

## Aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y cloruro de sodio en chile pimiento

### Application of zinc oxide nanoparticles and sodium chloride in bell pepper

Guadalupe Magdaleno-García<sup>1</sup> ,  
Antonio Juárez-Maldonado<sup>2</sup> ,  
Rebeca Betancourt-Galindo<sup>3</sup> ,  
Susana González-Morales<sup>4</sup> ,  
Miriam Sánchez-Vega<sup>4</sup> ,  
Marcelino Cabrera-de La Fuente<sup>1</sup> ,  
Alonso Méndez-Lopez<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro No. 1923. Buenavista, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro No.1923. Buenavista. CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>3</sup>Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140, CP. 25294. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>4</sup>CONACYT- Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro No.1923. Buenavista. CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

\*Autor de correspondencia:  
alonso1977@gmail.com

#### Artículo científico

Recibido: 09 de marzo 2023

Aceptado: 08 de diciembre 2023

**Como citar:** Magdaleno-García G, Juárez-Maldonado A, Betancourt-Galindo R, González-Morales S, Sánchez-Vega M, Cabrera-de La Fuente M, Alonso 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. DOI: 10.19136/era.a10nIII.3679

**RESUMEN.** Las nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) han llamado la atención debido a sus propiedades benéficas y a que pueden aplicarse en la agricultura como nanofertilizantes, nanoreguladores de crecimiento y para mejorar parámetros de calidad. El uso de euestresores como cloruro de sodio (NaCl) puede mejorar la calidad de varios cultivos de hortalizas con especial interés en atributos de calidad del fruto. El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos del NaCl como eustrés y NPs ZnO sobre el crecimiento y calidad de chile pimiento. Se evaluaron 10 tratamientos: aplicación de NPs de morfología esférica y hexagonal en dosis de 50 y 100 mg L<sup>-1</sup> con y sin aplicación de NaCl (50 mM), más testigo salino y testigo absoluto. Se evaluaron variables agronómicas: como altura de la planta (AP), diámetro del tallo (DT), peso seco de la raíz (PSR) y planta (PSP), peso de frutos por planta (PFP) y variables de calidad de fruto como: firmeza, pH, conductividad eléctrica (C.E), sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), potencial óxido-reducción (ORP) y vitamina C. Los resultados muestran que los tratamientos con nanopartículas a 50 y 100 mg L<sup>-1</sup> aumentaron los parámetros de AP, PSR, PSP y PFP, la morfología hexagonal mejoró AP, PSR y PSP, la combinación de NaCl más NPs aumentaron el PSP y PFP, en parámetros de calidad de fruto el NaCl mejoró la firmeza y ORP, las NPs resultaron favorables para la calidad, aunque la forma esférica y hexagonal produjeron efectos similares.

**Palabras clave:** Esféricas, eustrés, hexagonales, nanotecnología, morfología.

**ABSTRACT.** Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) have attracted a lot of attention due to their beneficial properties and because they can be applied in agriculture as nanofertilizers, nanogrowth regulators and to improve quality parameters. The use of eustressors such as sodium chloride (NaCl) can improve the quality of various vegetable crops with special interest in fruit quality attributes. The objective of this research was to evaluate the effects of NaCl as eustress and ZnO NPs on the growth and quality of chili pepper. 10 treatments were evaluated: application of NPs of spherical and hexagonal morphology in doses of 50 and 100 mg L<sup>-1</sup> with and without application of NaCl (50 mM), plus saline control and absolute control. In the study, agronomic variables were evaluated: plant height (AP), stem diameter (DT), root dry weight (PSR) and plant (PSP), fruit weight per plant (PFP) and fruit quality variables. fruit as: firmness, pH, electrical conductivity (EC), total soluble solids (TSS), titratable acidity (AT), oxidation-reduction potential (ORP) and vitamin C. The results obtained show that the treatments with nanoparticles at 50 and 100 mg L<sup>-1</sup> increased the parameters of AP, PSR, PSP and PFP, hexagonal morphology improved AP, PSR and PSP, the combination of NaCl plus NPs increased PSP and PFP, in fruit quality parameters NaCl improved firmness and ORP, NPs were favorable for quality, although spherical and hexagonal shapes produced similar effects.

**Key words:** Eustress, hexagonal, morphology, nanotechnology, spherical.

## INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales tienen el potencial de mejorar los sistemas de cultivo, al optimizar la utilización de los nutrientes (Lowry *et al.* 2019), y mejorar funciones fisiológicas en la planta, lo que permite mayor tolerancia ante diferentes condiciones de estrés ambiental (Kausar *et al.* 2023). Además, promueven la resiliencia de las plantas contra diferentes enfermedades (Kah *et al.* 2019). Su tamaño (<100 nm) les permite cruzar barreras biológicas, transportándose por el sistema vascular de la planta después de la aplicación foliar, en la raíz o semillas (Munir *et al.* 2018, Rossi *et al.* 2019, Pérez-Velasco *et al.* 2021).

Las nanopartículas (NPs), al incorporarse a las plantas provocan cambios morfológicos y fisiológicos en función de sus propiedades. La eficiencia de las NPs se mide por su composición física, química, tamaño, forma, carga superficial, energía superficial y dosis adecuadas (Zhao y Stenzel 2018, Singh *et al.* 2021). Las propiedades de las NPs tienen impacto en las interacciones con las superficies celulares y su internamiento en las células (Nel *et al.* 2009). Por su parte, la morfología de las NPs se ha mencionado que afecta sus interacciones con las membranas celulares, así como su capacidad para penetrar en las células (Peng *et al.* 2011). Por lo que, la forma de las NPs puede influir en la manera de interactuar con el entorno por el efecto geométrico. Se ha informado sobre efectos positivos por el uso de nanopartículas de ZnO con morfologías esféricas y hexagonales en el crecimiento y la calidad de cultivos de interés agronómico como tomate y trigo (Faizan *et al.* 2018, Munir *et al.* 2018, Pérez-Velasco *et al.* 2021).

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial que juega un papel vital para lograr mayores rendimientos y calidad de frutos. Diversos estudios han señalado que el Zn es un elemento vital, requerido por todos los organismos vivos, ocupa el puesto 23 en el planeta y es el segundo metal de transición más abundante, después del hierro (Jain *et al.* 2010). El zinc es un oligoelemento esencial en varias funciones de las plan-

tas, como el aumento de la tasa de enzimas, el contenido de clorofila, compuestos antioxidantes, además es un constituyente necesario de numerosas proteínas (Sbartai *et al.* 2011).

La salinidad representada por el factor estrés cloruro de sodio (NaCl), suele tener efectos negativos en el rendimiento y calidad de las hortalizas (Moghaddam *et al.* 2023). Pero la aplicación de niveles moderados de salinidad, junto con una duración y tiempo de aplicación adecuados, puede funcionar como euestresor y aumentar el contenido de compuestos bioactivos, además de mejorar los atributos de calidad de los productos hortícolas, sin afectar negativamente los parámetros de crecimiento (Tomasi *et al.* 2015, Lucini *et al.* 2016, Rouphael *et al.* 2018, Kitayama *et al.* 2019).

La calidad vegetal es un parámetro influenciado por múltiples factores que incluyen propiedades percibidas directamente como el sabor, la apariencia visual y el aroma (Ghonomie *et al.* 2019). Estas características definen la calidad física y determinan la aceptación de los consumidores, así como la composición química, el contenido de compuestos bioactivos, la ausencia de agroquímicos entre otros (Rouphael y Kyriacou 2018).

El pimiento es una de las hortalizas más utilizada de la familia de las solanáceas, destacando por su excelente valor nutrimental y alto contenido en ácido ascórbico, fenoles, flavonoides, capsaicinoides y vitaminas como la A y la E, además de toda la gama del complejo vitamínico B (Loizzo *et al.* 2015, Ullah *et al.* 2017). El consumo de este tipo de compuestos es fundamental para la salud humana debido a su actividad antioxidante, antitumoral y antiviral (Cortés-Estrada *et al.* 2020). Es una hortaliza presente en la dieta de muchas poblaciones del mundo, y representa una importante fuente de ingresos para los agricultores del sector agroindustrial (Fratianni *et al.* 2020, Tihamiyu *et al.* 2023). En este contexto, el objetivo del estudio fue investigar el efecto del cloruro de sodio como un auestresor y dos tipos de nanopartículas de óxido de zinc con morfología esférica y hexagonal, en el crecimiento y calidad de chile pimiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización geográfica

El experimento se llevó a cabo en un invernadero tipo túnel, con cubierta de fibra de vidrio a cargo de la dirección de investigación, y en el laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

### Material vegetativo

Se utilizaron semillas de chile pimiento híbrido (35-171) Rz F1, con vigor muy alto y alta producción, de la casa semillera Rijk Zwaan.

### Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de zinc

La síntesis de las nanopartículas se realizó en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), se usó acetato de zinc dihidratado (Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub> • 2H<sub>2</sub>O, ZnAc, 99%), trietilamina (TEA, 99%), n-propilamina (C<sub>3</sub>H<sub>9</sub>N, 99.5%), todos los reactivos fueron adquiridos de la casa comercial Sigma Aldrich, etanol de grado industrial y agua desionizada triplemente destilada.

Las nanopartículas de ZnO se prepararon de acuerdo con la metodología de González *et al.* (2021). La síntesis se realizó mezclando dos soluciones, la primera contenía 8.928 g de ZnAc disuelto en una mezcla de agua/TEA (300 mL/5.36 mL), y la segunda era una mezcla de n-propilamina/etanol (1.42 mL/ 1 700 mL). Ambas soluciones se mezclaron y agitaron a 80 °C durante 6 o 12 h, dependiendo de la estructura morfológica deseada. El precipitado se centrifugó, se lavó con etanol para eliminar los reactivos que no reaccionaron y se secó a temperatura ambiente durante la noche. Se prepararon NPs de ZnO con diferentes tiempos de reacción para obtener nanopartículas con morfologías esféricas y hexagonales. La estructura cristalina de las NPs ZnO fue analizada por difracción de rayos X (XRD) en un difractómetro Siemens D-5000 (radiación CuK $\alpha$ , = 1.5418 Å, SIEMENS, Múnich, GER). El tamaño del cristal se calculó con la ecuación de Debye Scherrer (Ingham y Toney 2014). La morfología de las NPs

ZnO fue observada por microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM, Titan 80-300 kV, empresa FEI, Hillsboro, OR, EE. UU.).

### Cebado de semillas con nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO con morfología esférica y hexagonal)

Se prepararon soluciones de nanopartículas de óxido de zinc, a partir de una solución madre de 5 000 mg L<sup>-1</sup> de nanopartículas de óxido de zinc con morfología esférica y hexagonal, se pesaron 1 000 mg de nanopartículas, después se agregaron 200 mL de agua destilada y posteriormente fueron dispersadas por un sonicador (Vevor) durante 30 minutos a una temperatura de 25 °C, para permitir la formación de una suspensión homogénea y evitar la aglomeración de las nanopartículas, a partir de esta solución se hicieron diluciones de 50 y 100 mg L<sup>-1</sup>.

Las semillas se colocaron en cajas Petri de (90 x 15 mm) con discos de papel filtro Whatmann 1 (110 mm) y se remojaron en diferentes concentraciones de NPs de ZnO (0, 50 y 100 mg L<sup>-1</sup>), después se tomaron 15 mL de suspensión de NPs ZnO de cada tratamiento y se agregó a las semillas para la imbibición, se conservaron en oscuridad a 28 ± 1 °C durante 18 h en una cámara de crecimiento (Quincy Lab Inc, modelo 12-140 incubator). Las semillas cebadas se colocaron en reposo a temperatura ambiente, hasta alcanzar nuevamente el contenido de humedad original; para el cebado se utilizó agua destilada.

### Cloruro de sodio (NaCl)

Se utilizó cloruro de sodio grado reactivo (Jalmek. Científica S.A DE C.V), y se preparó una solución a 50 mM.

### Crecimiento del cultivo

Las semillas previamente tratadas se sembraron en una charola de poliestireno de 200 cavidades utilizando como sustrato una mezcla de peat moss y perlita en una proporción 1:1 (v/v), posteriormente el trasplante se realizó a los 46 días después de la siembra en bolsas de polietileno con una capacidad de 10 L llenas con la mezcla de sustrato y pro-

porción previamente indicada. El cultivo se manejó a dos tallos y se desarrolló durante 175 días, desde el trasplante hasta la producción de frutos para su evaluación. Se utilizó un sistema de riego dirigido y una solución nutritiva Steiner que se manejó en diferentes concentraciones (25, 50, 75, 100%) dependiendo de la etapa fenológica del cultivo, el pH se ajustó a 6.5 y la conductividad eléctrica (CE) oscilaba entre los 2.2 y 2.7 dS m<sup>-1</sup> la cual se incrementó a medida que aumentó la concentración de la solución nutritiva, las plantas se mantuvieron en crecimiento en un invernadero con temperatura promedio de 22 °C y 56% humedad de relativa.

### Tratamientos

Los tratamientos utilizados fueron: testigo absoluto, sin aplicación de NPs ZnO o NaCl (T1), NPs ZnO con morfología esférica a 50 mg L<sup>-1</sup> (T2), NPs ZnO con morfología esférica a 100 mg L<sup>-1</sup> (T3), NPs ZnO con morfología hexagonal a 50 mg L<sup>-1</sup> (T4), NPs ZnO con morfología hexagonal a 100 mg L<sup>-1</sup> (T5), testigo salino, aplicación de NaCl 50 mM (T6), NPs ZnO con morfología esférica a 50 mg L<sup>-1</sup> más NaCl 50 mM (T7), NPs ZnO con morfología esférica a 100 mg L<sup>-1</sup> más NaCl 50 mM (T8), NPs ZnO con morfología hexagonal a 50 mg L<sup>-1</sup> más NaCl 50 mM (T9), NPs ZnO con morfología hexagonal a 50 mg L<sup>-1</sup> más NaCl 50 mM (T10). Se añadió NaCl a los 7 días después del trasplante (DDT), y durante todo el desarrollo del cultivo cada 5 días, la aplicación de NaCl se realizó utilizando 250 mL por planta de la solución a 50 mM, los cuales se aplicaron en la base del tallo después de los riegos con solución Steiner. Las aplicaciones con NPs ZnO fueron foliares y se realizaron cada 15 días, hasta completar 6 aplicaciones a los 15, 30, 45, 60, 75, 90 DDT, utilizando 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mL por planta, respectivamente.

### Evaluación de variables

Se registraron las variables agronómicas de altura de la planta: que se midió de la base del tallo hasta el ápice de la planta con un flexómetro de la marca Truper modelo PRO-5MEC de cinco metros, se llevó a cabo una vez cada 15 días a partir del trasplante. La variable agronómica diámetro del tallo,

se midió con un vernier digital LSD de la marca Truper (150 mm), la lectura se registró en mm. Las variables agronómicas peso seco de raíz y de planta, se obtuvieron al final del ciclo, luego de cortar las plantas y separar las hojas y el tallo, para luego colocar en bolsas de papel, para posteriormente deshidratar en un horno de secado marca Linderberg/blue modelo GO1350C-1 a 80 °C por 24 h, para luego medir el peso en una balanza (Electronic scale 0.1/5 000 g). Respecto al peso seco de la raíz, esta se separó del sustrato del vaso manualmente, y se retiró el exceso de sustrato con agua, por último, se pesó en una balanza (Electronic scale 0.1/5000). Para obtener el peso seco se colocaron en bolsas de papel y se secaron en una estufa de secado marca Linderberg/blue modelo GO1350C1 a temperatura de 75 °C por 17 h, para luego pesar en la balanza.

### Calidad del fruto

Para determinar la calidad del fruto, se colectaron 4 frutos por tratamiento (uno por planta) de tamaño uniforme de la segunda cosecha. Los frutos se cosecharon cuando presentaban una coloración completamente roja.

### Firmeza

La determinación de esta variable, se realizó con un penetrómetro digital (PCE-PTR 200, grupo PCE, Albacete, castellana mancha, España), equipo con una punta de 8.0 mm, se introdujo la punta del penetrómetro en tres puntos del fruto para obtener un dato promedio, las lecturas se reportaron en kg cm<sup>-2</sup>.

### pH y conductividad eléctrica (CE)

La determinación del pH y CE, se obtuvo del extracto de un fruto por tratamiento, empleando un medidor de bolsillo (HI98129, Hanna Instruments Inc.).

### Potencial oxido-reducción (ORP)

La determinación del potencial óxido reducción, se obtuvo a partir del extracto de fruto macerado utilizando un medidor de ORP, la cual se obtuvo en Milivoltio (mV).

### Sólidos solubles totales (°Brix)

La determinación del contenido de sólidos solubles totales se obtuvo a partir del extracto de fruto macerado, del cual se colocó una gota en el lector del refractómetro digital (HI96801, Hanna Instruments Inc.), para obtener la concentración en porcentaje de sólidos solubles.

