- 2 AOAC. 1990. Asociación de Químicos Analíticos Oficiales. Métodos oficiales de análisis 15^{va} Ed. Asociación de Químicos Analíticos Oficiales: Washington, DC, EE. UU.
- 3 Brand-Williams, W.; Cuvelier, M. E. and Berset, C. C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT Food Science and Technology*. 28(1):25-30.
- 4 Buturi, C. V.; Mauro, R. P.; Fogliano, V.; Leonardi, C. and Giuffrida, F. 2021. Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *En Foods*. 10(2):12-25.
- 5 Cavalcante, V. S.; Prado, R. M.; Vasconcelos, R. L.; Almeida, H. J. and Silva, T. R. 2019. Growth and nutritional efficiency of watermelon plants grown under macronutrient deficiencies. *HortScience*. 54(4):742-738.
- 6 Costa-Da, M. V. and Sharma, P. K. 2016. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*. 54(4):110-119.
- 7 Cumplido-Nájera, C. F.; González-Morales, S.; Ortega-Ortíz, H.; Cadenas-Pliego, G.; Benavides-Mendoza, A.; and Juárez-Maldonado, A. 2019. The application of copper

- nanoparticles and potassium silicate stimulate the tolerance to *clavibacter michiganensis* in tomato plants. *Scientia Horticulturae*. 245(8):82-89.
- 8 Fortis-Hernández, M.; Ortiz-Lopez, J.; Preciado-Rangel, P.; Trejo-Valencia, R.; Lagunes-Fortiz, E.; Andrade-Sifuentes, A.; and Rueda-Puente, E. O. 2022. Biofortification with copper nanoparticles (NPs Cu) and its effect on the physical and nutraceutical quality of hydroponic melon fruits. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 50(1):25-30.
 - 9 García-Bueno, N. and Marín, A. A. 2021. Ecological management of biomass and metal bioaccumulation in fish-cage nettings: Influence of antifouling paint and fiber manufacture. *Aquaculture*. 2(544):737142-737160.
 - 10 Gaucin-Delgado, J. M.; Ortiz-Campos, A.; Hernandez-Montiel, L. G.; Fortis-Hernandez, M.; Reyes-Pérez, J. J.; Gonzáles-Fuentes, J. A. and Preciado-Rangel, P. 2022. CuO-NPs improve biosynthesis of bioactive compounds in lettuce. *Plants*. 11(7):19-12.
 - 11 Gómez-Garzón, M. 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*. 27(2):75-80.
 - 12 Gómez-Romero, M.; Arráez-Román, D.; Segura-Carretero, A. and Fernández-Gutiérrez, A. 2007. Analytical determination of antioxidants in tomato: typical components of the Mediterranean diet. *Journal of Separation Science*. 30(4):452-461.
 - 13 Hernández-Hernández, H.; Quiterio-Gutiérrez, T.; Cadenas-Pliego, G.; Ortega-Ortiz, H.; Hernández-Fuentes, A. D.; De-Fuente, M. C.; Valdés-Reyna, J.; and Juárez-Maldonado, A. 2019. Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*. 8(10):1-17.
 - 14 Kusiak, M. K.; Sierocka, M. A.; Swieca, M. P. and Pasieczna-Patkowska, S. 2023. Unveiling of interactions between foliar applied Cu nanoparticles and barley suffering from Cu deficiency. *Environmental Pollution*. 2(320):121044-121060.
 - 15 Lasso-Robledo, J. L.; Torres, B. G. and Peralta-Videa, J. R. 2022. Do all Cu nanoparticles have similar applications in nano-enabled agriculture? *En Plant Nano Biology*. 1(6):13-21.
 - 16 León-Morales, J. M. and Sepulveda-Jimez, G. 2012. El daño por oxidación causado por cobre y la respuesta antioxidante de las plantas. *Interciencia*. 37(11):805-811.
 - 17 Li, Y. I.; Zhang, Y. Z.; Li, Y. I.; Tang, F. E.; Lv, Q. I.; Zhang, J. I.; Xiao, S. A.; Tang, J. U.; and Zhang, X. W. 2019. Experimental study on compatibility of eco-friendly insulating medium C5F10O/CO2 Gas Mixture with copper and aluminum. *IEEE Access*. 1(7):83994-84002.
 - 18 Lopez-Lima, D.; Mtz-Enriquez, A. I.; Carrión, G. B.; Basurto-Cereceda, S. and Pariona, N. A. 2021. The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: effective treatment for fusarium wilt and plant growth promoter. *Scientia Horticulturae*. 2(277):109810-109820.
 - 19 Luna, C. V. 2019. Establecimiento de un método eficiente de estandarización de la germinación *in vitro* de *Moringa oleifera* (Moringaceae). *Acta Botánica Mexicana*. 1(2):10-16.
 - 20 Mir, A. R.; Pichtel, J. and Hayat, S. 2021. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *BioMetals*. 34(4):737-759.
 - 21 Naz, S.; Gul, A. and Zia, M. 2020. Toxicity of copper oxide nanoparticles: a review study. *En IET Nanobiotechnology*. 14(1):1-13.
 - 22 Nazir, H.; Batool, M.; Bolivar-Osorio, F. J.; Isaza-Ruiz, M.; Xu, X.; Vignarooban, K.; Phelan, P.; Inamuddin, G. H. and Kannan, A. M. 2019. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: a review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 129(1):491-523.
 - 23 Pilon, M. I.; Abdel-Ghany, S. E.; Cohu, C. M.; Gogolin, K. A. and Ye, H. O. 2006. Copper cofactor delivery in plant cells. *En Current Opinion in Plant Biology*. 9(3):256-263.

