

Aspersión foliar de nanoestructuras con zinc en plántulas de pepino (*Cucumis sativus*)

Foliar spraying with zinc nanostructures in cucumber seedlings (*Cucumis sativus*)

Arelis Quirino-García¹ , Claudia Martínez-Alonso¹ , Juan Elías Sabino-López^{1*} ,
Mariana Espinosa-Rodríguez¹ , Mirna Vázquez-Villamar¹ ,
María de los Ángeles Maldonado-Peralta¹ 

¹Maestría en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local, Universidad Autónoma de Guerrero. Carretera Iguala-Tuxpan km 2.5, CP. 40101. Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia: juanelias_sab@hotmail.com

Artículo científico

Recibido: 21 de marzo 2024

Aceptado: 11 de diciembre 2024

RESUMEN. Se estudió el efecto de la aspersión foliar de nanoestructuras con zinc (ZnO-NE) en el crecimiento de plántulas de pepino en invernadero. Los tratamientos fueron cuatro soluciones elaboradas mediante nanoestructuras con zinc (ZnO-NE) obtenidas por microondas profesional (MP) y doméstico (MD), y por precipitación directa (PD); el testigo positivo (TP) fue fertilizante comercial (ZnSO₄) y negativo (TN) agua. Semillas de pepino se sumergieron 2 h en la solución con la fuente respectiva de Zn²⁺ (30 mg L⁻¹) y se sembraron en contenedores de poliestireno con turba y perlita (1:1 v/v), en invernadero. Las plántulas con dos hojas verdaderas se asperjaron con las soluciones correspondientes, cada siete días durante tres semanas. Se presentó menor altura de plántula en TN y mayor diámetro de tallo con ZnO-NE de MD. Las ZnO-NE de MD y PD produjeron hojas más anchas (6.98 y 6.89 mm), PD hojas de mayor longitud (6.01 mm); las plántulas tratadas con ZnO-NE de MP y MD aumentaron el área foliar (360.86 y 313.82 cm²). Las tres fuentes de ZnO-NE incrementaron la longitud de raíz, y el volumen de raíz destacó en TP (10.2 mL). La biomasa fresca en raíz fue mayor con ZnO-NE de MD (3.54 g). Todas las fuentes de Zn mejoraron el peso fresco y seco del tallo; el peso fresco (6.5 g) y seco (0.85 g) de hoja resaltó con ZnO-NE de PD. La aspersión foliar con ZnO-NE es una alternativa para mejorar el crecimiento y producción de biomasa en plántulas de pepino cultivadas en invernadero.

Palabras clave: Semillas, soluciones, nanofertilizantes, crecimiento, biomasa.

ABSTRACT. The foliar spraying effect of zinc nanostructures (ZnO-NE) was studied on cucumber seedlings growth in greenhouse. The treatments were four solutions made thought nanostructures with Zn (ZnO-BE) obtained by professional (MP) and domestic (MD) microwaves, and by direct precipitation (PD); the positive control (TP) was commercial fertilizer (ZnSO₄) and negative (TN) water. Cucumber seeds were immersed for 2 h in the solution with the respective Zn²⁺ (30 mg L⁻¹) source and sowed in polystyrene containers with peat and perlite (1:1 v/v), in greenhouse. Seedlings with two true leaves were sprayed with the corresponding solutions, every seven days for three weeks. Lower seedling height was presented in TN and greater stem diameter with ZnO-NE of MD. The ZnO-NE from MD and PD produced wider leaves (6.98 and 6.89 mm), PD longer leaves (6.01 mm); Seedlings treated with ZnO-NE of MP and MD increased leaf area (360.86 and 313.82 cm²). The three ZnO-NE sources increased root length, and root volume stood out in TP (10.2 mL). Fresh root biomass was higher with ZnO-NE from MD (3.54 g). All Zn sources improved the fresh and dry weight of stem; fresh (6.5 g) and dry (0.85 g) weight of leaf highlighted with ZnO-NE from PD. Foliar spraying with ZnO-NE is an alternative to improve growth and biomass production on cucumber seedlings grown in greenhouse.

Keywords: Seeds, solutions, nanofertilizers, growth, biomass.

Como citar: Quirino-García A, Martínez-Alonso C, Sabino-López JE, Espinosa-Rodríguez M, Vázquez-Villamar M, Maldonado-Peralta M de los A (2024) Aspersión foliar de nanoestructuras con zinc en plántulas de pepino (*Cucumis sativus*). Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. IV: e4095. DOI: 10.19136/era.a11nIV.4095.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, la nanotecnología ha tomado relevancia en diversas áreas de la industria (Mehmood 2018), donde los materiales de tamaño nanométrico han llamado la atención debido a sus destacadas propiedades y versatilidad de usos (Zhang *et al.* 2018). Su empleo en la agricultura no ha sido la excepción, debido a la capacidad para mejorar la germinación de las semillas, el crecimiento y la protección de las plantas ante circunstancias de estrés provocado por factores bióticos y abióticos (Wang *et al.* 2016). Para la biodisponibilidad tanto individual como integral de los fertilizantes se han utilizado diferentes técnicas en las prácticas agrícolas (Zhang *et al.* 2018). Sin embargo, el uso de nanoestructuras (NE) es importante para la elaboración de herbicidas y fertilizantes nanoencapsulados, debido a su menor tamaño y por ende mayor superficie de acción, ya que estas pueden ser absorbidas con mayor facilidad por las plantas (Sanzari *et al.* 2019).

Las nanoestructuras son agregados atómicos con propiedades fisicoquímicas particulares, alta relación superficie-volumen y punto de fusión que cuentan con dimensiones menores de 100 nm (Sanzari *et al.* 2019). Las NE aplicadas como nanofertilizantes (NF) tienen mejores resultados tanto en el crecimiento como en el rendimiento de los cultivos, en comparación con los fertilizantes de síntesis industrial, que afectan directamente al medio ambiente (Miranda-Villagómez *et al.* 2019). Por lo anterior, las nanopartículas se consideran como fuente alternativa de fertilización de mayor eficiencia, ya que proporcionan nutrimentos con mayor disponibilidad y facilidad de absorción en las plantas (Ahmed *et al.* 2023); sobre todo cuando se trata de la fertilización vía foliar, práctica que ha sido ampliamente utilizada para complementar nutrimentos específicos que son requeridos por las plantas (Sanzari *et al.* 2019), por lo que el uso de NF aporta ventajas funcionales y económicas frente a los fertilizantes convencionales (Prasad *et al.* 2012). Para considerarse NF debe aportar al menos uno de los 14 nutrimentos minerales indispensables para las plantas (Miranda-Villagómez *et al.* 2019). En este sentido, el zinc (Zn) es uno de los elementos esenciales en el desarrollo de las plantas, debido a que participa en varios procesos enzimáticos y fisiológicos (Vera-Reyes *et al.* 2018) como catalizador o cofactor estructural (Eisvand *et al.* 2018).