### Acidez titulable (% de ácido cítrico)

La acidez titulable se calculó tomando 10 mL de la pulpa de cada fruto, a la cual se añadieron dos gotas de fenolftaleína (1%) y se tituló con NaOH 0.1 N hasta el punto de viraje (rosa) (AOAC 1990), los datos se expresaron en porcentaje de ácido cítrico por medio de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Acido} = \frac{V * N * 100}{\text{Alícuota valorada}}$$

Dónde: V = Volumen de NaOH usando para la titulación, N = Normalidad del NaOH, Meq = Miliequivalentes de ácido. El valor equivalente de base a ácido para el ácido cítrico es: 0.064, y Alícuota valorada = Peso en g o volumen de la muestra en mL.

### Vitamina C

El contenido de vitamina C se determinó por el método volumétrico (Padayatty *et al.* 2001), para lo cual se pesaron 20 g de muestra fresca y se colocaron en un mortero, después se le agregaron 10 mL de HCl al 2% y se trituroó por completo, a la mezcla se le agregaron 100 mL de agua destilada. La mezcla se homogenizó con el mortero y se filtró, en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se midió el volumen del extracto de la muestra y se tomaron tres alícuotas de 10 mL del filtrado. En una bureta volumétrica de 10 mL se colocó reactivo 2,6- dicloroindofenol ( $1 \times 10^{-3}$  N) y se hizo la titulación de las alícuotas hasta la aparición de una coloración rosa constante durante 30 segundos. Los resultados se expresaron en mg  $100^{-1}$  de peso fresco (PF) mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Vitamina C} = \frac{\text{mL utilizado de 2,6 dicloroindofenol} * 0.088 * \text{volumen total} * 100}{\text{volumen alícuota} * \text{peso de la muestra}}$$

### Análisis estadístico

Se analizaron ocho repeticiones por tratamiento para las variables agronómicas, mientras que para las variables de calidad se consideraron cuatro repeticiones por tratamiento. Se evaluaron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial de  $2 \times 2 \times 2 + 2$  para un total de 10 tratamientos. El procesamiento de los datos se realizó con el programa Infostat versión 2020, se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias con la prueba LSD Fisher ( $P \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS

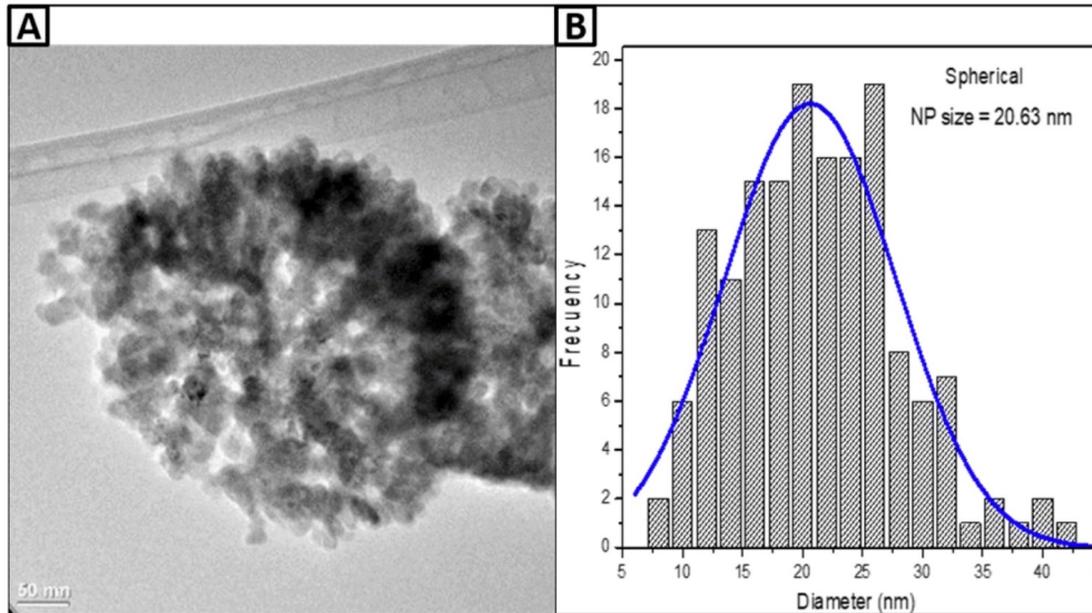
### Caracterización de nanopartículas de óxido de zinc

La morfología de las NPs ZnO observada por microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM), revela la presencia de nanopartículas esféricas de 20.63 nm (Figura 1a). El histograma de distribución del tamaño de la partícula indica que oscila entre los 7.5 y 42.5 nm, con una media de 20 nm (Figura 1b). Además, para las nanopartículas hexagonales (Figura 2a), se mostraron partículas individuales que oscilan entre las 0.025  $\mu\text{m}$  y 2.5  $\mu\text{m}$  con un promedio de 1.7  $\mu\text{m}$ .

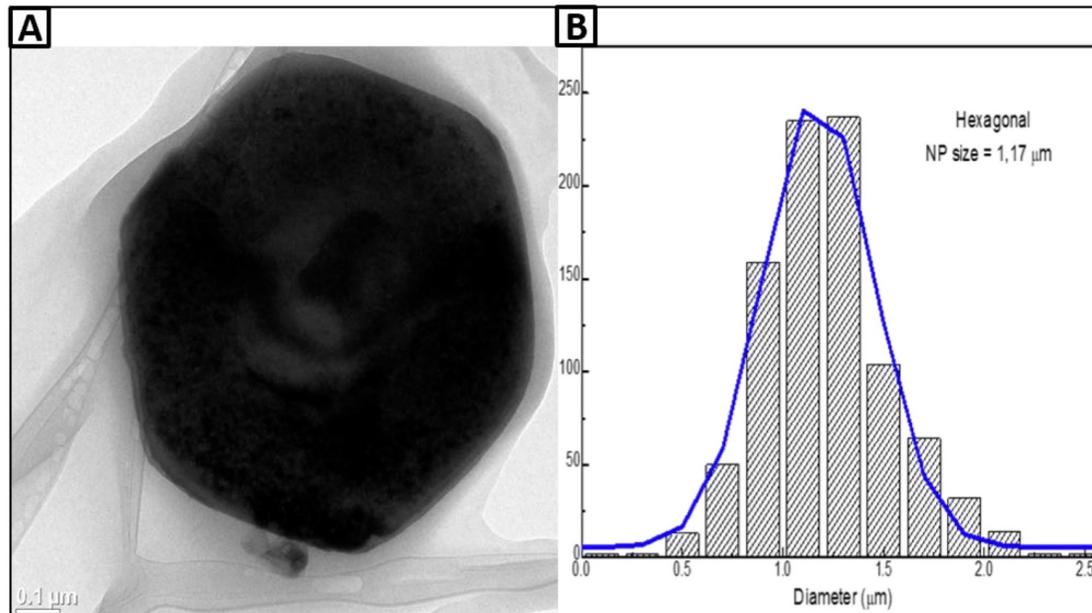
### Variables Agronómicas

Los resultados mostraron que el factor NaCl no tuvo influencia en la altura de la planta (Tabla 1), mientras que la morfología hexagonal tuvo una mejora. Respecto a las dosis, se observa un aumento significativo debido a la concentración, presentando la de 100 mg  $\text{L}^{-1}$  la que tuvo los mejores resultados. Mientras que, para la interacción de los factores o la combinación, se notó un aumento del 10% con el tratamiento con aplicación de NaCl más NPs con morfología hexagonal en dosis de 100 mg  $\text{L}^{-1}$  en relación con el testigo absoluto (Figura 3). Para el diámetro del tallo, factores e interacción no presentaron diferencias estadísticas significativas.

Para el peso seco de la raíz, el factor NaCl no afectó este parámetro, pero fue mayor cuando se aplicaron NPs de morfología hexagonal; en cuanto al factor dosis la de 100 mg  $\text{L}^{-1}$  mostró mayor incremento



**Figura 1.** Micrografía de microscopía electrónica de transmisión que muestra la morfología esférica de las NPs ZnO (A) y el histograma de distribución del tamaño de partículas (B).



**Figura 2.** Micrografía de microscopía electrónica de transmisión que muestra la morfología hexagonal de las NPs ZnO (A) y el histograma de distribución del tamaño de partículas (B).

de peso de raíz (Tabla 1). Para la interacción entre los factores NaCl, morfología y dosis, el tratamiento con NPs hexagonales en dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> incremento en un 31% en relación con el testigo absoluto, mien-

tras que el tratamiento con NaCl en combinación con NPs hexagonales en dosis de 100 mg L<sup>-1</sup> afectó de forma significativa el peso seco de la raíz en un 31% en relación con el testigo salino (Figura 3).

