

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Impacto de Nanocompuestos de Zinc en la Producción de Rábano (*Raphanus sativus* L.)

Por:

KEVIN IMANOL LLANES GARCÍA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Febrero, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Impacto de Nanocompuestos de Zinc en la Producción de Rábano (*Raphanus sativus* L.)

Por:

KEVIN IMANOL LLANES GARCÍA

Tesis

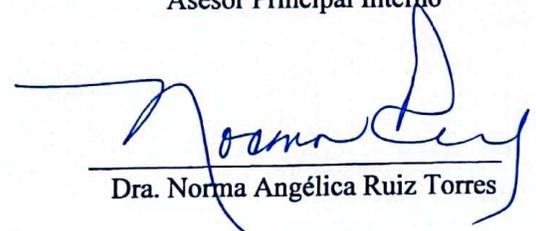
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

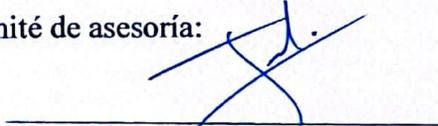
Aprobada por el comité de asesoría:


M.C. Eitelberto Cortez Quevedo

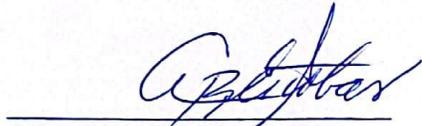
Asesor Principal Interno


Dra. Norma Angélica Ruiz Torres

Coasesor


Dr. Josué Israel García López

Asesor Principal Externo


M.C. Alejandra Escobar Sánchez

Vocal suplente

Saltillo, Coahuila, México
Febrero, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Impacto de Nanocompuestos de Zinc en la Producción de Rábano (*Raphanus sativus* L.)

Por:

KEVIN IMANOL LLANES GARCIA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

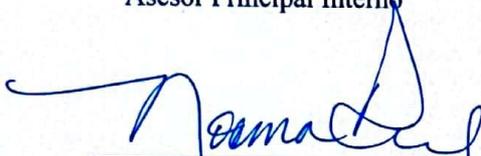
Aprobada por el Jurado Examinador:



M.C. Etelberto Quevedo Cortez
Asesor Principal Interno



Dr. Josué Israel García López
Asesor Principal Externo



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres



M.C. Alejandra Escobar Sánchez
Coasesor



M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México
Febrero, 2025

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reforma de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Kevin Imanol Llanes García

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por iluminar siempre mi camino y brindarme la sabiduría necesaria para concluir una etapa más en mi vida, le ofrezco mi más sincero agradecimiento.

A mi Alma Terra Mater

A mi gloriosa Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por permitirme formarme como profesional dentro de sus instalaciones y de igual manera que hizo posible el desarrollo de mi investigación.

A mi asesor

Dr. Josué Israel García López

Por todo su gran apoyo brindado durante todo el proceso de mi investigación de tesis, ya que siempre estuvo dispuesto a ayudar y a aconsejar en cada paso de mi investigación, por su dedicación y paciencia en el desarrollo de mi proyecto de tesis.

DEDICATORIA

A mis padres

Dedico de todo corazón esta tesis a mi madre María de Jesús García Blanco y a mi padre Hilario Llanes Castro puesto que sin ellos nada de esto lo hubiese lograda sin su gran apoyo incondicional que me brindaron durante toda mi vida, por siempre darme todo para salir adelante ya que todo lo que soy es gracias a ellos.

A mis hermanos

Fanny, Pablo, Alondra, Perla, Zaira a ustedes mis hermanos que nunca me dejaron solo y de alguna u otra manera estuvieron para mí para que yo saliera adelante durante todo este proceso de mi carrera.

