



## IMPACTO DE NANOPARTÍCULAS DE HIDROXIAPATITA EN LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ACTIVIDAD ENZIMÁTICA EN PIMIENTO MORRÓN

### IMPACT OF HYDROXYAPATITE NANOPARTICLES ON BIOACTIVE COMPOUNDS AND ENZYMATIC ACTIVITY IN BELL PEPPER

Jessica Janeth Rocha-Santillano<sup>1</sup>, Dora Ma. Sangerman-Jarquín<sup>2\*</sup>, Pablo Preciado-Rangel<sup>1</sup>, Micaela de la O-Olán<sup>2</sup>, Manuel Fortis-Hernández<sup>1</sup>, Selene Y. Marquez-Guerrero<sup>1</sup>, Eduardo A. Flores-Hernandez<sup>3</sup> y Omar Romero-Arenas<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Ejido Ana, Torreón, Coahuila, México. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. <sup>3</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, Torreón, Coahuila, México. <sup>4</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Instituto de Ciencias, Centro de Agroecología, San Pedro Zacachimalpa, Puebla, México.

\*Autor de correspondencia (sangerman.dora@inifap.gob.mx)

#### RESUMEN

Las nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) obtenidas a partir de roca fosfórica pueden ser utilizadas como nanobioestimulantes en la agricultura sostenible. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de nHAp sobre el rendimiento y la síntesis de compuestos bioactivos en frutos de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) desarrollado bajo condiciones de invernadero. Se probaron cuatro dosis crecientes de nHAp: 500, 1000, 1500 y 2000 mg L<sup>-1</sup>, así como el testigo (agua destilada) bajo un diseño completamente al azar. Los resultados indicaron que la aspersión foliar de nHAp en el cultivo de pimiento morrón no afectó el rendimiento, pero sí influyó positivamente en la calidad nutracéutica y en la acumulación de fósforo en los frutos. Las dosis altas incrementaron los compuestos bioactivos y el fósforo en los frutos de pimiento morrón, pero disminuyen la actividad enzimática. La aplicación foliar con nHAp es una opción para estimular la biosíntesis de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos en los frutos de pimiento morrón.

**Palabras clave:** bioestimulación, compuestos fitoquímicos, nanotecnología.

#### SUMMARY

Hydroxyapatite (nHAp) nanoparticles obtained from phosphoric rock can be used as a nanobiostimulant in sustainable agriculture. The objective of this study was to evaluate the effect of foliar application of nHAp on yield and synthesis of bioactive compounds in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) fruits developed under greenhouse conditions. Four increasing doses of nHAp: 500, 1000, 1500 and 2000 mg L<sup>-1</sup>, as well as the control (distilled water) were tested under a completely randomized design. Results indicated that foliar spraying of nHAp on bell pepper did not affect yield, but it did positively influence the nutraceutical quality and phosphorus accumulation in fruits. High doses increased bioactive compounds and phosphorus in bell pepper fruits, but decreased enzymatic activity. Foliar spraying with nHAp is an option to stimulate the biosynthesis of enzymatic and non-enzymatic antioxidants in bell pepper fruits.

**Index words:** biostimulation, nanotechnology, phytochemical compounds.

#### INTRODUCCIÓN

El fósforo es un nutriente esencial para las plantas, y su deficiencia en el suelo limita el rendimiento de los cultivos; para mantener su productividad es necesario el uso de fertilizantes fosfatados con dosis y tiempos adecuados de aplicación (Duarte *et al.*, 2023). Los fertilizantes fosfatados se elaboran a partir de roca fosfórica, recurso no renovable cuyas reservas han disminuido considerablemente, motivo por el cual se deben buscar métodos alternativos de fertilización que incrementen la absorción de este nutrimento (Coppiarolo *et al.*, 2022).

Los nanofertilizantes pueden ser considerados una alternativa en la agricultura sostenible por sus altas tasas de liberación de nutrientes con bajas dosis de aplicación. Las sales de fosfato solubles sintéticas de tamaño nanométrico, mejor conocidas como nanopartículas de hidroxiapatita (Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>, también conocida como nHAp, tienen como base la roca fosfórica, cuentan con la capacidad de liberar nutrientes de manera lenta y controlada, lo que puede incrementar el rendimiento y calidad de cultivos, además de mejorar la sostenibilidad general de los sistemas agrícolas (Flores-Hernández *et al.*, 2021).

Existen reportes en la literatura que señalan que las nHAp pueden ser utilizadas como nanofertilizante o nanobioestimulante; éstas pueden suministrar el suficiente fósforo a los cultivos, con menor impacto ambiental y evitar la sobrefertilización en los sistemas tradicionales de producción agrícola (Elsayed *et al.*, 2022), además de disminuir la degradación, contaminación y agotamiento de los recursos naturales, lo que provoca un desequilibrio en la biodiversidad (Arora *et al.*, 2022).