**Tabla 1.** Variables agronómicas de plantas de pimienta tratadas con NaCl y NPs ZnO de diferente morfología.

Factor	Tratamiento	AP (cm)	DT(mm)	PSR(g)	PSP(g)	PFP(g)
NaCl (mM)	0	184.71 <sup>a</sup>	14.50 <sup>a</sup>	14.30 <sup>a</sup>	143.67 <sup>a</sup>	1315.22 <sup>a</sup>
	50	180.92 <sup>a</sup>	14.68 <sup>a</sup>	14.28 <sup>a</sup>	143.83 <sup>a</sup>	1098.80 <sup>b</sup>
ANOVA		0.1175	0.3831	0.999	0.9475	<0.0001
Morfología	Esférica	180.21 <sup>b</sup>	14.61 <sup>a</sup>	13.53 <sup>b</sup>	140.72 <sup>b</sup>	1240.84 <sup>a</sup>
	Hexagonal	185.42 <sup>a</sup>	14.57 <sup>a</sup>	15.06 <sup>a</sup>	146.78 <sup>a</sup>	1173.19 <sup>b</sup>
ANOVA		0.0327	0.8323	0.0013	0.0165	<0.0001
NPs	0	173.25 <sup>c</sup>	14.56 <sup>a</sup>	12.72 <sup>b</sup>	132.27 <sup>c</sup>	1072.61 <sup>b</sup>
	50	182.72 <sup>b</sup>	14.70 <sup>a</sup>	14.90 <sup>a</sup>	146.02 <sup>b</sup>	1304.09 <sup>a</sup>
(mg L <sup>-1</sup> )	100	192.47 <sup>a</sup>	14.51 <sup>a</sup>	15.28 <sup>a</sup>	152.96 <sup>a</sup>	1244.34 <sup>a</sup>
ANOVA		<0.0001	0.7542	<0.0001	<0.0001	0.0171
Interacción	NaCl*Morfología* NPs					
ANOVA			0.9118	0.8179	0.6831	0.075
	C.V %	6.43	7.13	15.71	8.43	11.29

AP: altura de la planta, DT: diámetro del tallo, PSR: peso seco raíz, PSP: peso seco planta, PFP: peso frutos por planta, Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ), prueba LSD Fisher. C.V: coeficiente de variación.

No se observó influencia del NaCl en la variable peso seco de la planta (Tabla 1), pero aumentó con la aplicación de NPs de morfología hexagonal; mientras que para el factor dosis, se encontró una mejora con la dosis de 100 mg L<sup>-1</sup>. Para la interacción de los factores NaCl, morfología y dosis, se registró un aumento del 30% en el peso seco de la planta, en el tratamiento de NaCl más NPs hexagonales en dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> en comparación con el testigo absoluto (Figura 3). Esto destaca la importancia de este tratamiento, debido a que el peso seco es una variable que proporciona información valiosa sobre el crecimiento, desarrollo y el estado nutricional de las plantas.

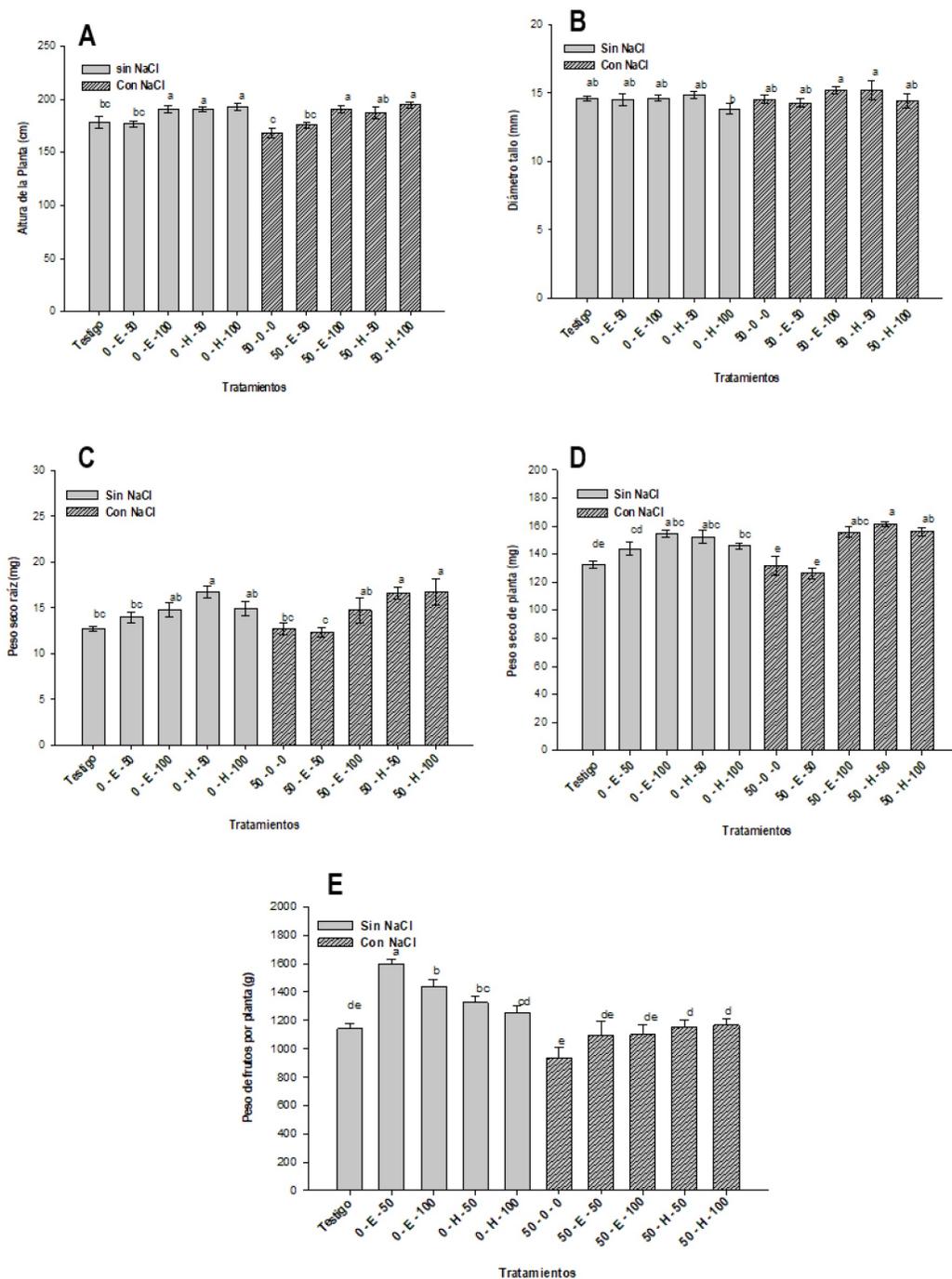
En lo que respecta al peso de los frutos por planta (Tabla 1), todos los factores mostraron diferencias estadísticas significativas tanto el factor NaCl, morfología y dosis, el peso de los frutos aumentó con la morfología esférica, mientras que las dosis de 50 y 100 mg L<sup>-1</sup> se comportaron de manera similar incrementando el peso de fruto por planta. Para la interacción de los factores, el tratamiento con NPs esféricas en dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> aumentó un 40% en comparación con el testigo absoluto (Figura 3). Esta diferencia demuestra, que el tratamiento fue efectivo para promover mayor número de frutos por planta, ya que es un indicador directo del rendimiento de un cultivo.

### Variables de calidad del fruto

La firmeza (Tabla 2) mostró diferencias significativas en el factor NaCl, no obstante, la morfología no manifestó efecto; presentando la de 50 mg L<sup>-1</sup> una mejoría, mientras que, para la interacción de los factores, el tratamiento de NaCl en combinación con NPs esféricas a dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> aumentó la firmeza en un 24% en relación con el testigo absoluto (Figura 4). Para pH, conductividad eléctrica (Tabla 2), factores e interacción no tuvieron diferencias significativas.

En relación con los sólidos solubles totales (Tabla 2), el factor NaCl y la morfología no mostraron diferencias estadísticas significativas. Pero el factor dosis tuvo un incremento con la concentración presentando la dosis de 100 mg L<sup>-1</sup> el mayor contenido de sólidos solubles totales. En lo que respecta a la interacción entre los factores se observó que el tratamiento con aplicación de NPs hexagonales en dosis de 100 mg L<sup>-1</sup> tuvo un aumento del 11% en relación con el testigo (Figura 4). Los resultados muestran que dicho tratamiento puede incrementar el contenido de sólidos solubles totales, parámetro importante debido a su influencia en el sabor y la calidad organoléptica del fruto de chile pimienta.