- 24 Rietra, R. P. J. J.; Heinen, M. J.; Dimkpa, C. O. and Bindraban, P. S. 2017. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 48(16):1895-1920.
- 25 Rivera-Gutiérrez, R. G.; Preciado-Rangel, P.; Fortis-Hernández, M.; Betancourt-Galindo, R.; Yescas-Coronado, P. and Orozco-Vidal, J. A. 2021. Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(5):791-803.
- 26 Sachdev, S. A.; Ansari, S. A.; Ansari, M. I.; Fujita, M. I. and Hasanuzzaman, M. J. 2021. Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*. 10(2):1-37.
- 27 Saleem, M. H.; Fahad, S. D.; Khan, S. U.; Din, M. I.; Ullah, A. L.; Sabagh, A. E.; Hossain, A. O.; Llanes, A. U. and Liu, L. 2020. Copper-induced oxidative stress, initiation of antioxidants and phytoremediation potential of flax (*Linum usitatissimum* L.) seedlings grown under the mixing of two different soils of China. *Environmental Science and Pollution Research*. 27(5):5211-5221.
- 28 Sandoval-Legazpi, J. J.; Galindo-Verdugo, O. E.; Arellano-Panduro, A. J. and Ancira-Sánchez, L. 2019. Estudio preliminar del fertirriego en el cultivo de la sandía (*Citrullus lanatus*, thumb) en Toluca, Jalisco. CIBA. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. 8(16):54-81.
- 29 Santás-Miguel, V.; Arias-Estévez, M.; Rodríguez-Seijo, A. and Arenas-Lago, D. 2023. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination. *Environmental Pollution*. 1(334):10-21.
- 30 Schiavon, M. C.; Nardi, S. A.; Dalla-Vecchia, F. A. and Ertani, A. R. 2020. Selenium biofortification in the 21st century: situation and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil*. 453:245-270.
- 31 Shabbir, Z.; Sardar, A.; Shabbir, A.; Abbas, G.; Shamshad, S.; Khalid, S.; Natasha, X.; Murtaza, G.; Dumat, C. and Shahid, M. 2020a. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil plant environment. *Chemosphere*. 2(259):127436-127458.
- 32 SIAP. 2021. Creció producción y exportación de sandía mexicana en 2020. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crecioproduccionyexportaciondesandiamexicana-en-2020?idiom=es#:~:text=En2020%2C>. La producción nacional de Agricultura y Desarrollo Rural.
- 33 Urquilla, A. R. 2019. Impacto de la nanotecnología como revolución industrial a nivel mundial. *Realidad y Reflexión*. 49(49):66-78.
- 34 Zhang, L. H.; and Liu, Y. I. 2020. Potential interventions for novel coronavirus in China: A systematic review. *Journal of Medical Virology*. 92(5):479-490.
- 35 Zhao, L. H.; Bai, T. A.; Wei, H. E. and Gardea-Torresdey, J. 2022. Nanobiotechnology-based strategies for enhanced crop stress resilience. *Nat food*. 1(2):829-836.



Nanobiofortificación con cobre en sandía

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 June 2024
Date accepted: 01 October 2024
Publication date: 11 December 2024
Publication date: Oct-Nov 2024
Volume: 15
Issue: 7
Electronic Location Identifier: e3837
DOI: 10.29312/remexca.v15i7.3837

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

Citrullus lanatus
compuestos bioactivos
nanopartículas

Counts

Figures: 3

Tables: 1

Equations: 0

References: 35

Pages: 0