A mi novia

Nancy González Rodríguez a ti mi compañera de toda la vida por estar conmigo siempre y nunca dejarme solo, por darme ánimos y no dejar que me rindiera nunca, por eso y más te agradezco por estar siempre para mí.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis	2
1.2 Objetivo	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Importancia del Zn en las plantas	3
2.2 Efecto de nanocompuestos de Zn en cultivos	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1 Material genético	8
3.2 Compuestos de Zn	8
3.3 Recolección de suelo	8
3.4 Condiciones de crecimiento de las plantas	9
3.5 Aplicación de tratamientos	9
3.6 Cosecha de las plantas	10
3.7 Análisis estadístico	10
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
4.1 Componentes agronómicos	11
4.2 Peso de hoja	12
4.3 Número de hojas y área foliar	12
4.4 Peso de bulbo	13
5. CONCLUSIONES	16
6. REFERENCIAS	17

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para algunos parámetros agronómicos del cultivo de rábano cultivado en suelo modificado con compuestos de Zn.....	11
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Entrada directa e indirecta de nanomateriales de Zn en el ecosistema del suelo. .. 5
- Figura 2. Aplicaciones futuras de nanomateriales en los sistemas de producción agrícola. .. 7
- Figura 3. Peso de hoja en plantas de rábano cultivadas en suelo calcáreo modificado con ZnSO₄, NPsZnO y GNPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn kg⁻¹ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05). 12
- Figura 4. Número de hojas (a) y área foliar (b) de plantas en plantas de rábano cultivadas en suelo calcáreo modificado con ZnSO₄, NPsZnO y GNPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn kg⁻¹ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05). 13

RESUMEN

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial para las plantas, debido que participa en funciones fisiológicas y bioquímicas, por lo que un suministro inadecuado afectaría directamente el rendimiento. El objetivo de este estudio fue determinar el impacto de diferentes compuestos de Zn (nanopartículas orgánicas, metálicas y una sal) a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn Kg⁻¹ de suelo sobre las respuestas agronómicas del cultivo de rábano cultivado en invernadero. Los resultados indican el peso de la hoja se incrementó en promedio en 47% con la aplicación de ZnSO₄ a 10 mg Zn Kg⁻¹ de suelo y con NPs ZnO a 25 mg de Zn Kg⁻¹ de suelo. Para el área foliar, todos los compuestos a concentraciones de 15 y 25 mg de Zn Kg⁻¹ de suelo presentaron incrementos promedio del 29.8% en comparación con el control. En cuanto al peso de bulbo, el ZnSO₄ a 10 y 15 mg Zn Kg⁻¹ de suelo generó un incremento del 36.6% en comparación con el control. Los resultados de este estudio permiten verificar que los fertilizantes de Zn aplicados al suelo modificaron las respuestas agronómicas del cultivo en estudio, sin embargo, no se presentó una tendencia en cuanto a las concentraciones y/o tipo de compuesto.

Palabras clave: nanofertilizantes, parámetros agronómicos, área foliar.

1. INTRODUCCIÓN

El Zn es un micronutriente esencial para las plantas, ya que participa en funciones fisiológicas y como cofactor de enzimas entre las que destacan la anhidrasa carbónica, la carboxipeptidasa y la superóxido dismutasa (Al Jabri *et al.*, 2022). En consecuencia, las plantas cultivadas en suelos deficientes de Zn pueden retrasar su crecimiento, disminuir el número de macollos, con hojas más pequeñas y clorosis, lo que afecta directamente el crecimiento (Rizwan *et al.*, 2017). Desafortunadamente, las deficiencias de Zn son consideradas como un problema grave en todo el mundo, debido a la cantidad limitada de este microelemento disponible en los suelos para su absorción por las plantas (Hamzah *et al.*, 2022).

Por lo que explorar nuevas alternativas para la nutrición de cultivos con Zn podría ayudar las a mejorar las deficiencias de este micro elementó y su acumulación en las plantas. Como una tecnología emergente, la nanotecnología permite la aplicación de materiales a nanoescala, los cuales tienen propiedades físicas, químicas y magnéticas diferentes a los materiales convencionales (Semida *et al.*, 2021). Debido a las características de los nanomateriales, su aplicación en la agricultura ha aumentado en los últimos años y se considera una herramienta valiosa para alcanzar el objetivo de la producción sostenible de alimentos en todo el mundo (Al Jabri *et al.*, 2022). Se ha documentado que la aplicación de nanofertilizantes a base de Zn en sistemas de producción agrícolas prolongados mejoran el crecimiento de las plantas, lo que es atribuido a la liberación lenta del ingrediente activo, lo que a su vez permite un menor impacto ambiental (García-Reyes *et al.*, 2024).