El Zn es un micronutriente que conforma la estructura de enzimas, encargadas de participar en el anabolismo y expresión del ADN, fundamental en el proceso de la fotosíntesis y metabolismo de carbohidratos, mantiene activo el fotosistema II, esencial para el funcionamiento del metabolismo de los ácidos nucleicos (Prasad *et al.* 2012). Así mismo, aumenta la viabilidad de las semillas, la elongación radical e influye en la producción de clorofila (Soto *et al.* 2011, Umair *et al.* 2020). No obstante, a pesar que las NE de ZnO participan en diferentes funciones en las plantas, sus efectos difieren según la especie y variedad (Siddiqui *et al.* 2015). Donde la forma y composición química de la hoja determina la interacción entre el ambiente y velocidad de absorción de nanopartículas de ZnO (Trejo-Téllez *et al.* 2016). Esta respuesta de la aplicación foliar de nutrimentos en la planta depende de la especie vegetal, fuente y concentración del fertilizante y la etapa de crecimiento de la planta (Rivera-Gutiérrez *et al.* 2021, Galindo-Guzmán *et al.* 2022). Pese a la importancia del Zn en la nutrición de los cultivos, son limitados los estudios para investigar el efecto de las NP de ZnO en las plantas (Tymoszuk y Wojnarowicz 2020). La aplicación de NF en la nutrición vegetal ha sido estudiada de manera experimental; no obstante, la información aun es escasa y por ende se requiere de más investigaciones para garantizar su aplicación a gran escala, respecto a varios tipos de

materiales y su impacto ambiental (Chun *et al.* 2020). Del mismo modo, se busca encontrar cantidades (dosis) o concentraciones óptimas para la aplicación de nanomateriales de manera que mejoren la producción de alimentos y la rentabilidad de los cultivos (Singh y Husen 2020), donde el impacto del uso de herbicidas, pesticidas y fertilizantes sea menor, mediante la liberación controlada y dirigida a través de la agricultura de precisión (Prasad *et al.* 2012). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue analizar el efecto de la aplicación foliar de nanoestructuras con zinc (ZnO-NE) en el crecimiento de plántulas de pepino en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

El experimento se estableció en un invernadero tipo túnel cubierto con plástico de polietileno color blanco lechoso de 700 μm , cuya temperatura media fue 27.7 °C y humedad relativa de 43.7%, durante febrero a marzo de 2023, ubicado en la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales de la Universidad Autónoma de Guerrero, localizada en carretera Iguala-Tuxpan km 2.5, Iguala de la Independencia, Guerrero, México, en las coordenadas geográficas 18° 20' 38" Latitud N y 99° 30' 04" Longitud O, a una altitud de 759 m.

Material vegetal

Se utilizaron semillas de pepino del híbrido Polion F-1 (Starseeds, Intenational, Inc®) con una tasa de germinación de 85%. Las semillas se desinfectaron mediante inmersión en NaClO al 0.5% durante 1 min, a continuación, las semillas se lavaron con agua destilada para eliminar el NaClO residual.

Elaboración de nanoestructuras con zinc

Los instrumentos para la elaboración de los precursores de las nanoestructuras se sometieron a esterilización mediante autoclave (AESAR®) a 120 °C y 15 lb de presión durante 15 min. La elaboración de las ZnO-NE se realizó con base en la metodología descrita por Martínez-Alonso *et al.* (2022) y Quirino-García *et al.* (2024), que consistieron en la síntesis a partir de $\text{Zn}(\text{O}_2\text{CCH}_3)_2$ y NaOH. Para la reacción se utilizaron dos hornos de microondas, profesional (LG®) y doméstico (casero) (Mars6®). Posteriormente, se realizó un lavado de las nanoestructuras de óxido de zinc (ZnO-NE) para eliminar las impurezas residuales. Las ZnO-NE obtenidas se nombraron de acuerdo con las síntesis realizadas; microondas profesional (MP), microondas doméstico (MD) y precipitación directa (PD).

Diseño de tratamientos

Las soluciones se prepararon con las ZnO-NE sintetizadas y la fuente (fertilizante) comercial con Zn, utilizando agua destilada como solvente, los cálculos para las cantidades se realizó considerando la concentración de Zn en las ZnO-NE provenientes de microondas profesional (51.90% de Zn^{2+}), microondas doméstico (43.34% de Zn^{2+}) y precipitación directa (49.76% de Zn^{2+}), así como de la fuente comercial (sulfato de zinc (ZnSO_4); Cesco, Solution, Inc®; 35.5% de Zn^{2+}), para el aporte de 30 mg L^{-1} de Zn^{2+} , respectivamente (Quirino-García *et al.* 2024). Las suspensiones se

mantuvieron en agitación ultrasónica hasta homogeneizar, después se agregó a cada frasco un imán de teflón cilíndrico y se colocaron individualmente en la parrilla por 5 min, con lo que se obtuvieron cinco soluciones foliares, consideradas como tratamientos T1 (Microondas profesional); T2 (Microondas doméstico); T3 (Precipitación directa); T4 (Sulfato de zinc: fertilizante comercial (testigo positivo: TP)); T5 (Agua: control (testigo negativo: TN)). A continuación, las semillas se colocaron en las soluciones respectivas con un tiempo de inmersión de 2 h (Lian *et al.* 2020).

Siembra de la semilla y crecimiento de plántulas

La siembra de la semilla se realizó en contenedores de poliestireno de 200 mL de capacidad, llenados con una mezcla de turba y perlita (1:1 v/v). Se colocó una semilla en cada contenedor, a una profundidad de 2.0 cm y se cubrió con el mismo sustrato. A continuación, los contenedores con semilla se regaron con agua de grifo diariamente a las 7:30 y 18:00 h de forma manual, adicionando un volumen promedio de 80 mL en cada contenedor. Una vez que las plántulas emergieron y presentaron de una a dos hojas verdaderas (10 días después de la siembra (dds)), los riegos continuaron con la misma frecuencia, empleando la solución nutritiva universal de Steiner (1984) al 25% de su concentración original con un pH ajustado a 5.5. Cuando las plántulas presentaron dos hojas verdaderas (12 dds) se inició la aspersion foliar con las ZnO-NE de acuerdo con los tratamientos mencionados. Para ello, las soluciones se llevaron a 1 L a la misma concentración y se agregaron en atomizadores de 1 L de capacidad. A continuación, se realizó la aspersion de las soluciones en las plántulas a punto de escurrimiento, de acuerdo con el tratamiento correspondiente en intervalos de siete días a las 18:00 h durante tres semanas, tiempo en que duró el experimento.

Parámetros evaluados

A los 24 días después de inicio de tratamientos se registraron en 20 plántulas seleccionadas aleatoriamente por tratamiento, la altura (cm), con un flexómetro desde la base del tallo hasta la terminación del ápice; el diámetro del tallo (mm), con un vernier a 0.5 cm de separación entre el tallo y la raíz; el ancho y largo (cm) de hoja con flexómetro, tomando como referencia la hoja media; índice de área foliar con el software ImageJ (2022), versión 1.53. A continuación, las plántulas con sus raíces fueron extraídas y se registró el número de raíces y la longitud de la raíz (cm) con un flexómetro; el volumen de la raíz se determinó con una probeta graduada (mL); el peso fresco de la raíz, tallo y hojas (g) con una báscula de precisión (HR-AZ/HR-A). Los órganos de las plántulas se almacenaron en bolsas de papel con perforaciones y se alojaron en una estufa de secado (NOVATECH HS60-ED®) con aire forzado a 75 °C hasta que las muestras se mantuvieron a peso constante. Enseguida se cuantificó el peso seco (g) de la raíz, tallo y hojas, con la báscula antes descrita.