En trigo (*Triticum aestivum*) las nHAp se han utilizado como fertilizante fosfatado con excelentes resultados debido a su tamaño nanométrico, pues tienen mayor movilidad y una estadía prolongada en el suelo, facilitando así su absorción por las raíces de la planta (Maghsoodi *et al.*, 2020), en dosis bajas promueve la generación de mayor biomasa en rábano (*Raphanus sativus*) (Flores-Hernández *et al.*, 2021), en higuera (*Ficus carica*) promueve frutos de mayor peso y tamaño y con un mayor contenido de compuestos fenólicos, lo que indica su efectividad como nanofertilizante y nanobioestimulante (Azpeitia, 2022; Com. Pers.)<sup>1</sup>, en maíz (*Zea mays*) aumentó el contenido de clorofila, rendimiento y mayor resistencia al estrés abiótico (Yoon *et al.*, 2020).

El pimiento morrón (*Capsicum annuum*) es una hortaliza que presenta alta cantidad de carotenos, vitamina C, fenoles, xantofilas, flavonoides y capsaicinoides; además, tiene alta actividad antioxidante (Morán *et al.*, 2022). El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la aplicación foliar de nHAp sobre la síntesis de compuestos bioactivos, la actividad enzimática y el rendimiento de fruto de pimiento morrón.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio y material vegetal

Se estableció un experimento en invernadero en el Instituto Tecnológico de Torreón, Torreón, Coahuila, México, ubicado a 25° 36' 36.54" latitud norte y 103° 22' 32.28" longitud oeste, a una altitud de 1123 msnm. Se trasplantaron plántulas de pimiento morrón cv. Hunter (Syngenta®) con 3-4 hojas verdaderas y altura de 15 a 20 cm en recipientes de plástico negro con 15 L de capacidad, empleados como macetas, con sustrato de arena de río y vermiculita (proporción 80:20 v:v), donde se trasplantó una plántula por maceta. La arena de río se lavó y desinfectó en hipoclorito de sodio 5 %. Las macetas se dispusieron a doble hilera con separación de 1.6 m.

### Caracterización de las nanopartículas

Las nHAp fueron obtenidas del Centro de Investigación Química Aplicada (CIQA) en Saltillo Coahuila, México. Dichas partículas se sintetizaron por reacción de precipitación química húmeda de una solución acuosa de hidróxido de calcio  $[Ca(OH)_2]$  y ácido orto fosfórico ( $H_3PO_4$ ), con una relación estequiométrica de Ca/P = 1.67, con tamaño de partículas en el intervalo de 15 a 25 nm (Flores-

Hernández *et al.*, 2021).

Los tratamientos consistieron en la aplicación foliar de cuatro dosis crecientes de nHAp: 500, 1000, 1500 y 2000 mg L<sup>-1</sup>, para la preparación de las mismas se utilizó una concentración inicial de 2000 mg L<sup>-1</sup> con apoyo de un sonicador (Tianjin Autoscience AS2060, Instrumental Factory®, Tianjin, China), agua desionizada estéril en suspensión durante 30 min. El trabajo se estableció bajo un diseño experimental completamente al azar, con siete repeticiones, con lo que se obtuvo un total de 35 unidades experimentales. Al tratamiento testigo se le aplicó solo agua desionizada. Cada 15 días, entre las 8:00 y 10:00 horas, se realizaron las aplicaciones con aspersores manuales, después del trasplante y hasta la cosecha.

### Variables evaluadas

Para determinar el rendimiento de fruto (kg por planta) se utilizó una balanza digital (VE-CB2000, Velab, Montreal, Quebec, Canada) para determinar el peso total de frutos por planta, cosechados a madurez comercial. Los diámetros polar y ecuatorial (cm) se cuantificaron con un vernier digital (ASK-500-196-30, Mitutoyo, Aurora, Illinois, EUA) en cinco frutos de cada unidad experimental.

Para determinar las variables de calidad nutracéutica y actividad enzimática se tomaron 10 frutos al azar de cada unidad experimental. Se determinaron fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante, según la metodología reportada por Molina-Quijada *et al.* (2010). En un tubo de plástico con tapón se mezcló pulpa fresca a razón de 2 g en 10 mL de etanol, que se colocó en un agitador rotatorio (HZ-300, Lohxa, Worcester, Massachusetts, EUA) durante 6 h a 5 °C y 20 rpm. Posteriormente, los tubos se centrifugaron durante 5 min a 3000 rpm. El sobrenadante se extrajo para las pruebas de los análisis, cada reacción se realizó por triplicado.