Por ejemplo, el rendimiento en plantas de trigo desarrolladas a partir de semillas tratadas con nanopartículas metálicas aumentó en promedio un 20-25% (Polishchuk *et al.*, 2015). La ventaja a citar, es que los nanofertilizantes pueden aplicarse en dosis extremadamente bajas, por ejemplo; los fertilizantes ordinarios requerirían de 50 kg para un árbol adulto; sin embargo, los fertilizantes orgánicos solo requieren 40 kg (van Ommen *et al.*, 2012). Debido

a la importancia del uso de nanomateriales de Zn en la producción de cultivos, este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de usar suelo modificado con compuestos de Zn en parámetros agronómicos del cultivo de rábano en invernadero.

1.1 Hipótesis

H₁: El suelo modificado con compuestos de Zn a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn/kg de suelo modificará las respuestas agronómicas del cultivo de rábano.

H₀: El suelo modificado con compuestos de Zn a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn/kg suelo no impactará sobre las respuestas agronómicas del cultivo de rábano.

1.2 Objetivo

Determinar el impacto de suelo calcáreo modificado con compuestos de Zn a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn/kg suelo sobre algunas respuestas agronómicas del cultivo de rábano.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del Zn en las plantas

El zinc (Zn) es uno de los microelementos vitales y esenciales para las plantas y un componente de más de 300 enzimas vegetales y proteínas vitales que se necesitan para el crecimiento y desarrollo adecuados de las plantas (Strekalovskaya *et al.*, 2024). Además de ser factor para la integridad estructural de los ribosomas, este microelemento desempeña otras funciones biofísicoquímicas importantes en las plantas, como la regulación y activación de genes, la síntesis de proteínas, la participación en el metabolismo de los carbohidratos y la participación morfológica y anatómica en las biomembranas (Hafeez *et al.*, 2013).

Además, se estima que las proteínas de unión a Zn constituyen alrededor del 6% del proteoma procariota y aproximadamente el 9% del proteoma eucariota (Andreini *et al.*, 2006). Las proteínas que contienen Zn en las plantas incluyen enzimas como carbonato deshidratasa, aldehído deshidrogenasa, superóxido dismutasa (SOD) de Zn/cobre (Cu) y proteínas de unión al ADN con dedos de Zn, las cuales pueden realizar catálisis para descomponer radicales libres (Sofa *et al.*, 2018). Por lo anterior, es crucial que las plantas absorban, transporten y distribuyan adecuadamente el Zn en sus tejidos, células y ubicaciones intracelulares para asegurar el correcto funcionamiento de la planta (Zlobin, 2021; Strekalovskaya *et al.*, 2024). Sin embargo, la deficiencia de Zn es el problema de deficiencia de micronutrientes más omnipresente en los cultivos del mundo (Alloway, 2009).

Las deficiencias de Zn tienden a ocurrir en suelos calcáreos (pH alto), con un bajo contenido total de Zn (suelos arenosos) o suelos que tienen un contenido de fósforo disponible relativamente alto. Sin embargo, el contenido total de Zn no es un índice confiable que refleje la capacidad del suelo para suministrar Zn para la absorción de las plantas. Una parte muy pequeña del Zn total del suelo (<1 mg/kg) está presente en la solución del suelo y puede ser absorbido por los cultivos (Alloway, 2009; Noulas *et al.*, 2018).