Diseño experimental y análisis estadístico

Las plántulas con su respectivo tratamiento (fuentes de ZnO-NE) se distribuyeron en diseño completamente al azar con cinco tratamientos y 20 repeticiones; la unidad experimental consistió en un contenedor con una plántula, con un total de 100 unidades experimentales. La información recabada se almacenó en una hoja de cálculo de Excel 2010 y se aplicó un análisis de varianza y una

prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) con el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0 (SAS 2002).

RESULTADOS

Crecimiento de plántulas

La altura de plántula (AP) se estimuló con la aplicación de ZnO-NE y sulfato de zinc, ambas fuentes de Zn produjeron plántulas cuya altura osciló de 20.68 y 23.13 cm (Figura 1A), destacando la aplicación de ZnO-NE provenientes de precipitación directa con respecto al testigo (sin Zn), al superar su altura en 56.91%. Con respecto al diámetro del tallo (DT), el mayor valor (4.65 mm) en plántulas se registró cuando estas se trataron con ZnO-NE provenientes de la síntesis con microondas doméstico (Figura 1B), en comparación con la fuente comercial (T4) (23.01%) y sin Zn (12.69%), al producir plántulas con tallos más delgados. Los resultados también indicaron que las nanoestructuras influyeron significativamente en el tamaño de las hojas (Figura 2A y 2B) ($p \leq 0.05$). Las plántulas tratadas con ZnO-NE aumentaron el crecimiento de sus hojas, no obstante, la aspersión con Zn sintetizado mediante microondas profesional no mejoró las dimensiones de estas. Así mismo, el tratamiento con sulfato de zinc produjo plántulas con hojas de menor ancho (11.31%) y longitud (12.64%). En el mismo sentido, también en el índice de área foliar (AF) se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p \leq 0.05$), donde la respuesta de las plántulas fue superior con la aplicación de ZnO-NE obtenidas por microondas profesional (43.01%) y microondas doméstico (34.48%) con respecto al testigo sin Zn (Figura 2C), respectivamente (Tabla 1).

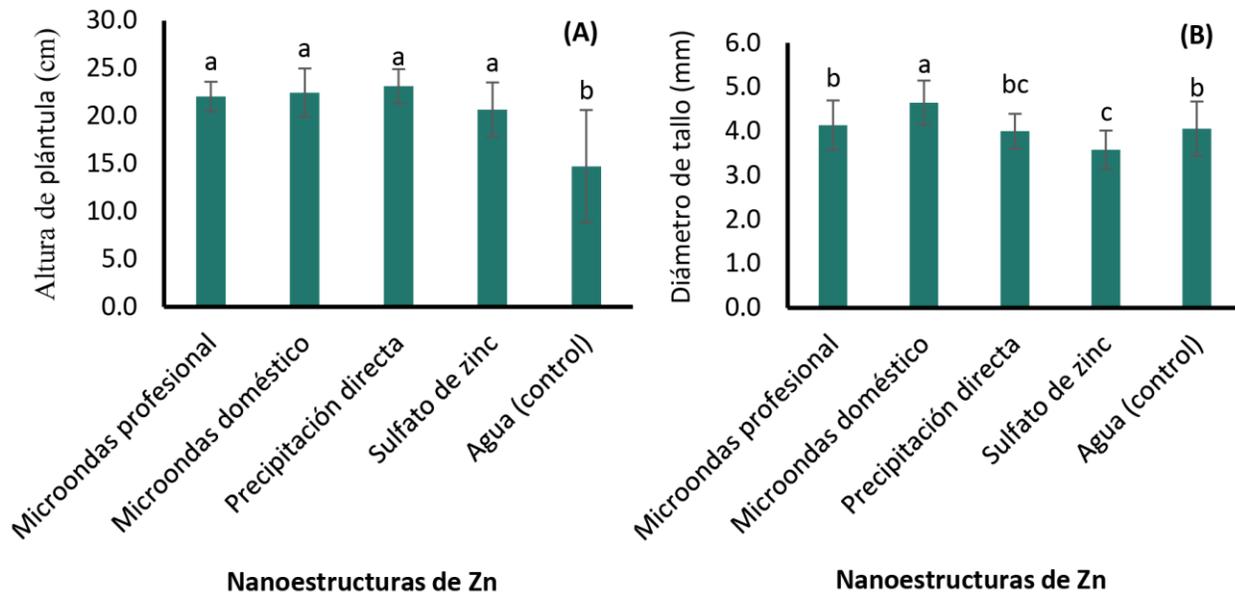


Figura 1. Efecto de la aspersión foliar con ZnO-NE y ZnSO₄ en la altura (A) y diámetro del tallo (B) de plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) en invernadero. Valores con letra distinta entre barras dentro del mismo parámetro no son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$).