### Compuestos bioactivos

#### Flavonoides totales

Para cuantificar compuestos bioactivos se determinó el contenido total de flavonoides con el método del colorímetro (Zhishen *et al.*, 1999). Mediante un espectrofotómetro UV-vis (VE-5100UV, Velab, Montreal, Quebec, Canada) a 765 nm, fue medida la absorbancia inmediatamente a 510 nm, resultados que fueron expresados en mg QE g<sup>-1</sup> PF.

Por el método de Folin-Ciocalteu se determinó la cantidad de fenoles totales (Singleton *et al.*, 1999). Mediante un espectrofotómetro UV-vis (VE-5100UV-Velab, Montreal, Quebec, Canada) se obtuvieron lecturas a 765

<sup>1</sup>Azpeitia C. H. M. (2022) Evaluación de calcio, silicio y nanopartículas de hidroxiapatita sobre la calidad de higo (*Ficus carica* L.) producido en dos densidades, en invernadero. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. General Escobedo, Nuevo León, México. 61 p.

nm y los resultados se expresaron en mg equivalentes AG 100 g<sup>-1</sup> peso fresco (PF).

La concentración de vitamina C se obtuvo mediante el método de Klein y Perry (1982). Para la extracción se agregaron 10 mg de muestra y 1 mL de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 0.36 M y se centrifugó (Ohaus Frontier FC5515 R, Parsippany, New Jersey, EUA) a 5000 rpm durante 10 min a 4 °C. Posteriormente, del sobrenadante se sometieron a homogeneización 200 mL y 1.8 mL de 2,6-diclorofenolindofenol (2,6-D) 0.09 M para su posterior lectura en un espectrofotómetro (VE-5100UV, Velab) a 515 nm de longitud de onda, los cuales fueron cuantificados en 100 mg g<sup>-1</sup> PF.

### Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se cuantificó por el método *in vitro* DPPH<sup>+</sup> (Brand-Williams *et al.*, 1995). Mediante un espectrofotómetro UV-vis (VE-5100UV-Velab) a 517 nm, se tomaron las lecturas de la absorbancia de la mezcla de 50 µL y 1950 µL de solución DPPH<sup>+</sup> después de 30 min de la reacción. Los resultados se reportaron como µM de equiv Trolox 100 g<sup>-1</sup> PF.

Para cuantificar la actividad enzimática se emplearon tubos eppendorf de 2 mL, se obtuvo el extracto enzimático mediante la metodología de Ramos *et al.* (2010); para ello, se agregaron 200 mg de tejido vegetal liofilizado (Liofilizador Labconco 2.5 Freezone, Kansas City, Missouri, EUA), 1.5 mL de buffer de fosfatos con pH 7-7.2 (0.1 M) y 20 mg de polivinilpirrolidona, y se centrifugaron (Microcentrífuga Labnet Int. Inc., Prism™ C2500-R, Edison, New Jersey, EUA) a 12,000 rpm por 10 min a 4 °C. Posteriormente, el sobrenadante se filtró en una membrana de PVDF con tamaño de poro de 0.45 micras.

Para la actividad de catalasa se siguió el protocolo mencionado por Braber (1980), para lo cual se mezcló 1 mL del extracto enzimático (previamente diluido 1:20) con 3 mL de amortiguador fosfato de sodio 300 µM, pH 6.8 y 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100 µM. El tiempo de reacción fue de 1 min a 240 nm. Los resultados se reportaron en U mg<sup>-1</sup>.

La concentración de proteína total se cuantificó por medio de la escala colorimétrica de Bradford (1976), dichas determinaciones se expresaron en mg g<sup>-1</sup> PF.

El contenido de fósforo se cuantificó con el método vanadato-molibdato a través de mineralización de los tejidos por medio de digestión triácida y se cuantificó por colorimetría con una lectura a 470 nm, expresado en mg kg<sup>-1</sup>.

### Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza con los datos de las variables respuesta y pruebas de comparación múltiple de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) con el paquete estadístico Statistical Analysis System, Versión 9.3. (SAS Institute, 2011).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Rendimiento y sus componentes

El mayor rendimiento y número de frutos por planta se obtuvo con el tratamiento de 500 mg L<sup>-1</sup>, pero las diferencias fueron numéricas y no estadísticas (Cuadro 1). Similares resultados fueron reportados por Yoon *et al.* (2020), quienes indicaron que la aplicación de nHAp no incrementó significativamente el rendimiento de los cultivos, pero si mejoró la calidad nutracéutica de los

**Cuadro 1. Efectos de nHAp sobre el rendimiento y sus componentes en pimiento morrón.**

nHAp (mg L <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg planta <sup>-1</sup> )	Núm. de frutos	Diámetro (cm)	
			Polar	Ecuatorial
Testigo	0.93 ± 0.16	8.25 ± 1.70	5.43 ± 0.36 b	5.04 ± 1.01
500	1.05 ± 0.10	8.50 ± 1.29	5.08 ± 0.30 b	4.98 ± 0.57
1000	0.89 ± 0.12	6.50 ± 1.73	6.19 ± 0.28 a	5.29 ± 0.64
1500	0.83 ± 0.13	6.50 ± 1.29	5.27 ± 0.40 b	5.64 ± 0.46
2000	0.81 ± 0.23	6.25 ± 1.89	5.16 ± 0.24 b	5.21 ± 0.42
DSH 5%	0.34	3.49	0.71	1.44

Media ± desviación estándar. Medias con letras diferentes indican diferencia estadísticamente significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). DSH: diferencia significativa honesta.

mismos. Con relación al tamaño de los frutos (diámetro polar y ecuatorial), destacaron las dosis de 1000 y 1500 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente.

### Compuestos bioactivos

El pimiento morrón es un fruto de alto consumo en la dieta; por lo tanto, el incremento de compuestos bioactivos es de gran relevancia en la salud humana. Los resultados obtenidos muestran que la aplicación foliar de nHAp incrementó la biosíntesis de tales compuestos. Estos resultados coinciden con los de Schiavon *et al.* (2020). El mayor contenido de compuestos fenólicos correspondió a las dosis de 1000 a 2000 mg L<sup>-1</sup>, esta última superó en 30.03 % al testigo (Cuadro 2). Los flavonoides fueron afectados positivamente por los distintos tratamientos evaluados, la dosis más alta de nHAp presentó mayor concentración de estos compuestos, teniendo un incremento de 33.4 % con respecto al testigo. Magdaleno-García *et al.* (2023) señalaron que dosis altas de NPs inducen estrés oxidativo y estimulan la síntesis de compuestos no enzimáticos, como en este caso, donde el incremento de compuestos fenólicos y flavonoides se produce como una respuesta de la planta, probablemente para disminuir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) sin afectar sus procesos fisiológicos, tal como citan Hatamian *et al.* (2020).

### Vitamina C

Las dosis de 1500 y 2000 mg L<sup>-1</sup> presentaron el mayor contenido de vitamina C (ácido ascórbico) en los frutos (Cuadro 2), y superaron al testigo en 30.44 y 26.92 %, respectivamente. El pimiento es uno de los cultivos hortícolas con mayor contenido de vitamina C, tan solo el consumo de 100 g proporciona de 100 a 200 % el ácido ascórbico recomendado en la dieta nutrimental de la población (Moran *et al.*, 2022). Investigaciones realizadas por Uresti-Porras *et al.* (2021) indicaron que las aplicaciones de dosis altas de NPs incrementan significativamente la concentración de ácido ascórbico en los frutos de pimiento, lo que representa mayor calidad nutrimental. El aumento en la vitamina C es debido a una estimulación por parte de las NPs en el aparato fotosintético, y de esta manera se protege de la alta radiación en los complejos captadores de luz, desarrollándose el ciclo de las xantofilas (Zhang *et al.*, 2021). Este ciclo impide la formación de <sup>1</sup>O<sub>2</sub>, lo que evita el daño oxidativo, participa en la defensa frente al estrés oxidativo biótico y abiótico debido a su función en la degradación del peróxido de hidrogeno a través del ciclo glutatión-ascorbato (Valverde *et al.*, 2020). La capacidad antioxidante se conforma por compuestos hidrofílicos y lipofílicos, vitamina C, fenoles y flavonoides, y los segundos conformados por carotenoides y vitamina E. La actividad

antioxidante de estos compuestos está relacionada con potenciales beneficios para la salud, al ayudar contra enfermedades crónicas.

### Capacidad antioxidante

La aplicación foliar de las nHAp mejoró la capacidad antioxidante en los frutos de pimiento, el tratamiento de 1500 mg L<sup>-1</sup> superó en 22.5 % al testigo (Cuadro 2). Los resultados encontrados en esta investigación son superiores a los encontrados por Sánchez-Mundo (2016), quienes establecieron que la capacidad antioxidante de pimiento morrón se ubicó entre 7.6 y 100 uM equiv Trolox 100 g<sup>-1</sup> PF. Las ROS crean el estrés oxidativo que daña elementos celulares como lípidos y proteínas (Sabatino *et al.*, 2021). La capacidad antioxidante está directamente relacionada con el contenido de fenoles totales (Báez *et al.*, 2021); en esta investigación, los resultados de la aplicación de nHAp indicaron que ésta incrementó ambos compuestos, lo que a su vez aumenta la capacidad antioxidante de los frutos y potencialmente mejoraría la salud de la población (Benítez-Estrada *et al.*, 2020).