El potencial ORP (Tabla 2) fue menor cuando se aplicó NaCl, y el factor morfología no tuvo efecto en este parámetro, en cuanto a las dosis el potencial óxido reductor disminuyó con la dosis de 100 mg L<sup>-1</sup>



**Figura 3.** Efecto de la interacción cloruro de sodio y NPs ZnO en variables agronómicas. 0-E-50: NPs esféricas 50 mg L<sup>-1</sup>, 0-E-100: NPs esféricas 100 mg L<sup>-1</sup>, 0-H-50: NPs hexagonales 50 mg L<sup>-1</sup>, 0-H-100: NPs hexagonales 100 mg L<sup>-1</sup>, 50-0-0: 50 mM cloruro de sodio, 50-E-50: NPs esféricas 50 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio, 50-E-100: NPs esféricas 100 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio, 50-H-50: NPs hexagonales 50 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio, 50-H-100: NPs hexagonales 100 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio. Todos los datos son la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p \leq 0.05$ ), prueba LSD Fisher.

**Tabla 2.** Variables de calidad de fruto de plantas de pimiento tratadas con NaCl y NPs ZnO de diferente morfología.

Factor	Tratamiento	FIR (Kg cm <sup>-2</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	SST °Brix	ORP (mV)	AT (%)	Vit C (mg 100 <sup>-1</sup> PS)
NaCl (mM)	0	3.85 <sup>b</sup>	5.15 <sup>a</sup>	5.54 <sup>a</sup>	7.24 <sup>a</sup>	0.23 <sup>a</sup>	0.40 <sup>a</sup>	133.61 <sup>a</sup>
	50	4.03 <sup>a</sup>	5.14 <sup>a</sup>	5.45 <sup>a</sup>	7.24 <sup>a</sup>	0.16 <sup>b</sup>	0.38 <sup>a</sup>	125.12 <sup>b</sup>
ANOVA		0.0133	0.7973	0.2945	0.9491	<0.0001	0.1066	0.0334
Morfología	Esférica	3.87 <sup>a</sup>	5.14 <sup>a</sup>	5.41 <sup>a</sup>	7.18 <sup>a</sup>	0.2 <sup>a</sup>	0.39 <sup>a</sup>	129.27 <sup>a</sup>
	Hexagonal	4.01 <sup>a</sup>	5.15 <sup>a</sup>	5.57 <sup>a</sup>	7.29 <sup>a</sup>	0.19 <sup>a</sup>	0.38 <sup>a</sup>	129.46 <sup>a</sup>
ANOVA		0.0563	0.9181	0.0513	0.2885	0.2835	0.3639	0.9613
NPs	0	3.72 <sup>c</sup>	5.015 <sup>a</sup>	5.53 <sup>ab</sup>	7.05 <sup>b</sup>	0.21 <sup>a</sup>	0.36 <sup>b</sup>	119.32 <sup>b</sup>
	50	4.18 <sup>a</sup>	5.15 <sup>a</sup>	5.34 <sup>b</sup>	7.23 <sup>ab</sup>	0.21 <sup>a</sup>	0.38 <sup>b</sup>	138.75 <sup>a</sup>
(mg L <sup>-1</sup> )	100	3.92 <sup>b</sup>	5.14 <sup>a</sup>	5.62 <sup>a</sup>	7.44 <sup>a</sup>	0.16 <sup>b</sup>	0.42 <sup>a</sup>	130.02 <sup>a</sup>
ANOVA		<0.0001	0.9181	0.0513	0.0133	<0.0001	0.0005	0.0009
Interacción	NaCl*Morfología*NPs	0.2658	0.7973	0.5487	0.0133	0.0502	0.0117	<0.0001
ANOVA								
	C.V %	5.96	1.08	4.97	4.96	10.95	10.39	10.27

FIR: firmeza, CE: conductividad eléctrica, SST: sólidos solubles totales, ORP: potencial oxido-reducción, AT: acidez titulable, Vit C: vitamina C. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ), prueba LSD Fisher. C.V: coeficiente de variación.

y en la interacción entre los factores, el tratamiento con aplicación de cloruro de sodio y NPs hexagonales en 100 mg L<sup>-1</sup> tuvo una disminución del 46% en relación con el testigo absoluto (Figura 4). Estos resultados proporcionan información valiosa, puesto que el ORP se asocia con mayor capacidad antioxidante, además de ser un indicador de la calidad.

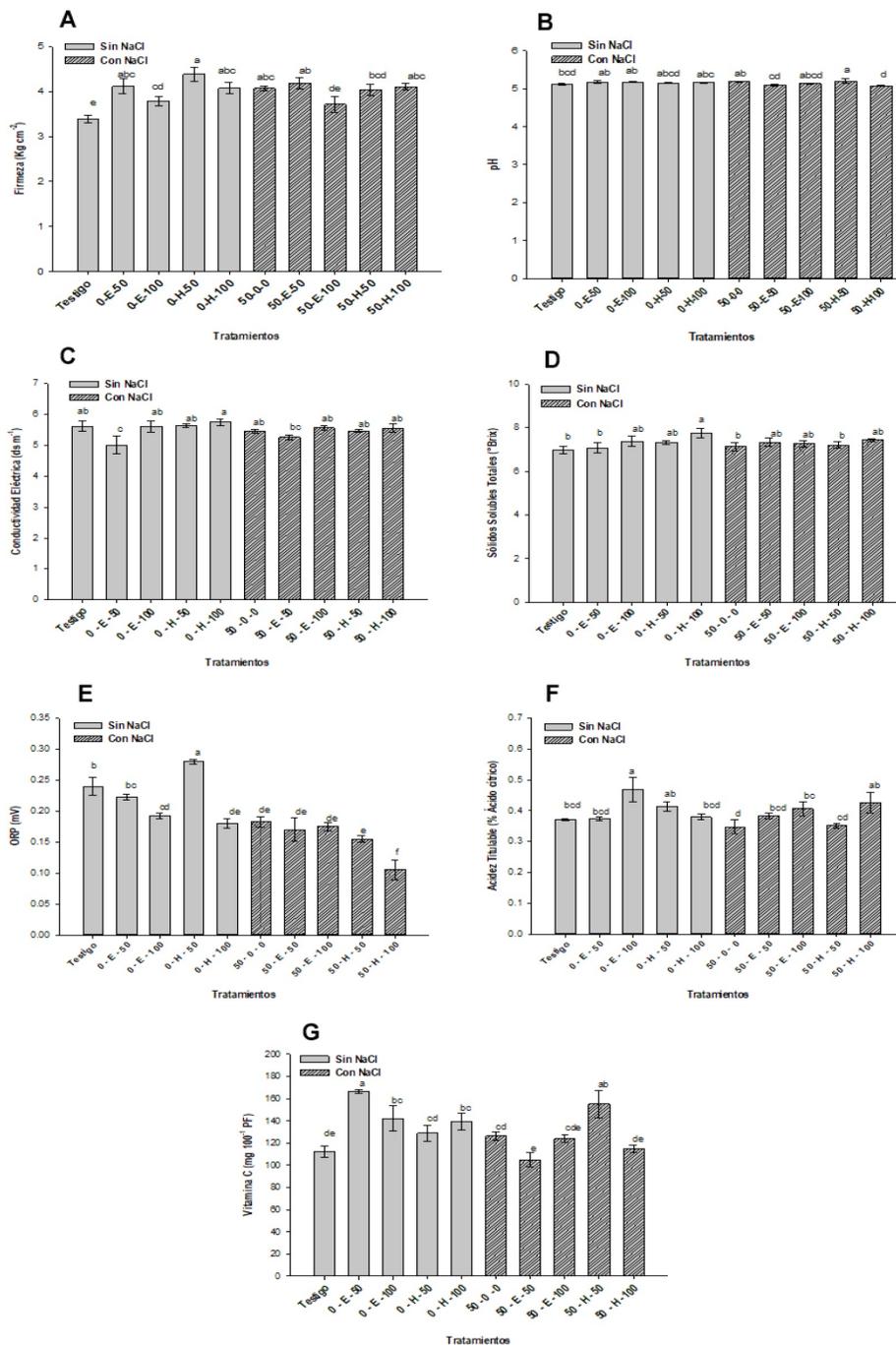
La acidez titulable (Tabla 2) no tuvo diferencias significativas para la aplicación de NaCl y el tipo de morfología, mientras que el factor de la dosis mostró un efecto significativo con 100 mg L<sup>-1</sup>, en la interacción entre los factores destacó el tratamiento de NPs con morfología esférica en dosis de 100 mg L<sup>-1</sup> que aumentó en un 27% en relación con el testigo absoluto (Figura 4).

La vitamina C (Tabla 2), tuvo mayor contenido sin la aplicación de NaCl, mientras que para la morfología no se observaron diferencias. Para el factor dosis, las de 50 y 100 mg L<sup>-1</sup> presentaron una mejora; mientras que el tratamiento sin aplicación de NaCl en combinación de NPs con morfología esférica en dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> mostró un incremento del 48% en relación con el testigo absoluto. De manera similar el tratamiento con NaCl más NPs con morfología hexagonal en dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> mostró un incremento del 38% en relación con el testigo absoluto (Figura 4).