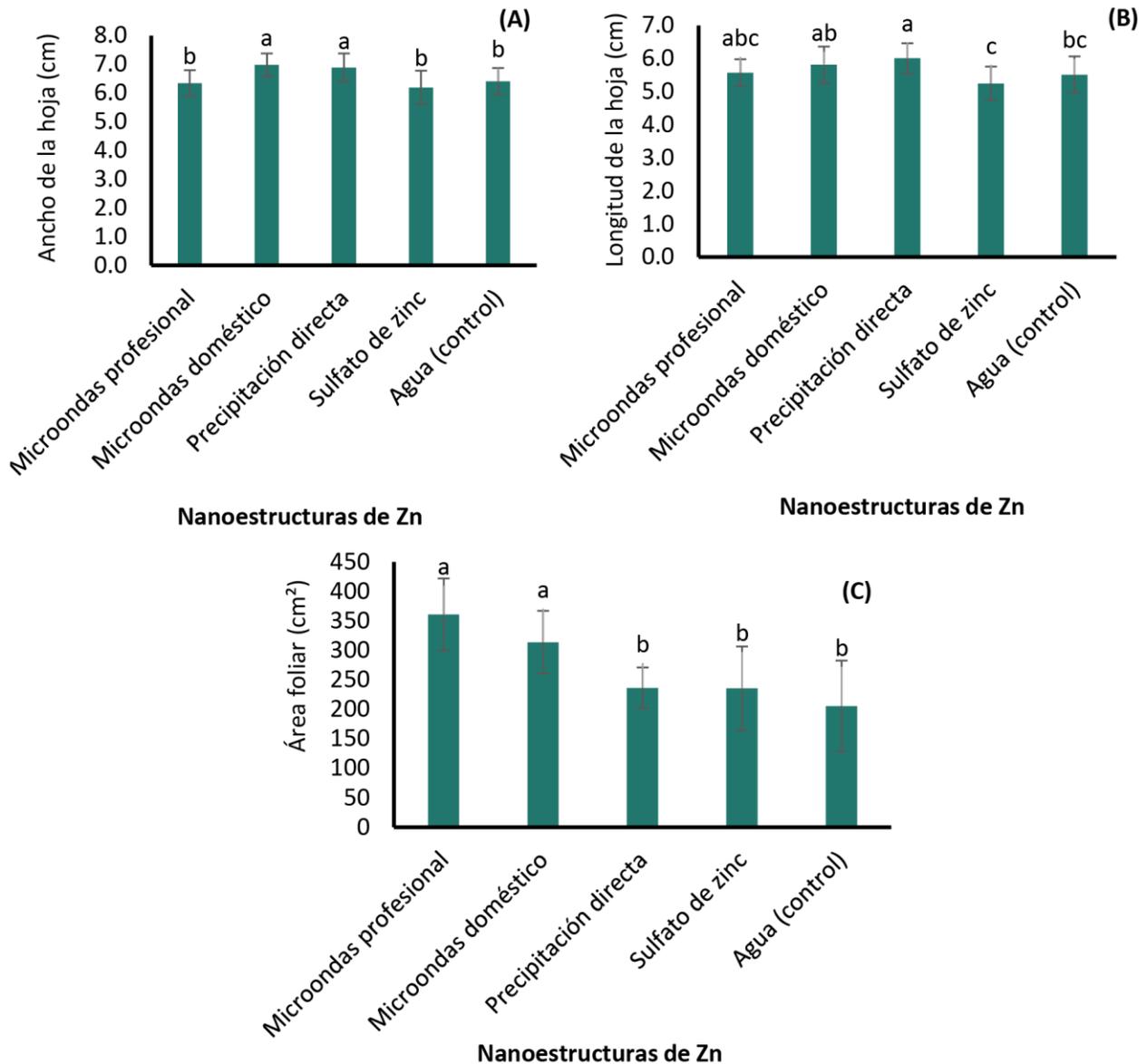


Figura 2. Efecto de la aspersión foliar con ZnO-NE y ZnSO₄ en el ancho (A) y longitud (B) de la hoja y área foliar (C) en plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) en invernadero. Valores con letra distinta entre columnas dentro del mismo parámetro no son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$).

Para el caso de la longitud de la raíz (LR), también hubo significancia estadística por el efecto de los tratamientos aplicados ($p \leq 0.05$), la aspersión foliar con ZnO-NE proveniente de los tres métodos de síntesis incrementaron la longitud de la raíz de las plántulas, en comparación con los testigos positivo (sulfato de zinc) y negativo (sin la aplicación de Zn) (Figura 3A). Con respecto al volumen de raíz (VR), el efecto por la aplicación de Zn proveniente de las diferentes fuentes también fue divergente. La aplicación de sulfato de zinc y ZnO-NE sintetizado por microondas doméstico y precipitación directa produjeron el mismo VR en las plántulas de pepino, pero, ambos tratamientos superaron el VR producido cuando las plántulas se trataron con Zn sintetizado por microondas profesional. En cambio, la aplicación de sulfato de zinc incrementó el VR en 17.71 y

23.97% con respecto a las plántulas sin suministro de Zn y con Zn sintetizado por microondas profesional (Figura 3B).

Tabla 1. Análisis de varianza de los parámetros de crecimiento en plántulas de pepino por la aspersión foliar de nanoestructuras con zinc.

F.V	AP (cm)	DT (mm)	AH (cm)	LH (cm)	LR (cm)	VR (mL)	NH	AF (cm ²)
Media	20.60	4.08	6.56	5.63	15.73	9.35	4.79	270.24
GL	76	76	76	76	76	76	76	76
CM	11.34	2.49	2.43	0.26	3.44	2.33	0.15	2978.60
SIG	**	**	**	**	**	**	NS	**
C.V. (%)	16.33	12.21	7.52	9.05	11.79	16.33	8.21	20.19

F.V: Fuente de variación; GL: Grados de libertad; SIG: Significancia; CM: Cuadrado medio de error. C.V: Coeficiente de variación; AP: Altura de la plántula; DT: Diámetro del tallo; AH: Ancho de la hoja; LH: Largo de la hoja; LR: Longitud de la raíz; VR: Volumen de la raíz; NH: Número de hojas; AF: Área foliar; **: Altamente significativo ($p \leq 0.01$); Significativo ($p \leq 0.05$); NS: No significativo ($p \geq 0.05$).

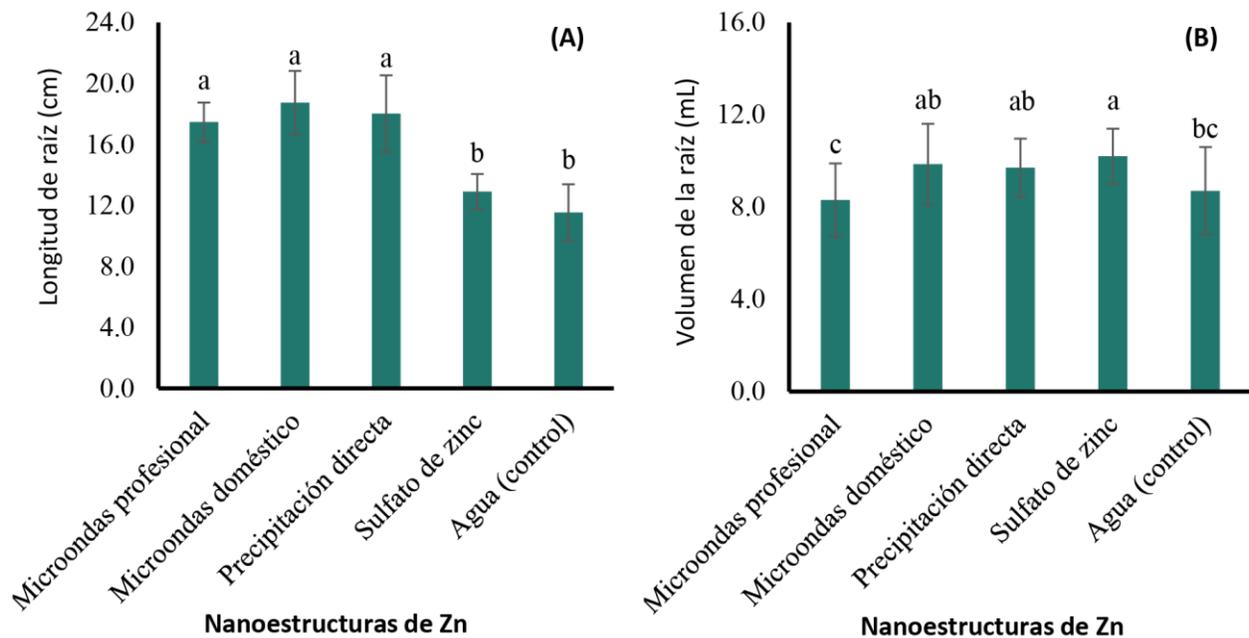


Figura 3. Efecto de la aspersión foliar con ZnO-NE y ZnSO₄ en la longitud (A) y volumen (B) de la raíz de plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) crecidas en invernadero. Valores con letra distinta dentro del mismo parámetro no son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Producción de biomasa fresca y seca

El peso fresco de la raíz, tallo y hojas también mostraron diferencias significativas (Tabla 2). Por un lado, la aplicación ZnO-NE elaborado por microondas doméstico aumentó el peso fresco en la raíz en 21.18 y 20.90% con respecto al control negativo (sin Zn) y microondas profesional, respectivamente (Figura 4A), mientras que las fuentes de Zn provenientes de microondas doméstico, precipitación directa y fertilizante comercial tuvieron un efecto similar en la

acumulación de biomasa fresca de hoja. En cambio, el peso fresco del tallo no presentó diferencias entre los tratamientos con ZnO-NE y el sulfato de zinc (testigo positivo) (Figura 4B), no obstante, se encontró que ambos mejoraron el peso fresco del tallo con respecto al control negativo, donde la mayor diferencia (23.4%) se tuvo con la síntesis de ZnO-NE por precipitación directa con respecto al control. En contraste, el peso fresco de las hojas tuvo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos con ZnO-NE, así como entre los tratamientos con ZnO-NE y los testigos, de manera que las plántulas tratadas con Zn proveniente de precipitación directa registraron el mayor peso (6.50 g/plántula) fresco de hojas (Figura 4C), superando en 20.77 y 25.38% el peso fresco de hojas alcanzado en los tratamientos con sulfato de Zn (control positivo) y sin Zn (control negativo); por el contrario, la respuesta en la acumulación de biomasa fresca en las hojas de las plántulas de pepino, tratadas con ZnO-NE del microondas profesional y doméstico y el fertilizante comercial fue similar, con valores de 5.15 a 5.79 g/plántula. Sin embargo, el peso fresco de las hojas fue mayor con ZnO-NE de microondas doméstico en 16.23% que el testigo negativo (sin aplicación de Zn).