Por esto, es de suma importancia trabajar con nuevas tecnologías que permitan lograr una fertilización más eficiente del Zn en la producción de cultivos. Considerada como una tecnología emergente, la nanotecnología a través del uso de nanopartículas (1-100 nm) aplicadas como nanofertilizantes en cultivos, permite una mejor absorción y asimilación de nutrientes específicos como el Zn, esto en comparación con la fertilización común ya que el suministro de nutrientes se da en forma gradual y controlada con el fin de incrementar el contenido de minerales de manera puntual (García-López *et al.*, 2019). A continuación, se documentará parte de los efectos fisiológicos y bioquímicos que han generado los nanomateriales a base de Zn en los cultivos.

2.2 Efecto de nanocompuestos de Zn en cultivos

El Zn es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, por ello las deficiencias de este micronutriente puede generar clorosis de las hojas, retraso en el crecimiento de los brotes y reducción del rendimiento (Zhang *et al.*, 2020). Con referencia en la literatura, los nanomateriales compuestos por Zn tienen efectos positivos y negativos en el crecimiento de las plantas.

La aplicación foliar de nanopartículas vía foliar se da a través de la capa de la cutícula en dos formas diferentes: vía hidrofílica, donde los nanomateriales penetran la cutícula a través de los poros estomáticos cuyo tamaño varía de 0.6 a 5 nm de diámetro según el tipo de especie, la otra es la vía lipofílica a través del proceso de difusión, en el cual la cutícula sirve como barrera para evitar la penetración de los nanomateriales (Tredenick *et al.*, 2017; Strekalovskaya *et al.*, 2024). En un estudio realizado en plantas de garbanzo, la aplicación foliar de NPsZnO a una concentración de 1.5 mg/L mejoró significativamente el crecimiento de las raíces y plantas, pero al incrementar la concentración a 10 mg/L se observó una disminución en el crecimiento debido a un efecto fitotóxico (Bruman *et al.*, 2013). Otro estudio documentó que la aplicación foliar de nanomateriales de ZnO en plantas de arroz, generó un aumento del contenido de Zn y de hierro (Fe) en los brotes, sin embargo, afectó la

absorción de nitrógeno (N) y fósforo (P), lo que se atribuyó posiblemente a una relación antagónica entre Zn y P (Zeidan *et al.*, 2010).

Los nanomateriales son tan pequeños que cuentan con un diámetro menor al tamaño de los poros estomáticos, por esta razón, pueden penetrar la cutícula de la hoja y distribuirse en los diferentes tejidos de las plantas, lo que permite que este tipo de materiales contrarresten la deficiencia de Zn y mejoren las respuestas fisiológicas y bioquímicas de las plantas para obtener un mayor rendimiento. En la Figura 1, se presenta de manera esquemática el ingreso de nanomateriales al ecosistema del suelo.



Figura 1. Entrada directa e indirecta de nanomateriales de Zn en el ecosistema del suelo.

En cuanto a la aplicación al suelo, en un estudio se observó que la aplicación de NPs ZnO a concentraciones de 200 y 300 mg/L generó una disminución en promedio del 50% en el crecimiento de la planta de *Arabidopsis thaliana* L. Además, las respuestas fisiológicas como clorofilas, fotosíntesis y conductancia estomática disminuyeron significativamente (Wang *et al.*, 2016). Por otra parte, en plantas de *Lupinus termis* sometidas a salinidad (150 mM NaCl) y tres concentraciones de NPs ZnO 20, 40 y 60 mg/L, se detectó que las NPs ZnO a 60 mg/L

estimuló el crecimiento de la planta, dado por una mayor respuesta fisiológica y antioxidante del cultivo (Latef *et al.*, 2017).