## DISCUSIÓN

### Variables Agronómicas

Las NPs ZnO mejoraron el crecimiento vegetativo de las plantas de pimiento. Los resultados de altura de la planta son similares a lo reportado por Munir *et al.* (2018) quienes mencionan que la concentración de 100 mg L<sup>-1</sup> de NPs ZnO con morfología hexagonal tamaño de 34 nm, aumentó la altura de plantas de trigo. También en plantas de papa se observó aumentó del crecimiento con la aplicación de NPs ZnO esféricas y hexagonales en dosis de 50 y 100 mg L<sup>-1</sup> (Al-Selwey *et al.* 2023). El efecto positivo de las NPs en parte puede atribuirse al elemento zinc, que actúa como un micronutriente esencial que ayuda a mantener una serie de actividades importantes dentro de la membrana celular, como la elongación celular y la biosíntesis de proteínas en el crecimiento de las plantas (Cakmak 2000, Rout y Das 2009, Boonchuay *et al.* 2013). Se ha indicado que el tamaño nanométrico de estos materiales incrementa el área de superficie, lo que puede aumentar su reactividad, ya que las NPs más pequeñas pueden liberar más iones que las NPs de mayor tamaño (Xiu *et al.* 2012). Además, la morfología es un factor importante en las NPs que potencialmente afecta su interacción con las membranas celulares, así como la capacidad para penetrar en las células (Peng *et al.* 2011), por lo que, la forma de las NPs influye en su absorción celular. Se ha menciona-



**Figura 4.** Efecto de la interacción cloruro de sodio y NPs Zn en variables de calidad de fruto. 0-E-50: NPs esféricas 50 mg L<sup>-1</sup>, 0-E-100: NPs esféricas 100 mg L<sup>-1</sup>, 0-H-50: NPs hexagonales 50 mg L<sup>-1</sup>, 0-H-100: NPs hexagonales 100 mg L<sup>-1</sup>, 50-0-0: 50 mM cloruro de sodio, 50-E-50: NPs esféricas 50 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio, 50-E-100: NPs esféricas 100 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio, 50-H-50: NPs hexagonales 50 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio, 50-H-100: NPs hexagonales 100 mg L<sup>-1</sup> + 50 mM cloruro de sodio. Todos los datos son la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p ≤ 0.05), prueba LSD Fisher.

do que las nanopartículas esféricas exhiben mayores tasas de absorción en comparación con NPs en forma de varilla y cilíndricas (Zhao y Stenzel 2018), los resultados mostraron una buena respuesta con la aplicación de NPs hexagonales, efecto que aún no se comprende muy bien, ya que algunos autores indican que las interacciones nano-bio sugieren ser complejas (Park *et al.* 2008).

La aplicación de NPs ZnO además de mejorar el crecimiento, también favoreció la acumulación de biomasa, efecto previamente informado en plantas de tabaco, ya que el ZnO afectó de forma positiva el peso seco de raíz (Tirani *et al.* 2019), también en plántulas de pimiento se observaron resultados similares (Magdaleno *et al.* 2023). Al respecto Syu *et al.* (2014) reportaron que los NPs de plata con morfología esférica, triangular y decahédricas exhibieron diferentes niveles de efectos fitoestimuladores en *Arabidopsis*, por lo que, la morfología juega un papel importante en la respuesta de la planta, que pueden interferir con múltiples vías de señalización en las células vegetales. Con respecto al peso seco, Pérez-Velasco *et al.* (2020) reportaron que el peso seco foliar aumentó con la aplicación de NPs hexagonales y esféricas, pero fue mayor cuando se utilizó NPs hexagonales. Por otro lado, la salinidad es un estresor abiótico de gran importancia que puede reducir la producción cuantitativa y cualitativa de los cultivos (Machado y Serralheiro 2017), entre las especies iónicas que pueden inducir salinidad se encuentra el NaCl que puede causar alteraciones osmóticas y/o iónicas a nivel celular, interfiriendo en la nutrición de las plantas y alterando su crecimiento y rendimiento (Yang y Guo 2018, Heikal *et al.* 2023). Pero la aplicación de niveles moderados, así como la duración y el tiempo de aplicación, pueden aumentar parámetros de importancia hortícola como el contenido de metabolitos o crecimiento (Lucini *et al.* 2016, Roupheal y Kyriacou 2018), teniendo en cuenta que la cantidad de NaCl utilizada en el presente trabajo y el método de aplicación espaciado mantuvieron niveles de conductividad eléctrica por debajo de  $6.0 \text{ dS m}^{-1}$ , niveles considerados como salinidad moderada o suave (Petropoulos *et al.* 2017), que puede actuar como un estrés positivo o eustres

controlado para modular parámetros fisiológicos y bioquímicos de la planta, con impacto positivo en variables de crecimiento y acumulación de biomasa.

Para el peso de los frutos por planta, en tomate se observaron resultados similares con NPs de morfología esférica con tamaño de 10-30 nm con resultados significativos en el rendimiento (Pejam *et al.* 2021). Se sabe que a medida que disminuye el tamaño de las partículas, el área superficial, la energía superficial y la energía de unión superficial de las NPs ZnO aumentan, por lo tanto, se absorben y se utilizan más fácilmente por las plantas (Dimkpa *et al.* 2019), a tales propiedades puede atribuirse el aumento en el rendimiento (Khodakovskaya *et al.* 2012). Es importante mencionar el papel del zinc, debido a que es responsable del metabolismo del ácido ribonucleico (ARN), fomentando la formación de carbohidratos, proteínas y del ácido desoxirribonucleico (ADN) y de esta forma el número de frutos por planta (Harris *et al.* 2015). En lo referente a la morfología, un mayor incremento de rendimiento con NPs de morfología esférica pudiera deberse a que como se ha mencionado, las NPs esféricas tienen una alta actividad biológica (Liu *et al.* 2004).

### Variables de calidad del fruto

Los resultados de contenido de sólidos solubles totales fueron opuestos a los reportado por Pérez-Velasco *et al.* (2021) quienes encontraron mayor contenido de sólidos solubles totales en frutos de tomate de plantas tratadas con NPs esféricas. En este mismo sentido Gutiérrez-Miceli *et al.* (2021) al aplicar NPs ZnO en plantas de tomate reportan aumento del contenido de sólidos solubles totales con aplicaciones foliares de NPs ZnO en concentración de  $50 \text{ mg L}^{-1}$ . Los resultados obtenidos, por un lado, pueden deberse a que el zinc es un micronutriente que ha desempeñado un papel clave en la fotosíntesis y enzimas relacionadas, que son responsables del aumento de azúcar (Mousavi *et al.* 2013); además juega un papel importante en la síntesis y transferencia de carbohidratos y proteínas a lo que puede atribuirse el incremento de estos compuestos (Yogarathnam y Greenham 1982). Se sabe que el tamaño, la forma, las composiciones, la dis-

posición atómica de las NPs y la interacción de las NPs con la estructura celular varía (Van-Aken 2015), por lo que, el mecanismo del como las NPs hexagonales tuvieron mayor influencia en este parámetro es compleja y poca conocida. Este parámetro es importante porque indica la cantidad de azúcar (sacarosa) presente en el fruto, así como la frescura y el estado de madurez de este; esta variable determina la toma de decisiones para el rumbo de la fruta ante una cadena de transformación agroindustrial (Rowland *et al.* 2020).