Tabla 2. Análisis de varianza de la biomasa en plántulas de pepino en respuesta a la aspersion foliar de nanoestructuras con Zn.

FV	PFR	PFT	PFH	PSR	PST	PSH
g						
Media	3.16	5.64	5.52	0.22	0.36	0.74
GL	76	76	76	76	76	76
CM	0.52	0.84	0.58	0.01	0.01	0.15
SIG	**	**	**	NS	**	**
C.V. (%)	23.00	16.32	13.82	31.94	19.86	16.82

F.V: Fuente de variación; GL: Grados de libertad; SIG: Significancia; CM: Cuadrado medio de error. C.V: Coeficiente de variación; PFR: Peso fresco de la raíz; PFT; Peso fresco del tallo; PFH: Peso fresco de hojas; PSR: Peso seco de la raíz; PST: Peso seco del tallo; PSH: Peso seco de las hojas; **: Altamente significativo ($p \leq 0.01$); Significativo ($p \leq 0.05$); NS: No significativo ($p \geq 0.05$).

De acuerdo con los resultados obtenidos para el peso seco de raíz, no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 2). Sin embargo, el peso seco del tallo aumentó con las aplicaciones de las nanoestructuras de Zn, con valores en el rango de 37.0 y 41.0 g (Figura 5A); las nanoestructuras de Zn provenientes de microondas profesional y precipitación directa superaron en 51.2% el peso seco del tallo de las plántulas sin la aplicación de Zn, mientras que la aplicación de ZnO-NE de microondas doméstico y fertilizante comercial fueron superiores en 46.3 y 41.4%, respectivamente. En contraste, hubo un efecto diferente en el peso seco de las hojas (PSH); donde las plántulas tratadas con las fuentes nanoestructuradas de Zn aumentaron el peso seco de estas, destacando el ZnO-NE proveniente de precipitación directa (0.85 g) en comparación con las ZnO-NE obtenidas por microondas profesional, sulfato de zinc y sin Zn (Figura 5B), al superar sus promedios en 14.1, 18.8 y 29.4%, respectivamente. En tanto que, la aspersion con ZnO-NE de microondas doméstico también aumentó en 25.0% la acumulación de biomasa seca de las hojas con respecto al testigo negativo.

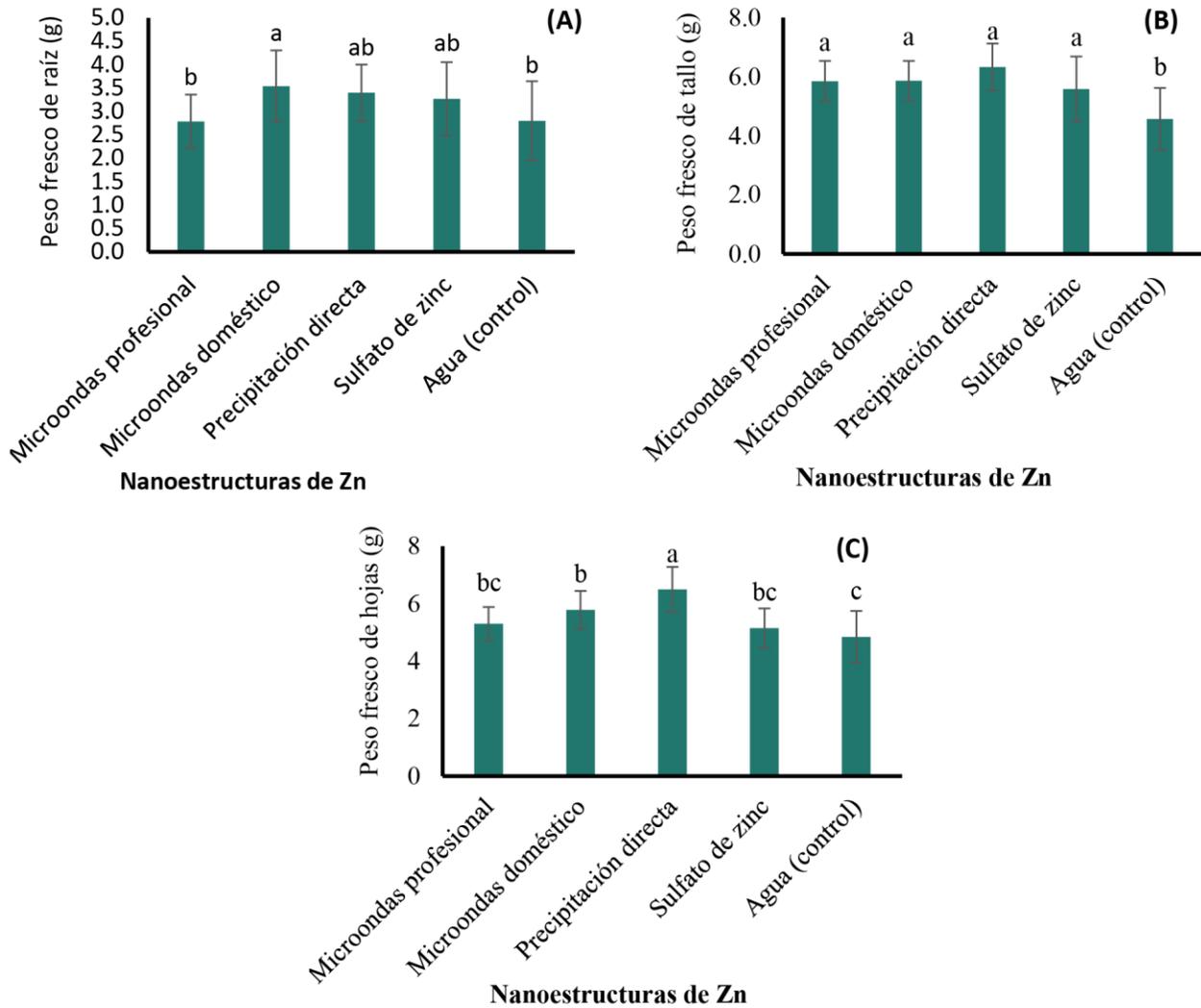


Figura 4. Producción de biomasa fresca de raíz (A), tallo (B) y hojas (C) en plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) por la aplicación foliar de ZnO-NE y ZnSO₄ en invernadero. Valores con letra distinta entre columnas no son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$).