### Actividad enzimática

#### Catalasa

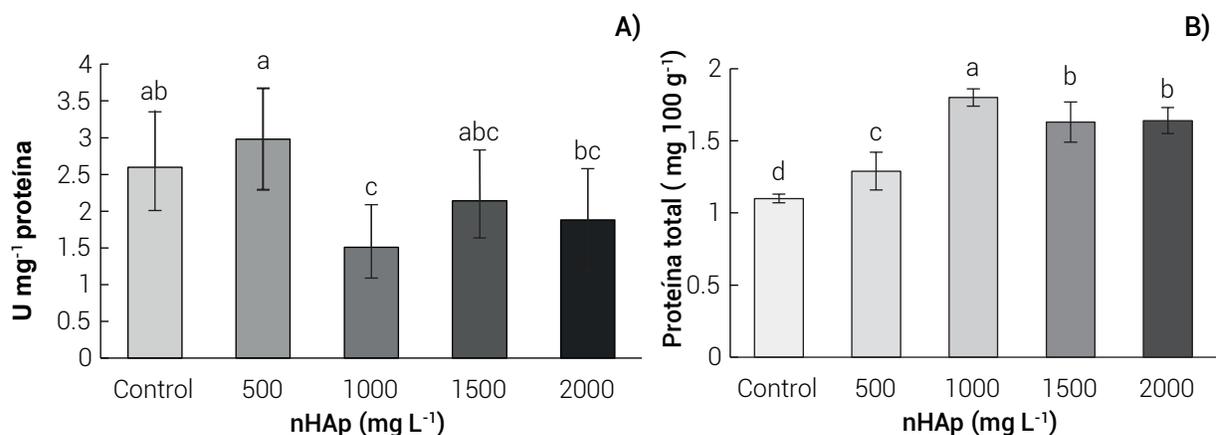
La enzima catalasa participa en la eliminación de las especies reactivas de oxígeno. En el presente estudio, la aplicación de las nHAp presentó una tendencia a modificar la actividad enzimática (Figura 1A). Numéricamente la mayor actividad de la enzima catalasa fue con la dosis de 500 mg L<sup>-1</sup>; sin embargo, en comparación con el testigo, resultó estadísticamente igual. La actividad enzimática es esencial en frutas y hortalizas, pues mantiene los niveles de ROS bajos, lo que previene el daño a las células debido a la peroxidación lipídica y la fuga a través de la membrana, esto mantiene la calidad de las frutas y hortalizas y el contenido de compuestos antioxidantes no enzimáticos (González-García *et al.*, 2021).

El efecto bioestimulante de las nHAp se atribuye a sus características físicas como tamaño, forma y estructura, el primer contacto entre las NPs y la planta es al momento de la aspersión foliar a nivel superficial donde entra en contacto directo con la pared y membrana celular, permite reacciones en cascada que provocan cambios en el cultivo como la expresión genética y modificaciones en la actividad enzimática, a través de la activación del sistema de defensa (Rivero-Montejo *et al.*, 2021). En el caso de las nHAP el efecto bioestimulante puede deberse a que su suministro incrementa la concentración de calcio en el citosol, lo que activa la síntesis de proteínas ligadoras

**Cuadro 2. Efecto de nHAp sobre el contenido de fenoles, flavonoides, Vitamina C y DPPH (capacidad antioxidante) en pimiento morrón.**

nHAp (mg L <sup>-1</sup> )	Fenoles (mg AGE 100 g <sup>-1</sup> PF)	Flavonoides (mg QE 100 g <sup>-1</sup> PF)	Vitamina C (mg 100 g <sup>-1</sup> PF)	DPPH (uM equiv Trolox 100 g <sup>-1</sup> PF)
Testigo	134.85 ± 3.42 b	117.94 ± 25.38 b	156 ± 0 d	88.594 ± 4.93 b
500	140.23 ± 12.79 b	126.34 ± 16.96 ab	180 ± 0 b	105.789 ± 3.36 a
1 000	154.17 ± 10.51 ab	120.44 ± 17.47 ab	165 ± 16.5 c	104.915 ± 1.45 a
1 500	158 ± 26.00 ab	128.92 ± 26.50 ab	203.5 ± 11 a	108.557 ± 1.93 a
2 000	181.58 ± 26.53 a	157.4 ± 41.92 a	198 ± 0 a	105.692 ± 0.65 a
DSH 5 %	39.85	33.15	17.88	6.32

Media ± desviación estándar (DE, n= 20). Medias con letras diferentes indican una diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). DSH: diferencia significativa honesta.