La fitotoxicidad de los nanomateriales en las plantas está influenciada por su tamaño, en un estudio realizado en *Brassica* rapa variedad pekinensis, la aplicación de nanopartículas con diámetro menor a 30 nm inhibieron el crecimiento de la raíz, este resultado fue asociado a la fitotoxicidad generada por su mayor capacidad de penetrar los tejidos y las células (Xiang *et al* 2015). Generalmente, la eficiencia del impacto de compuestos en las plantas está relacionado con la forma de absorción del elemento, en el caso del Zn es absorbido por las raíces desde la solución del suelo, principalmente en forma de iones Zn^{2+} o complejos con quelatos de ácidos orgánicos y se transloca a través del xilema hacia la parte aérea de la planta (Sturikova *et al.*, 2018). Los efectos tóxicos de las nanopartículas metálicas en las plantas se manifiestan con una serie de efectos adversos a nivel fisiológico (reducción en la fotosíntesis) así como a nivel celular (daño a la membrana celular o aberración cromosómica), como se informa comúnmente en muchos estudios. A continuación, se presenta un esquema que representa las aplicaciones futuras de los nanomateriales en la agricultura (Figura 2).



Figura 2. Aplicaciones futuras de nanomateriales en los sistemas de producción agrícola.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material genético

Las semillas utilizadas para siembra fueron de rábano Champion (Kristen Seed®). Esta variedad se considera vigorosa, utilizada principalmente para las cosechas de primavera y otoño, la planta cuenta con hojas relativamente grandes con una longitud de 9 a 15 cm. En cuanto a las raíces son grandes y globulares de color rojo, los días de emergencia de la semilla a la cosecha van de los 25 a los 30 días.

3.2 Compuestos de Zn

Las nanopartículas metálicas de óxido de Zn (NPs ZnO) y el sulfato de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) se compraron en Sigma-Aldrich (San Luis, Misuri, USA). Para la síntesis de nanopartículas verdes (GNPs ZnO) se utilizaron hojas de Moringa *Oleifera*, las cuales fueron secadas a temperatura ambiente y se molieron en un molino planetario Pulverisette 6 (Idar-Oberstein, Renania-Palatinado, DE). El polvo obtenido se utilizó para la síntesis verde de las GNP ZnO a través del método establecido por Naiel *et al.* (2022).

3.3 Recolección de suelo

El suelo utilizado fue recolectado en un campo experimental agrícola situado en Saltillo, Coahuila, México (coordenadas 25° 21' 24" longitud oeste y 101° 02' 05" latitud norte a 1762 msnm). Las propiedades físicas y químicas ya fueron reportadas por García-Reyes *et al.* (2024), quienes destacaron que el suelo es deficiente en el Zn extraíble con DTPA-TEA, considerándolo como deficiente para el crecimiento y desarrollo de las plantas en suelos calcáreos (0.11 mg kg^{-1}).

3.4 Condiciones de crecimiento de las plantas

El experimento se llevó a cabo durante el 2021 y 2022 en el invernadero del Departamento de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (coordenadas 25° 23' 12.7" longitud oeste y 101° 00' 9.8" latitud norte a 1783 msnm). Para el estudio se utilizaron macetas de polietileno (con capacidad de 10 L, diámetro interno medio de 24.3 cm y altura de 24.5 cm) que contenían la tierra (10 kg por maceta) que fue recolectada en el campo experimental agrícola. El suelo de cada maceta se fertilizó con 100 de N kg⁻¹ en forma de urea prilada (46-0-0), 55 mg de P kg⁻¹ en forma de fosfato diamónico DAP (18-46-0), y 110 mg de K kg⁻¹ con cloruro de potasio (0-0-60). Las temperaturas del invernadero oscilaron entre 6 y 28 °C, y la humedad relativa osciló entre 21 y 72%. Además, la luz diurna media fue de 13,74 ± 0,36 mol m⁻² día⁻¹.