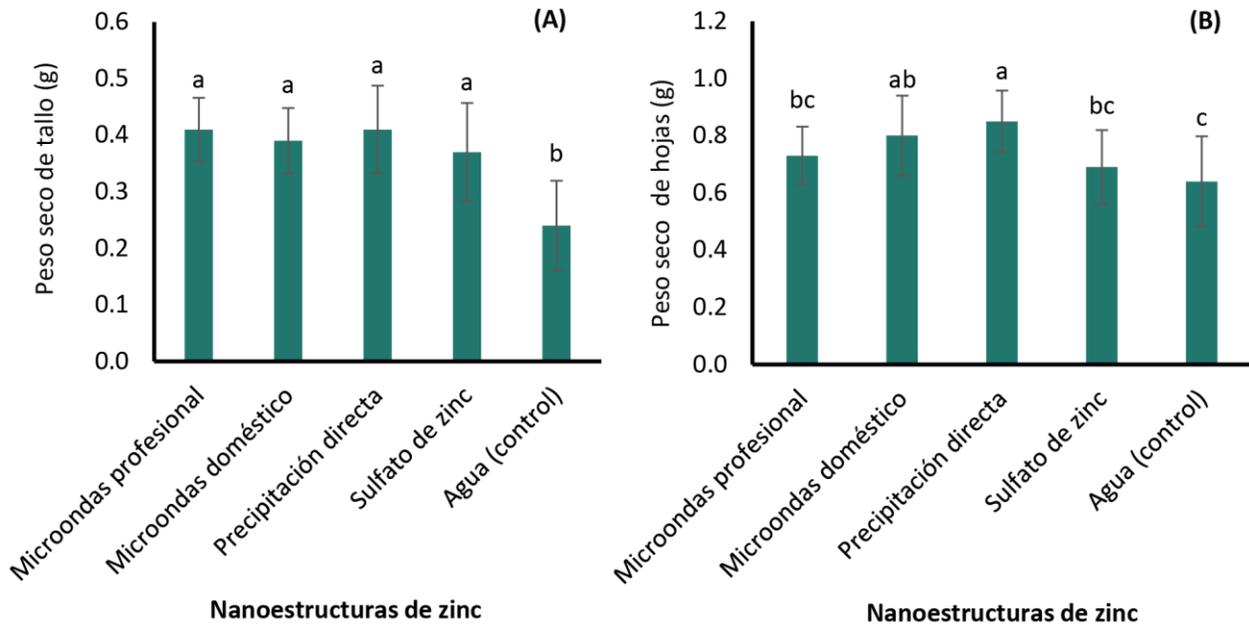


Figura 5. Producción de biomasa en peso seco del tallo (A) y hojas (B) en plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) por la aplicación foliar de ZnO-NE y ZnSO₄ en invernadero. Valores con letra distinta entre columnas no son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$).

DISCUSIÓN

Crecimiento de plántulas

La altura de la planta se relaciona con la funcionalidad del Zn en el metabolismo de la misma, este elemento activa el metabolismo de ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos al integrarse a las células y su asimilación puede ser favorecida por las diferentes fuentes de aplicación (Palmer y Guerinot 2009). Adicionalmente, se menciona que la aplicación de 150 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de nanopartículas de Se y 100 mg L^{-1} de ZnO en semillas de *Brassica napus* aumentó la concentración de ácido giberélico, encargado de promover la elongación celular (El-Badri *et al.* 2021), lo que se traduce en el alargamiento del tallo y por ende mayor altura de planta. Con respecto al diámetro del tallo se atribuye a que la fuente de Zn proveniente de la síntesis de microondas doméstico tuvo mejor uniformidad de tamaño de partícula, lo que facilitó su absorción al interior de la plántula y por ende a nivel celular, donde promovieron la producción de auxinas, encargadas de la división y elongación celular responsables del crecimiento del tallo (Karakeçili *et al.* 2019). Lo anterior se debe a que las ZnO-NE son de mayor efectividad y su liberación lenta mejora las propiedades fisiológicas de las plantas, reflejándose en un mayor crecimiento de las mismas, incrementando el diámetro y la altura de plántula (Kolenčík *et al.* 2019). Al respecto, se ha encontrado que la aplicación de 15 mL L^{-1} de nanopartículas de Ag incrementaron el diámetro de los brotes en *Prunus pérsica* (Mosa *et al.* 2021). También se reportó que el suministro de 50 mg L^{-1} de nanopartículas de ZnO aumentó el diámetro del tallo de *Oryza sativa* (Li *et al.* 2021). Sin embargo, el aporte de 50 y 100 mg L^{-1} de nanopartículas de ZnO en *Capsicum annuum* no afectaron el crecimiento de esta

especie (Magdaleno-García *et al.* 2023), por lo que la respuesta será diferente en función de la especie vegetal y las nanopartículas empleadas (Alkhatib *et al.* 2021).

En lo que refiere al tamaño de las hojas, el efecto positivo en las plantas por la aplicación de ZnO-NE con respecto al Zn comercial también se ha reportado en *Coffea arabica* (Rossi *et al.* 2019). Con respecto al AF, la respuesta pudo estar influenciada por las características de las ZnO-NE que modificaron el tamaño (longitud y ancho) de la hoja y, por consiguiente, el área foliar. En un estudio similar se observó que la aplicación de nanopartículas de ZnO en una concentración de 50 mg L⁻¹ aumentaron el crecimiento de brotes y hojas en *Triticum aestivum* (Awasthi *et al.* 2017). Así mismo, se reportó que el suministro de 50 mg L⁻¹ de nanopartículas de ZnO + Ag promovió el área foliar (30.3%) de *Capsicum annuum*, esta respuesta se atribuye al Zn y su influencia en la reactividad del ácido indolacético, el cual actúa como fitoestimulante hormonal (Méndez-Argüello *et al.* 2016).

También las raíces de las plántulas tuvieron un comportamiento diferente por la aspersión de las ZnO-NE. La respuesta en la longitud de raíz se atribuye a que el Zn participa en la síntesis de ácido indolacético (AIA) encargado de la división celular, lo que aumenta el crecimiento de los diferentes órganos de la planta (Álvarez *et al.* 2019), entre ellos la raíz. Al respecto, algunos reportes indican que el efecto positivo de los fertilizantes nanoestructurados en la longitud de la raíz aumenta según la concentración del elemento implicado en la nanoestructura, como se ha observado con TiO₂ nanoestructurado en *Arabidopsis*, cuya aplicación en bajas concentraciones (100 y 250 mg L⁻¹) no influyó en la longitud de la raíz, en cambio, a concentraciones altas (500 y 1000 mg L⁻¹) la incrementaron (Wei *et al.* 2020). Así mismo, el volumen de la raíz se modificó por los tratamientos aplicados, dicha respuesta reafirma que la composición, tamaño, forma y condiciones físico-químicas de las fuentes fertilizantes provoca diferentes efectos en el crecimiento de plántulas (Bandeppa *et al.* 2019), efectos que incluso pueden ser desfavorables para su crecimiento. En este sentido, Vargas-Martínez *et al.* (2023) encontraron que la aplicación de Zn mediante nanoestructuras de ZnO (30 mg L⁻¹) en *Solanum lycopersicum* disminuyó el volumen de la raíz en esta especie.