Un potencial oxido-reducción (ORP) con valores bajos indica mejor calidad de la fruta, lo que puede traducirse en mayor potencial antioxidante (Juárez-Maldonado *et al.* 2016). El resultado indica de manera indirecta que se generó una gran cantidad de compuestos antioxidantes, en este contexto, se ha descrito que las NPs ZnO aumentan los compuestos antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Rivera-Gutiérrez *et al.* 2021). Estos resultados pueden estar asociados a que las NPs tienen mayor potencial de transporte, biodisponibilidad y absorción, lo que les permite interactuar con estructuras intracelulares que estimulan la formación de ROS (Ghosh *et al.* 2016, García-López *et al.* 2019). Por su parte la aplicación de NaCl como un estrés moderado (eustrés) puede inducir a las plantas a reorganizar el metabolismo de esta, desencadenando cambios beneficiosos en la calidad nutricional como aumento en los compuestos antioxidantes (Rouphael *et al.* 2018, Rouphael y Kyriacou 2018). Para la acidez titulable García-López *et al.* (2019) encontraron menor valor en chiles habaneros tratados con NPs ZnO con morfología esférica en dosis de 1 000 y 2 000 mg L<sup>-1</sup>, este comportamiento se debe a que durante el proceso de maduración existe un aumento de reacciones metabólicas y de la concentración de ácidos orgánicos que intervienen en el ciclo de Krebs (Ghasemnezhad *et al.* 2011). Valores altos de acidez titulable encontrados representan una ventaja por causar menor deterioro del fruto y se relacionan con el sabor de las frutas; ya que presentan mejor sabor (Flores-Velázquez *et al.* 2022). Los resultados obtenidos sugieren que las NPs ZnO pueden influir en la respiración del fruto y mejorar parámetros de calidad como la acidez titula-

ble. Al respecto, Uresti-Porras *et al.* (2021) reportaron que el contenido de vitamina C incrementó en pimienta morrón con el uso de NPs de morfología esférica a dosis de 30 mg L<sup>-1</sup>. Mientras que Esfandiari *et al.* (2016) mencionan que la aplicación foliar de zinc puede aumentar el contenido de vitamina C en trigo. Al respecto, se sabe que las plantas han desarrollado diversos mecanismos de protección para limitar el daño oxidativo mediante la producción de antioxidantes no enzimáticos, como el ácido ascórbico que está correlacionados con la defensa de las plantas, debido a esto, es posible que su contenido en la planta y fruto aumente como respuesta al estrés inducido por NPs de ZnO (García-Gómez *et al.* 2017).

## CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc de morfología hexagonal a dosis de 100 mg L<sup>-1</sup> tuvo efecto. Aplicar cloruro de sodio de forma independiente no mejoró el crecimiento de las plantas de pimienta, pero si la firmeza del fruto; el uso del cloruro de sodio combinado con nanopartículas de óxido de zinc, aumento el peso seco de la planta y mejoró atributos de calidad del fruto como firmeza y potencial óxido-reducción. Los resultados sugieren que el uso de nanopartículas puede mejorar el crecimiento de las plantas y aumentar parámetros de calidad, mientras que el cloruro de sodio combinado con nanopartículas podría ser una herramienta útil para mejorar atributos de calidad en fruto, sin embargo, queda mucho por explorar sobre los mecanismos de como la morfología de las nanopartículas influye en la mejora de dichos parámetros.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por el financiamiento del proyecto interno con clave: 38111-425104001-2478. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a la autora principal para realizar estudios de Doctorado.

## LITERATURA CITADA

- Al-Selwey WA, Alsadon AA, Alenazi MM, Tarroum M, Ibrahim AA, Ahmad A, Seleiman MF (2023) Morphological and biochemical response of potatoes to exogenous application of ZnO and SiO<sub>2</sub> nanoparticles in a water deficit environment. *Horticulturae* 9: 883. DOI: 10.3390/horticulturae9080883.
- Boonchuay P, Cakmak I, Rerkasem B, Prom-U-Thai C (2013) Effect of different foliar zinc application at different growth stages on seed zinc concentration and its impact on seedling vigor in rice. *Soil Science and Plant Nutrition* 59: 180-188.
- Cakmak I (2000) Tansley Review No. 111: possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist* 146: 185-205.
- Cortés-Estrada CE, Gallardo-Velázquez T, Osorio-Revilla G, Castañeda-Pérez E, Meza-Márquez OG, López-Cortez M, Hernández-Martínez DM (2020) Prediction of total phenolics, ascorbic acid, antioxidant capacities, and total soluble solids of *Capsicum annuum* L. (bell pepper) juice by FT-MIR and multivariate analysis. *Food Science and Technology* 126: 109285. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109285.
- Dimkpa CO, Singh U, Bindraban PS, Adisa IO, Elmer WH, Gardea-Torresdey JL, White JC (2019) Addition-omission of zinc, copper, and boron nano and bulk oxide particles demonstrate element and size-specific response of soybean to micronutrients exposure. *Science of the Total Environment* 665: 606-616.
- Esfandiari E, Abdoli M, Mousavi SB, Sadeghzadeh B (2016) Impact of foliar zinc application on agronomic traits and grain quality parameters of wheat grown in zinc deficient soil. *Indian Journal of Plant Physiology* 21: 263-270.
- Faizan M, Faraz A, Yusuf M, Khan ST, Hayat S (2018) Zinc oxide nanoparticle-mediated changes in photosynthetic efficiency and antioxidant system of tomato plants. *Photosynthetica* 56: 678-686.
- Flores-Velázquez J, Mendoza-Pérez C, Rubiños-Panta JE, Ruelas-Islas JDR (2022) Quality and Yield of Bell Pepper Cultivated with Two and Three Stems in a Modern Agriculture System. *Horticulturae* 8: 1187. DOI: 10.3390/horticulturae8121187.
- Fратиanni F, d'Acierno A, Cozzolino A, Spigno P, Riccardi R, Raimo F, Nazzaro F (2020) Biochemical characterization of traditional varieties of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) of the Campania region, Southern Italy. *Antioxidants* 9: 556. DOI: 10.3390/antiox9060556.
- García-Gómez C, Obrador A, González D, Babín M, Fernández MD (2017) Comparative effect of ZnO NPs, ZnO bulk and ZnSO<sub>4</sub> in the antioxidant defences of two plant species growing in two agricultural soils under greenhouse conditions. *Science of the Total Environment* 589: 11-24.
- García-López JI, Niño-Medina G, Olivares-Sáenz E, Lira-Saldivar RH, Barriga-Castro ED, Vázquez-Alvarado R, Zavala-García F (2019) Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants* 8: 254. DOI: 10.3390/plants8080254.
- Ghasemnezhad M, Sherafati M, Payvast GA (2011) Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (*Capsicum annuum*) fruits at two different harvest times. *Journal of Functional Foods* 3: 44-49.
- Ghonaime AA, Abou-Hussein SD, El-Tohamy WA (2019) Eustress (Positive stress) Salinity as an enhancement tool for bioactive ingredients and quality characteristics of vegetables. *Middle East Journal of Applied Sciences* 9: 456-463.

- Ghosh M, Jana A, Sinha S, Jothiramajayam M, Nag A, Chakraborty A, Mukherjee A, Mukherjee A (2016) Effects of ZnO nanoparticles in plants: cytotoxicity, genotoxicity, deregulation of antioxidant defenses, and cell-cycle arrest. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 807: 25-32.
- González SC, Bolaina-Lorenzo E, Pérez-Trujillo JJ, Puente-Urbina BA, Rodríguez-Fernández O, Fonseca-García A, Betancourt-Galindo R (2021) Antibacterial and anticancer activity of ZnO with different morphologies: a comparative study. *Biotech* 11: 1-12. DOI: 10.1007/s13205-020-02611-9.
- Gutiérrez-Miceli FA, Oliva-Llaven MÁ, Luján-Hidalgo MC, Velázquez-Gamboa MC, González-Mendoza D, Sánchez-Roque Y (2021) Zinc oxide phytonanoparticles' effects on yield and mineral contents in fruits of tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. Cherry) under field conditions. *The Scientific World Journal* 2021: 1-11. DOI: 10.1155/2021/5561930.
- Harris KD, Mathuma V (2015) Effect of foliar application of boron and zinc on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Asian Journal of Pharmaceutical Science & Technology* 5: 74-78.
- Heikal YM, El-Esawi MA, El-Ballat EM, Abdel-Aziz HM (2023) Applications of nanoparticles for mitigating salinity and drought stress in plants: An overview on the physiological, biochemical and molecular genetic aspects. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 51: 297-327.
- Ingham B, Toney MF (2014) X-ray diffraction for characterizing metallic films. In: Barmak K, Coffey K (Eds) *Metallic films for electronic, optical and magnetic applications*. Woodhead Publishing. UK, pp: 3-38.
- Jain R, Srivastava S, Solomon S, Shrivastava AK, Chandra A (2010) Impact of excess zinc on growth parameters, cell division, nutrient accumulation, photosynthetic pigments and oxidative stress of sugarcane (*Saccharum* spp.). *Acta Physiologiae Plantarum* 32: 979-986.
- Juárez-Maldonado A, Ortega-Ortiz H, Pérez-Labrada F, Cadenas-Pliego G, Benavides-Mendoza A (2016) Cu nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 89: 183-189.
- Kah M, Tufenkji N, White JC (2019) Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature nanotechnology* 14: 532-540.
- Kausar A, Hussain S, Javed T, Zafar S, Anwar S, Hussain S, Saqib M (2023) Zinc oxide nanoparticles as potential hallmarks for enhancing drought stress tolerance in wheat seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 195: 341-350.
- Khodakovskaya MV, De Silva K, Biris AS, Dervishi E, Villagarcia H (2012) Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS Nano* 6: 2128-2135.
- Kitayama M, Tisarum R, Theerawitaya C, Samphumphung T, Takagaki M, Kirdmanee C, Cha-um S (2019) Regulation on anthocyanins,  $\alpha$ -tocopherol and calcium in two water spinach (*Ipomoea aquatica*) cultivars by NaCl salt elicitor. *Scientia Horticulturae* 249: 390-400.
- Liu MZ, Zhang SY, Shen YH, Zhang ML (2004) Selenium nanoparticles prepared from reverse microemulsion process. *Chinese Chemical Letters* 15: 1249-1252.
- Loizzo MR, Pugliese A, Bonesi M, Menichini F, Tundis R (2015) Evaluation of chemical profile and antioxidant activity of twenty cultivars from *Capsicum annuum*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum chacoense* and *Capsicum chinense*: A comparison between fresh and processed peppers. *Food Science and Technology* 64: 623-631.
- Lowry GV, Avellan A, Gilbertson LM (2019) Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nature nanotechnology* 14: 517-522.