3.5 Aplicación de tratamientos

Las aplicaciones de Zn al suelo se realizaron como polvo seco con las diferentes fuentes de Zn (NPs ZnO, ZnSO₄ y GNPs ZnO), a concentraciones de 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn/kg de suelo (cada tratamiento con cinco repeticiones), simulando la concentración promedio de Zn en suelos que está en el rango de 10 a 50 mg de Zn/kg de suelo (Hurdebise *et al.*, 2015; Guarino *et al.*, 2020). Para ello, la capa superior del suelo de cada maceta (10 cm de profundidad, tres kg de suelo) se mezcló manualmente con los fertilizantes de Zn, simulando la aplicación al voleo, esta mezcla se concentra en la capa superior del suelo antes del crecimiento del cultivo, considerado esto como una práctica común en la aplicación de agroquímicos al suelo (García-Gómez *et al.*, 2017). Al terminar la mezcla de los tratamientos, la humedad del suelo se mantuvo a capacidad de campo durante 48 h. Durante la primera mitad del ciclo del cultivo (primeros 15 días), cada día alterno las plantas se regaron con 90 mL de agua desionizada/kg de suelo, y 120 mL todos los días durante la segunda mitad (35 días).

3.6 Cosecha de las plantas

La cosecha se realizó el día 35 después de la siembra, para ello se retiraron del suelo la planta y el bulbo y se pesó (g), enseguida, se cuantificó el número de hojas y se determinó el área foliar (cm²) con un medidor de área LI-3100C (LICOR Biosciences, Lincoln, NE).

3.7 Análisis estadístico

El cultivo se estableció utilizando un diseño completamente aleatorio (la unidad experimental consistió de una maceta de plástico que contenían una planta de rábano). Los resultados se informaron como media \pm desviación estándar, las diferencias estadísticamente significativas entre las muestras se analizaron con un ANOVA y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico SPSS versión 21.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Componentes agronómicos

Los resultados indican que los tratamientos aplicados afectaron significativamente el peso de la hoja, área foliar y el peso del bulbo (Cuadro 1). En las gráficas de comparación de medias presentaremos el impacto generado por los compuestos de Zn aplicados.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para algunos parámetros agronómicos del cultivo de rábano cultivado en suelo modificado con compuestos de Zn.

FV	GL	Ph (g)	Nh	Af (cm ³)	Pb (g)
Tratamientos	15	4.16**	0.82	3444.54**	37.32**
Error	34	1.81	1.02	830.34	29.61
CV%		25.14	13.20	28.79	26.48

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; Ph= Peso de hoja; Nh= Numero de hojas; Af= Área foliar; Pb= Peso de bulbo.

4.2 Peso de hoja

Para el peso de hoja, el ZnSO_4 a $10 \text{ mg de Zn kg}^{-1}$ y las NPs ZnO a $25 \text{ mg de Zn kg}^{-1}$ destacaron con los mejores valores, superando en promedio en 45.7% al testigo, respectivamente (Figura 3). Además, a 15 y $20 \text{ mg de Zn kg}^{-1}$ con GNPs ZnO se obtuvieron los valores más bajos siendo estadísticamente iguales que el testigo.

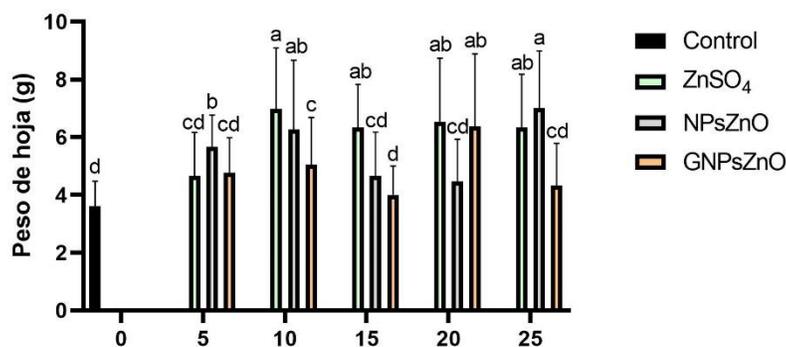


Figura 3. Peso de hoja en plantas de rábano cultivadas en suelo calcáreo modificado con ZnSO_4 , NPs ZnO y GNPs ZnO a concentraciones de 0 , 5 , 10 , 15 , 20 y $25 \text{ mg de Zn kg}^{-1}$ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

4.3 Número de hojas y área foliar

En cuanto al número de hojas todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales (Figura 4). Mientras que el área foliar a concentraciones de 15 y $25 \text{ mg de Zn kg}^{-1}$ presentaron incrementos promedio del 29.8% en comparación con el testigo, respectivamente (Figura 4). Curiosamente, a $20 \text{ mg de Zn kg}^{-1}$ en todas las fuentes de Zn se presentó una reducción promedio del 58.6% en comparación con el testigo.