Producción de biomasa fresca y seca

De acuerdo con los resultados de peso fresco del tallo, se encontraron resultados similares con la aplicación de 50 mg L⁻¹ de nanoestructuras de ZnO, al aumentar la biomasa fresca en *Triticum aestivum* (Awasthi *et al.* 2017). Por otro lado, la respuesta del PFH se atribuye a la interacción que existe entre las hojas (dimensiones de los tricomas y superficie de las hojas) y al tamaño y estructura de la fuente de Zn (Kolenčík *et al.* 2020); este comportamiento también se observó con la aplicación foliar de Fe como nanofertilizante, cuya adición provocó una distribución uniforme dentro de la planta y una asimilación más rápida y por consecuencia mayor peso fresco (Bastani *et al.* 2018). Del mismo modo, se reportó que la aplicación de nanoestructuras de ZnO y SiO₂ tuvo mayor efectividad en las hojas de *Solanum lycopersicum* (Gao *et al.* 2021). Esta tendencia también se observó en *Dracocephalum moldavica* al incrementarse la producción de biomasa con la aplicación de 160 mg L⁻¹ de ZnO-NE (Nekoukhou *et al.* 2022); por tanto, uno de los parámetros importantes para medir la eficiencia del Zn aplicado en sus diferentes formas es la acumulación de biomasa (Ramírez *et al.* 2018).

El incremento de los parámetros de peso seco del tallo y de hoja descritos anteriormente se atribuye al tamaño nanométrico de las ZnO-NE aplicadas, ya que tienen la característica de penetrar con mayor facilidad a través de los estomas de las hojas y llegar a otros tejidos vasculares y posteriormente ser translocados a otros órganos de la planta (Rossi *et al.* 2019). Estudios similares reportaron que la aplicación de 10 mg L^{-1} de nanoestructuras con ZnO produjeron mayor peso seco de raíces y hojas en *Curcuma longa* (Khattab *et al.* 2023). En el mismo contexto, la aplicación de nanoestructuras de KH_2PO_4 al 50% de la concentración de fósforo (P) también mejoró la biomasa seca de los brotes de *Oryza sativa* (Miranda-Villagómez *et al.* 2019), mientras que en dicha especie el aporte de nanoestructuras de Zn en concentraciones de 0.4, 1.0 y $2,0 \text{ g L}^{-1}$ incrementaron la materia seca (Alvarez *et al.* 2019).

CONCLUSIONES

La aspersión foliar de nanoestructuras con zinc en plántulas de pepino mejoró significativamente los parámetros de crecimiento: altura (56.91%) y diámetro (23.01%) de plántula, longitud (12.64%) y ancho (11.31%) de la hoja y, área foliar (43.01%), además de la longitud (32.37%) y el volumen (11.22%) de la raíz, principalmente cuando se usaron ZnO-NE obtenidas por microondas doméstico y precipitación directa. La aplicación foliar con ZnO-NE elaboradas por precipitación directa también aumentó la producción de biomasa fresca (20.00%) y seca (33.33%) de las hojas, mientras que la aspersión con ZnO-NE de microondas doméstico incrementó hasta en 20.00% la biomasa fresca de raíz; las fuentes de Zn nanoestructurado y comercial incrementaron el peso fresco (22.61%) y seco (39.24%) del tallo. Por lo anterior, la aspersión foliar con nanoestructuras de zinc es una fuente de fertilización alterna con zinc para mejorar el crecimiento y producción de biomasa en plántulas de pepino cultivadas en invernadero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), la beca otorgada a la estudiante Arelis Quirino García para la realización de esta investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

Ahmed F, Gill SS, Rao TN, Arshi N, Kumar S, Prasanthi Y (2023) Nanofertilizers: As smart nanoformulations in the agriculture industry. In: Chauhan NS, Gil SS (eds) The impact of nanoparticles on agriculture

- and soil. Academic Press, Elsevier. London, United Kingdom. pp: 285-299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91703-2.00018-X>.
- Alkhatib R, Alkhatib B, Abdo N (2021) Effect of Fe₃O₄ nanoparticles on seed germination in tobacco. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 53568-53577. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14541-x>.
- Alvarez RCF, Prado RM, Souza-Júnior JP, Oliveira RLL, Felisberto G, Deus ACF, Cruz FJR (2019) Effects of foliar spraying with new zinc sources on rice seed enrichment, nutrition, and productivity. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil & Plant Science* 69: 511-15. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1612939>
- Awasthi A, Bansal S, Jangir LK, Awasthi G, Awasthi KK, Awasthi K (2017) Effect of ZnO nanoparticles on germination of *Triticum aestivum* seeds. *Macromolecular Symposia* 376: 1700043. <https://doi.org/10.1002/masy.201700043>.
- Bandeppa RG, Latha PC, Manasa V, Chavan S (2019) Soil ecological pros and cons of nanomaterials: Impact on microorganisms and soil health. In: Panpatte D, Jhala Y (ed) *Nanotechnology for Agriculture*. Springer Nature. Singapur. pp: 145-159. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9370-0_10.
- Bastani S, Hajiboland R, Khatamian M, Saket-Oskoui M (2018) Nano iron (Fe) complex is an effective source of Fe for tobacco plants grown under low Fe supply. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18: 524-541. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-95162018005001602>.
- Chun S, Manikandan M, Judy G (2020) Nanotoxic impacts on staple food crops: There's plenty of room for the unpredictable. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 60: 3725-36. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1707158>
- Eisvand HR, Kamaei H, Nazarian F (2018) Chlorophyll fluorescence, yield and yield components of bread wheat affected by phosphate bio-fertilizer, zinc and boron under late-season heat stress. *Photosynthetica* 56: 1287-96. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0829-1>.
- El-Badri AM, Batool M, Wang C, Hashem AM, Tabl KM, Nishawy E, Wang B (2021) Selenium and zinc oxide nanoparticles modulate the molecular and morpho-physiological processes during seed germination of *Brassica napus* under salt stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 225: 112695. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112695>.
- Gao X, Kundu A, Bueno V, Rahim AA, Ghoshal S (2021) Uptake and translocation of mesoporous SiO₂-Coated ZnO nanoparticles to *Solanum lycopersicum* following foliar application. *Environmental Science & Technology* 55: 13551-60. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00447>.
- Galindo-Guzmán AP, Fortis-Hernández M, De La Rosa-Reta CV, Zermeño-González H, Galindo-Guzmán L (2022) Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13: 299-308. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284>.
- ImageJ (2022) Image Processing and Analysis in Java. Laboratory for Optical and Computational Instrumentation, University of Wisconsin.
- Karakeçili A, Korpıyev S, Dumanoğlu H, Alizadeh S (2019) Synthesis of indole-3-acetic acid and indole-3-butyric acid loaded zinc oxide nanoparticles: Effects on rhizogenesis. *Journal of Biotechnology* 303: 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.07.004>.
- Khattab S, Alkuwayti MA, Yap YK, Meligy AMA, Bani-Ismail M, El Sherif F (2023) Foliar spraying of ZnO nanoparticles on *Curcuma longa* had increased growth, yield, expression of curcuminoid synthesis genes, and curcuminoid accumulation. *Horticulturae* 9: 355. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030355>.
- Kolenčík M, Ernst D, Urík M, Šebesta M, Dobročka E, Illa R, Kanike R, Quian Y, Feng H, Orlová D, Kratošová G (2019) Effect of foliar spray application of zinc oxide nanoparticles on quantitative, nutritional, and