**Figura 1. Efecto de nHAp sobre A) la actividad enzimática de catalasa, y B) proteína total en fruto de pimiento morrón. Medias con la misma letra son iguales estadísticamente entre ellas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).**

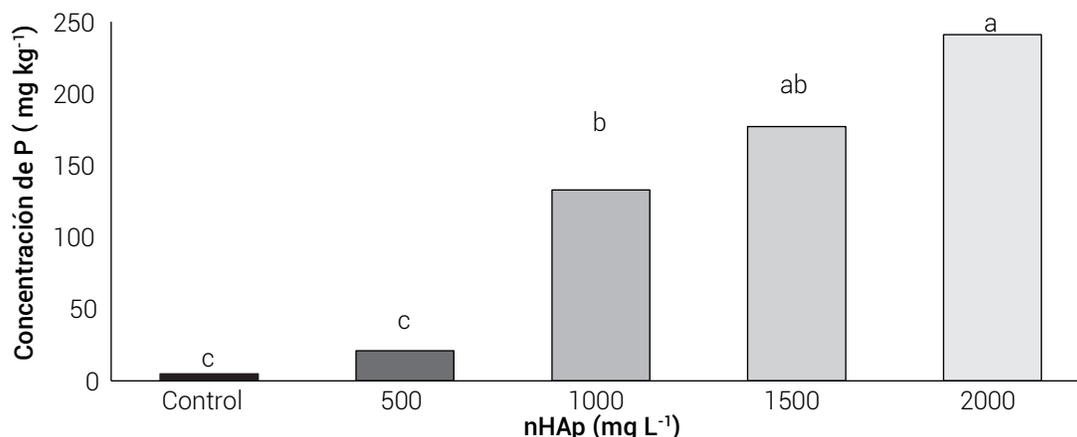
de calcio de la célula, que se relacionan con genes que estimulan la activación del sistema inmunológico, incrementando a su vez la tolerancia al estrés (Yang *et al.*, 2021).

### Proteínas

La aspersión foliar de nHAp afectó positivamente el contenido de proteína total en frutos de pimiento morrón (Figura 1B). La dosis de 1000 mg L<sup>-1</sup> presentó mayor concentración superando en 63.63 % a los frutos de pimiento no tratados. Las proteínas totales se producen como parte de la adaptación de las plantas al ambiente; en este caso, se observó que las plantas estuvieron expuestas

a un estrés ambiental con la aplicación de 1000 mg L<sup>-1</sup>, lo cual aumentó la concentración de proteínas o la activación del sistema antioxidante para la eliminación de las ROS presentes en las células (Yang *et al.*, 2021); en cambio, en los tratamientos de 1500 y 2000 mg L<sup>-1</sup> disminuyó el contenido total de proteínas, debido probablemente a una degradación por parte de las enzimas proteolíticas (López-Mendoza *et al.*, 2023); en este caso, se puede atribuir a las calpaínas, las cuales se activan por la presencia de Ca<sup>2+</sup> (León, 2023; Com. Pers.)<sup>2</sup>, que es uno de los principales componentes en las nHAp. Estos resultados coinciden con los encontrados por Madanayake *et al.* (2021), quienes al aplicar dosis altas de nHAp en el cultivo de rábano, reportaron un menor el contenido de proteínas (3.9 %).

<sup>2</sup>León E. M. (2023) Caracterización bioquímica de proteasas de bacterias halotolerantes M3H1027, ML106512 y M4H153D. Tesis Profesional. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco, Perú. 106 p.



**Figura 2. Concentración de fósforo en el fruto de pimiento.** Barras con la misma letra son iguales estadísticamente entre ellas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### Contenido de fósforo en el fruto

La aspersión foliar con nHAp, aumentó el contenido de fósforo en los frutos de pimiento morrón (Figura 2). Las dosis de 2000 y 1500 mg L<sup>-1</sup> presentaron la mayor concentración. Estos resultados son similares a los reportados por De la Vega-García *et al.* (2020), al aplicar nHAp en el cultivo de frijol reportaron mayor contenido de fósforo a medida que incrementaron las dosis de nHAp. Los resultados obtenidos para esta variable se pueden explicar con la absorción y transporte de fósforo proveniente de nHAp, pues las partículas nanométricas entran fácilmente a los tejidos de la planta y se distribuyen hacia el fruto (De la Vega-García *et al.*, 2020).