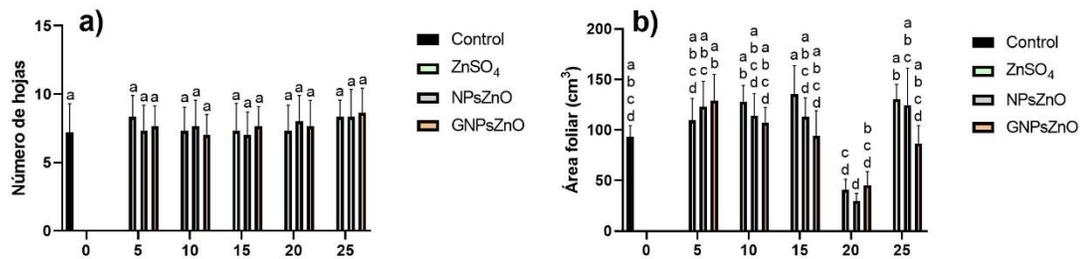


Figura 4. Número de hojas (a) y área foliar (b) de plantas en plantas de rábano cultivadas en suelo calcáreo modificado con ZnSO₄, NPsZnO y GNPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn kg⁻¹ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

4.4 Peso de bulbo

En cuanto al peso de bulbo, las concentraciones a 10 y 15 mg de Zn kg⁻¹ de suelo con ZnSO₄ presentaron un incremento en promedio del 36.6% en comparación con el testigo (Figura 5). Por otra parte, las GNPsZnO a 5 y 25 mg de Zn kg⁻¹ presentaron valores estadísticamente iguales que el testigo.

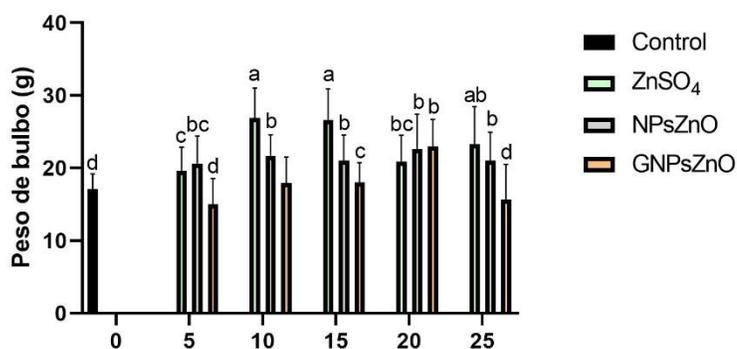


Figura 5. Peso de bulbo en plantas de rábano cultivadas en suelo calcáreo modificado con ZnSO₄, NPsZnO y GNPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mg de Zn kg⁻¹ de suelo. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

En general, los resultados de este estudio permiten identificar que los tratamientos de Zn generaron cambios en la mayoría de los parámetros agronómicos evaluados. En un estudio en plantas de guisantes verdes se evaluó el impacto de modificar suelo con nanopartículas metálicas a concentraciones de 250 y 1000 mg de nanopartículas/kg de suelo. Los resultados indican que todas las plantas sometidas a tratamientos de Zn mostraron mayor acumulación de biomasa y concentración de este microelemento en las raíces y semillas, en comparación con el testigo ([Mukherjee et al., 2016](#)). En otro estudio donde se evaluó el efecto de la fertilización foliar con nanopartículas de óxido de Zn en dosis de 10, 20, 30 y 40 mg L⁻¹, se destacó que la dosis más elevada (40 mg L⁻¹) mejoró significativamente el peso fresco, materia seca, contenido de Zn, clorofila total, carotenoides totales, fenólicos totales, capacidad antioxidante, flavonoides totales, vitamina C, catalasa y peroxidasa ([Fortis-Hernández et al., 2024](#)).