- Lucini L, Borgognone D, Rouphael Y, Cardarelli M, Bernardi J, Colla G (2016) Mild potassium chloride stress alters the mineral composition, hormone network, and phenolic profile in artichoke leaves. *Frontiers in Plant Science* 7: 948. DOI: 10.3389/fpls.2016.00948.
- Machado RMA, Serralheiro RP (2017) Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae* 3: 30. DOI: 10.3390/horticulturae3020030.
- Magdaleno GG, Juárez MA, Betancourt GR, Gonzales MS, Cabrera DFM, Sánchez VM, Méndez LA. (2023) Zinc oxide nanoparticle morphology modify germination and early growth of bell pepper seedlings: Zinc oxide nanoparticle morphology. *Biotecnia* 25: 5-15.
- Moghaddam A, Larijani HR, Oveysi M, Moghaddam HRT, Nasri M (2023) Alleviating the adverse effects of salinity stress on *Salicornia persica* using sodium nitroprusside and potassium nitrate. *Plant Biology* 23: 166. DOI: 10.1186/s12870-023-04179-x.
- Mousavi SR, Galavi M, Rezaei M (2013) Importance of zinc (Zn) for crop production: a review. *International Journal of Agronomy and Plant Production* 4: 64-68.
- Munir T, Rizwan M, Kashif M, Shahzad A, Ali S, Amin N, Zahid R, Alam MFE, Imram M (2018) Effect of zinc oxide nanoparticles on the growth and zn uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed priming method. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures* 13: 315-323.
- Nel AE, Mädler L, Velegol D, Xia T, Hoek E, Somasundaran P, Klaessing F, Castranova V, Thompson M (2009) Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. *Nature materials* 8: 543-557.
- Padayatt SJ, Daruwala R, Wang Y, Eck PK, Song J, Koh WS, Levine M (2001) Vitamin C: From molecular action to optimum intake. In: Packer L (ed) *Handbook of antioxidants. (oxidative stress and disease)*. CRC, MarcelDekker, Inc. Taylor & Francis. New York. pp: 117-145
- Park JH, von Maltzahn G, Zhang L, Schwartz MP, Ruoslahti E, Bhatia SN, Sailor MJ (2008) Magnetic iron oxide nanoworms for tumor targeting and imaging. *Advanced Materials* 20: 1630-1635.
- Peng X, Palma S, Fisher NS, Wong SS (2011) Effect of morphology of ZnO nanostructures on their toxicity to marine algae. *Aquatic Toxicology* 102: 186-196.
- Pérez-Velasco EA, Betancourt Galindo R, Valdez Aguilar LA, González Fuentes JA, Puente Urbina BA, Lozano Morales S A, Sánchez Valdés S (2020) Effects of the morphology, surface modification and application methods of ZnO-NPs on the growth and biomass of tomato plants. *Molecules* 25: 1282. DOI: 10.3390/molecules25061282.
- Pérez-Velasco EA, Valdez-Aguilar LA, Betancourt-Galindo R, Martínez-Juárez J, Lozano-Morales SA, González-Fuentes JA (2021) Gas exchange parameters, fruit yield, quality, and nutrient status in tomato are stimulated by ZnO nanoparticles of modified surface and morphology and their application form. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21: 991-1003.
- Petropoulos SA, Levizou E, Ntatsi G, Fernandes Â, Petrotos K, Akoumianakis K, Barros L, Ferreira I (2017) Salinity effect on nutritional value, chemical composition and bioactive compounds content of *Cichorium spinosum* L. *Food Chemistry* 214: 129-136.
- Rivera-Gutiérrez RG, Preciado-Rangel P, Fortis-Hernández M, Betancourt-Galindo R, Yescas-Coronado P, Orozco-Vidal JA (2021) Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12: 791-803.
- Rossi L, Fedenia LN, Sharifan H, Ma X, Lombardini L (2019) Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 135: 160-166.

- Rouphael Y, Kyriacou MC (2018) Enhancing quality of fresh vegetables through salinity eustress and biofortification applications facilitated by soilless cultivation. *Frontiers in Plant Science* 9: 1254. DOI: 10.3389/fpls.2018.01254.
- Rouphael Y, Petropoulos SA, Cardarelli M, Colla G (2018) Salinity as eustressor for enhancing quality of vegetables. *Scientia Horticulturae* 234: 361-369.
- Rout GR, Das P (2009) Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. In: Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, Véronique S, Alberola C (eds) *Sustainable agriculture*. Springer. Dordrecht. pp: 873-884
- Rowland SD, Zumstein K, Nakayama H, Cheng Z, Flores AM, Chitwood DH, Maloof JN, Sinha NR (2020) Leaf shape is a predictor of fruit quality and cultivar performance in tomato. *New Phytologist* 226: 851-865.
- Sbartai H, Djebar MR, Rouabhi R, Sbartai I, Berrebbah H (2011) Antioxidative response in tomato plants *Lycopersicon esculentum* L. roots and leaves to zinc. *American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences* 3: 41-46.
- Singh RP, Handa R, Manchanda G (2021) Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release* 329: 1234-1248.
- Syu YY, Hung JH, Chen JC, Chuang HW (2014) Impacts of size and shape of silver nanoparticles on Arabidopsis plant growth and gene expression. *Plant Physiology and Biochemistry* 83: 57-64.
- Tiamiyu QO, Adebayo SE, Ibrahim N (2023) Recent advances on postharvest technologies of bell pepper: A review. *Heliyon* 9: 15302. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15302.
- Tirani MM, Haghjou MM, Ismaili A (2019) Hydroponic grown tobacco plants respond to zinc oxide nanoparticles and bulk exposures by morphological, physiological and anatomical adjustments. *Functional Plant Biology* 46: 360-375.
- Tomasi N, Pinton R, Dalla Costa L, Cortella G, Terzano R, Mimmo T, Scampicchio M, Cesco S (2015) New 'solutions' for floating cultivation system of ready-to-eat salad: A review. *Trends in Food Science & Technology* 46: 267-276.
- Ullah A, Abbasi NA, Shafique M, Qureshi AA (2017) Influence of edible coatings on biochemical fruit quality and storage life of bell pepper cv. "Yolo Wonder". *Journal of Food Quality* 2017: 1-11. DOI: 10.1155/2017/2142409.
- Uresti-Porras JG, Cabrera-De-La Fuente M, Benavides-Mendoza A, Olivares-Sáenz E, Cabrera RI, Juárez-Maldonado A (2021) Effect of graft and nano ZnO on nutraceutical and mineral content in bell pepper. *Plants* 10: 2793. DOI: 10.3390/plants10122793.
- Van-Aken B (2015) Gene expression changes in plants and microorganisms exposed to nanomaterials. *Current Opinion in Biotechnology* 33: 206-219.
- Xiu ZM, Zhang QB, Puppala HL, Colvin VL, Alvarez PJ (2012) Negligible particle-specific antibacterial activity of silver nanoparticles. *Nano Letters* 12: 4271-4275.
- Yang Y, Guo Y (2018) Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. *New Phytologist* 217: 523-539.
- Yogarathnam N, Greenham DWP (1982) The application of foliar sprays containing nitrogen, magnesium, zinc and boron to apple trees. I. Effects on fruit set and cropping. *Journal of Horticultural Science* 57: 151-158.
- Pejam F, Ardebili ZO, Ladan-Moghadam A, Danaee E (2021) Zinc oxide nanoparticles mediated substantial physiological and molecular changes in tomato. *Plos One* 163: 0248778. DOI: 10.1371/journal.pone.0248778.

Zhao J, Stenzel MH (2018) Entry of nanoparticles into cells: The importance of nanoparticle properties. *Polymer Chemistry* 9: 259-272.