### CONCLUSIONES

La aspersión foliar de nanopartículas de hidroxiapatita no afectó el rendimiento en el cultivo de pimiento morrón, pero mejoró la calidad nutracéutica y acumulación de fósforo en los frutos. Las dosis altas incrementaron los compuestos bioactivos y fósforo en los frutos de pimiento morrón, pero disminuyeron la actividad enzimática. La aspersión foliar con nanopartículas de hidroxiapatita estimula la biosíntesis de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos en los frutos de pimiento morrón.

### BIBLIOGRAFÍA

Arora S., G. Murmu, K. Mukherjee, S. Saha and D. Maity (2022) A comprehensive overview of nanotechnology in sustainable agriculture. *Journal of Biotechnology* 355:21-41, <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.06.007>

Báez M., E. I. Torres, A. E. Gruszycski, D. A. Alba, G. M. Valenzuela and M. R. Gruszycski (2021) Actividad antioxidante y antiinflamatoria en extractos hidroalcohólicos de *Kalanchoe daigremontiana* Raym. -Hamet & H. Perrier. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas* 50:86-99, <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v50n1.95450>

Benítez-Estrada A., J. Villanueva-Sánchez, G. González-Rosendo, V. E. Alcántar-Rodríguez, R. Puga-Díaz y A. G. Quintero-Gutiérrez (2020) Determinación de la capacidad antioxidante total de alimentos y plasma humano por fotoquimioluminiscencia: correlación con ensayos fluorométricos (ORAC) y espectrofotométricos (FRAP). *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 23:1-9, <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.244>

Braber J. M. (1980) Catalase and peroxidase in primary bean leaves during development and senescence. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie* 97:135-144, [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(80\)80027-4](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(80)80027-4)

Bradford M. M. (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72:248-254, [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

Brand-Williams W., M. E. Cuvelier and C. Berset (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)

Coppiarolo L. E., V. P. Schnake y A. Zamponi (2022) Conflictos ecológicos distributivos: suelos y ciclos biogeoquímicos. In: Volcán Antropogénico: Una Mirada Geográfica sobre Procesos Geológicos y Geomorfológicos. M. C. Zilio, G. M. D'Amico y S. Báez (coords.). Editorial de la Universidad de La Plata. La Plata, Argentina. pp:235-257.

De la Vega-García N. L., C. B. Peña-Valdivia, M. C. A. González-Chávez, D. Padilla-Chacón y R. Carrillo-González (2020) Síntesis y efecto de nanopartículas de hidroxiapatita en la germinación y crecimiento de frijol. *Agrociencia* 54:1009-1029.

Duarte F. C. N., M. A. P. Cipriano, S. A. L. Andrade and F. C. B. Zambrosi (2023) Foliar application of phosphite reduces grain weight of soybean facing postflowering phosphorus deficiency. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 186:30-37, <https://doi.org/10.1002/jpln.202200124>

Elsayed A. A. A., A. El-Gohary, Z. K. Taha, H. M. Farag, M. S. Hussein and K. AbouAitah (2022) Hydroxyapatite nanoparticles as novel nano-fertilizer for production of rosemary plants. *Scientia Horticulturae* 295:110851, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110851>

Flores-Hernández E. A., R. H. Lira-Saldivar N. A. Ruiz-Torres, J. I. García-López, A. Moreno-Reséndez, N. Rodríguez-Dimas, ... y S. S. Mendoza-Retana (2021) Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su efecto en plántulas de *Raphanus sativus*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8:e2747, <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2747>

González-García Y., C. Cárdenas-Álvarez, G. Cadenas-Pliego, A. Benavides-Mendoza, M. Cabrera-de-la-Fuente, A. Sandoval-Rangel, ... and A. Juárez-Maldonado (2021) Effect of three nanoparticles (Se, Si