- physiological parameters of foxtail millet (*Setaria italica* L.) under field conditions. *Nanomaterials* 9: 1559. <https://doi.org/10.3390/nano9111559>.
- Kolenčík M, Ernst D, Urík M, Ďurišová L, Bujdoš M, Šebesta M, Dobročka E, Kšiňan S, Illa R, Quian Y, Feng H, Černý I, Holišová V, Kratošová G (2020) Foliar application of low concentrations of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles to the common sunflower under field conditions. *Nanomaterials* 10: 1619. <https://doi.org/10.3390/nano10081619>.
- Li Y, Liang L, Li W, Ashraf U, Ma L, Tang X, Pan S, Tian H, Mo Z (2021) ZnO nanoparticle-based seed priming modulates early growth and enhances physio-biochemical and metabolic profiles of fragrant rice against cadmium toxicity. *Journal of Nanobiotechnology* 19: 1-19. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00820-9>.
- Lian J, Wu J, Xiong H, Zeb A, Yang T, Su X, Su L, Liu W (2020) Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Journal of Hazardous Materials* 385: 121620. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620>.
- Magdaleno-García G, Juárez-Maldonado A, Betancourt-Galindo R, González-Morales S, Sánchez-Vega M, Cabrera-De la Fuente M, Méndez-López A (2023) Aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y cloruro de sodio en chile pimienta. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10: 1-17. <https://doi.org/10.19136/era.a10nNEIII.3679>.
- Martínez-Alonso C, Quirino-García A, Salazar R, Maldonado-Astudillo YI (2022) Síntesis de óxido de zinc nanoestructurado y su efecto en la germinación de semillas de maíz (*Zea mays*). *Acta Agrícola y Pecuaria* 8: 1-11. <https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081018>.
- Mehmood A (2018) Brief overview of the application of silver nanoparticles to improve growth of crop plants. *IET Nanobiotechnology* 12: 701-705. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2017.0273>
- Méndez-Argüello B, Vera-Reyes I, Mendoza-Mendoza E, García-Cerda LA, Puente-Urbina BA, Lira-Saldívar RH (2016) Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia* 8: 140-156.
- Miranda-Villagómez E, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Sandoval-Villa M, Sánchez-García P, Aguilar-Méndez MÁ (2019) Nanophosphorus fertilizer stimulates growth and photosynthetic activity and improves P status in rice. *Journal of Nanomaterials* 2019: 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/5368027>.
- Mosa WFA, El-Shehawi AM, Mackled MI, Salem MZM, Ghareeb RY, Hafez EE, Behiry SI, Abdelsalam NR (2021) Productivity performance of peach trees, insecticidal and antibacterial bioactivities of leaf extracts as affected by nanofertilizers foliar application. *Scientific Reports* 11:10205. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89885-y>.
- Nekoukhou M, Fallah S, Abbasi-Surki A, Pokhrel LR, Rostamnejadi A (2022) Improved efficacy of foliar application of zinc oxide nanoparticles on zinc biofortification, primary productivity and secondary metabolite production in dragonhead. *Journal of Cleaner Production* 379:134803. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134803>.
- Palmer CM, Guerinot ML (2009) Facing the challenges of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Nature Chemical Biology* 5: 333-40. <https://doi.org/10.1038/nchembio.166>.
- Prasad R, Bagde US, Varma A (2012) An overview of intellectual property rights in relation to agricultural biotechnology. *African Journal of Biotechnology* 11: 13476-13752. <https://doi.org/10.5897/AJB12.262>.
- Quirino-García A, Martínez-Alonso C, Sabino LJE, Vázquez VM, Espinosa RM, Maldonado PMA (2024) Synthesis of nano-zinc oxide by conventional chemical precipitation vs microwaves and its effect on the germination of cucumber (*Cucumis sativus*) seeds. *Results in Chemistry* 10: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101720>.
- Ramírez D, Alvarado A, Ávila C, Camacho ME, Fernández J, Murillo R, Salazar L, Sandi CL (2018) Dinámica de la concentración y acumulación de nutrimentos en los componentes de la biomasa aérea de *Cedrela odorata* L. en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 42: 21-48. <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32196>.

- Rivera-Guettierrez RG, Preciado-Rangel P, Fortiz-Hernández M, Betancourt-Galindo R, Yescas-Coronado P, Orozco-Vidal JA (2021) Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12: 791-803. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2987>.
- 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: 160-66. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.005>.
- Sanzari I, Leone A, Ambrosone A (2019) Nanotechnology in plant science: To make a long story short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 7: 120. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00120>.
- SAS (2002) SAS/STAT. User's Guide, versión 9.0. Statistical Analysis System Institute. Cary, N. C. USA. 4424p.
- Siddiqui MH, Al-Whaibi MH, Firoz M, Al-Khaishany MY (2015) Role of nanoparticles in plants. In: Siddiqui MH, Al-Whaibi MH, Mohammad F (eds) *Nanotechnology and plant sciences, nanoparticles and their impact on plants*. pp: 19-35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0_2.
- Singh S, Husen A (2020) Behavior of agricultural crops in relation to nanomaterials under adverse environmental conditions. In: Husen A, Jawwaid M (eds) *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications*. Elsevier 2020: 219-256. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817852-2.00009-3>.
- Soto P, Gaete H, Hidalgo ME (2011) Assessment of catalase activity, lipid peroxidation, chlorophyll a, and growth rate in the freshwater green algae *Pseudokirchneriella subcapitata* exposed to copper and zinc. *Latin American Journal of Aquatic Research* 39: 280-285. <https://doi.org/10.3856/vol39-issue2-fulltext-9>.
- Steiner AA (1984) The universal nutrient solution. In: *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*. ISOSC. Wageningen, The Netherlands. pp: 633-649.
- Trejo-Téllez LI, Rodríguez-Mendoza MN, Gómez-Merino F, Alcántar-González G (2016) Fertilización foliar. In: Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino F (eds) *Nutrición de cultivos*. Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. pp: 283-311.
- Tymoszuk A, Wojnarowicz J (2020) Zinc oxide and zinc oxide nanoparticles impact on *In vitro* germination and seedling growth in *Allium Cepa* L. *Materials* 13: 2784. <https://doi.org/10.3390/ma13122784>.
- Umair HM, Aamer M, Umer-Chattha M, Haiying T, Shahzad B, Barbanti L (2020) The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture* 10: 396. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090396>.
- Vargas-Martínez G, Betancourt-Galindo R, Juárez-Maldonado A, Sánchez-Vega M, Sandoval-Rangel A, Méndez-López A (2023) Impacto de NPsZnO y microorganismos rizosféricos en el crecimiento y biomasa del tomate. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 26: 1-12. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4332>.
- Vera-Reyes I, Vázquez-Núñez E, Lira-Saldivar RH, Méndez-Argüello B (2018) Effects of nanoparticles on germination, growth, and plant crop development. In: López-Valdez F, Fernández-Luqueño F (eds) *Agricultural nanobiotechnology*. Springer Nature, Switzerland. pp: 77-110. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96719-6_5.
- Wang P, Lombi E, Zhao FG, Kopittke MP (2016) Nanotechnology: A new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science* 21: 699-712. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.04.005>.
- Wei J, Zou Y, Li P, Yuan X (2020) Titanium dioxide nanoparticles promote root growth by interfering with auxin pathways in *Arabidopsis thaliana*. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 89: 883-891. <https://doi.org/10.32604/phyton.2020.010973>.
- Zhang X, Li W, Wu D, Deng Y, Shao J, Chen L, Fang D (2018) Size and shape dependent melting temperature of metallic nanomaterials. *Journal of Physics: Condensed Matter* 31: 075701. <https://doi.org/10.1088/1361-648x/aaf54b>.