- and Cu) on the bioactive compounds of bell pepper fruits under saline stress. *Plants* 10:217, <https://doi.org/10.3390/plants10020217>
- Hatamian M., A. R. Nejad, M. Kafi, M. K. Souiri and K. Shahbazi (2020) Interaction of lead and cadmium on growth and leaf morphophysiological characteristics of European hackberry (*Celtis australis*) seedlings. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 7:9, <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0173-0>
- Klein B. P. and A. K. Perry (1982) Ascorbic acid and vitamin A activity in selected vegetables from different geographical areas of the United States. *Journal of Food Science* 47:941-945, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb12750.x>
- López-Mendoza J., L. Adriano-Anaya, D. Gálvez-López y A. Vázquez-Ovando (2023) Compuestos bioactivos en quesos: biosíntesis, actividad biológica y contribución de las bacterias ácido lácticas. *Agronomía Mesoamericana* 34:51432, <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.51432>
- Madanayake, N.H., N.M. Adassooriya and N. Salim (2021) The effect of hydroxyapatite nanoparticles on *Raphanus sativus* with respect to seedling growth and two plant metabolites. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 15:100404, <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100404>
- Magdaleno-García G., A. Juárez-Maldonado, R. Betancourt-Galindo, S. González-Morales, M. Sánchez-Vega, M. Cabrera-de La Fuente y A. Méndez-Lopez (2023) Aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y cloruro de sodio en Chile pimiento. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* Núm. Esp. III:e3679, <https://doi.org/10.19136/era.a10nNEIII.3679>
- Maghsoodi M. R., L. Ghodszad and B. A. Lajayer (2020) Dilemma of hydroxyapatite nanoparticles as phosphorus fertilizer: potentials, challenges and effects on plants. *Environmental Technology & Innovation* 19:100869, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100869>
- Molina-Quijada D. M. A., L. A. Medina-Juárez, G. A. González-Aguilar, R. M. Robles Sánchez and N. Gámez-Meza (2010) Phenolic compounds and antioxidant activity of table grape (*Vitis vinifera* L.) skin from Northwest Mexico. *CyTA – Journal of Food* 8:57-63, <https://doi.org/10.1080/19476330903146021>
- Moran A. A. V., G. N. Veloz R. y L. D. Pasquel V. (2022) Evaluación del contenido de ácido ascórbico en pimiento rojo y amarillo (*Capsicum annuum*) en Ecuador. *Revista Universidad de Guayaquil* 134:1-11, <https://doi.org/10.53591/rug.v134i1.1415>
- Ramos S. J., V. Faquin, L. R. G. Guilherme, E. M. Castro, F. W. Ávila, G. S. Carvalho, ... and C. Oliveira (2010) Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant Soil and Environment* 56:584-588, <https://doi.org/10.17221/113/2010-PSE>
- Rivero-Montejo S. J., M. Vargas-Hernandez and I. Torres-Pacheco (2021) Nanoparticles as novel elicitors to improve bioactive compounds in plants. *Agriculture* 11:134, <https://doi.org/10.3390/agriculture11020134>
- Sabatino L., F. Di Gaudio, B. B. Consentino, Y. Roupael, C. El-Nakhel, S. La Bella, ... and C. De Pasquale (2021) Iodine biofortification counters micronutrient deficiency and improve functional quality of open field grown curly endive. *Horticulturae* 7:58, <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030058>
- Sánchez-Mundo M. L., V. M. Escobedo-Crisantes, S. Mendoza-Arvizu and M. E. Jaramillo-Flores (2016) Polymerization of phenolic compounds by polyphenol oxidase from bell pepper with increase in their antioxidant capacity. *CyTA – Journal of Food* 14:594-603, <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1181672>
- SAS Institute (2011) SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 8621 p.
- Schiavon M., S. Nardi, F. dalla Vecchia and A. Ertani (2020) Selenium biofortification in the 21<sup>st</sup> century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil* 453:245-270, <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>
- Singleton V. L., R. Orthofer and R. M. Lamuela-Raventós (1999) Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology* 299:152-178, [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Uresti-Porras J. G., M. Cabrera-De-La Fuente, A. Benavides-Mendoza, E. Olivares-Sáenz, R. I. Cabrera and A. Juárez-Maldonado (2021) Effect of graft and nano ZnO on nutraceutical and mineral content in bell pepper. *Plants* 10:2793, <https://doi.org/10.3390/plants10122793>
- Valverde J. C., D. Arias-Aguilar, E. Montero-Zeledón y D. Gutiérrez-Fallas (2020) Fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al estrés hídrico en plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. *Uniciencia* 35:320-334, <https://doi.org/10.15359/ru.35-1.20>
- Yang X., M. Lu, Y. Wang, Y. Wang, Z. Liu and S. Chen (2021) Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae* 7:50, <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Yoon H. Y., J. G. Lee, L. D. Esposti, M. Iafisco, P. J. Kim, S. G. Shin, ... and A. Adamiano (2020) Synergistic release of crop nutrients and stimulants from hydroxyapatite nanoparticles functionalized with humic substances: toward a multifunctional nanofertilizer. *ACS Omega* 5:6598-6610, <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04354>
- Zhang X., H. Cao, J. Zhao, H. Wang, B. Xing, Z. Chen, ... and J. Zhang (2021) Graphene oxide exhibited positive effects on the growth of *Aloe vera* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 27:815-824, <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00979-3>
- Zhishen J., T. Mengcheng and W. Jianming (1999) The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry* 64:555-559, [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)