Los resultados obtenidos, en conjunto con la literatura reportada permite documentar que la modificación del suelo con el uso de nanomateriales de Zn puede alterar las respuestas agronómicas de los cultivos, lo que posiblemente está relacionado con los cambios que se generan a nivel fisiológico y genético. El uso de nanopartículas de Zn es una buena alternativa para mejorar el rendimiento y la concentración de Zn en tejido vegetal, siendo una opción para combatir la desnutrición de este micronutriente (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021). Sin embargo, se sugiere que se realicen más estudios en cultivos básicos y hortalizas a fin de identificar una dosis óptima para lograr los máximos beneficios (Fortis-Hernández *et al.*, 2024).

Con la información obtenida, se ha demostrado que los efectos de la aplicación de nanomateriales de Zn pueden ser positiva y/o negativa, por lo que se espera que, en los próximos años con la aparición de nuevas herramientas, nuevas metodologías y trabajo multidisciplinario se genere más información que permita entender el impacto de los nanomateriales en el ambiente.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de los compuestos de Zn al suelo generó cambios en la mayoría de los parámetros agronómicos evaluados. Para el peso de la hoja, el ZnSO_4 10 mg de Zn kg^{-1} y las NPs ZnO a 25 mg de Zn kg^{-1} superaron en 45.7% al testigo, en consecuencia, el área foliar tuvo incrementos del 29.8% en comparación con el testigo. Cabe señalar, que también se obtuvieron efectos negativos, por ejemplo: a 20 mg de Zn kg^{-1} de suelo en todas las fuentes se presentó una reducción promedio del 58.6% del área foliar en comparación con el testigo. A la fecha, la literatura ha informado resultados positivos y negativos con el uso de nanomateriales en la nutrición de plantas, por lo que es conveniente seguir realizando estudios para determinar la concentración óptima que permita obtener mayores rendimientos en los cultivos.

6. REFERENCIAS

- Al Jabri, H., Saleem, M. H., Rizwan, M., Hussain, I., Usman, K., and Alsafran, M. 2022. Zinc oxide nanoparticles and their biosynthesis: overview. *Life*, 12, 4, 594.
- Alloway, B. J. 2009. Zinc in soils and crop nutrition. International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association.
- Almendros, P., Rico, M. and Álvarez, L. L. 2008. Cultivos de zinc. Deficiencia de Zinc en los cultivos y correctores de carencia del micronutriente, 280, 12.
- Amezcu, J., & Lara, M. 2017. Ciencia. El Zinc en las plantas, 68, 3, 28-31.
- Andreini, C., Banci, L., Bertini, I., and Rosato, A. 2006. Zinc through the three domains of life. *J. Proteome Res.* 5, 11, 3173–3178.
- Burman, U.; Saini, M.; Kumar, P. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicol. Environ. Chem.* 2013, 95, 605–612.
- Casseres E.1980. Producción de hortalizas. Instituto interamericano de ciencias agrícolas. San José, Costa Rica. 3 edición 272-275.
- Criollo, H. and Gercía, J. 2009. Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo invernadero. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 3, 2, 210-222.
- E., Tamez, C., Bandyopadhyay, S., Niu, G., and Gardea-Torresdey, J. L. 2016. Differential toxicity of bare and hybrid ZnO nanoparticles in green pea (*Pisum sativum* L.): a life cycle study. *Frontiers in plant science*, 6, 1242.
- Fertilab. 2016. La Importancia del Zinc en las Plantas y su dinámica en el suelo.
- Fortis-Hernández, M., Pivaral-Chávez, A. G., Galindo-Guzmán, A. P., Preciado-Rangel, P., Ruiz-Ortega, F. J., and Trejo-Valencia, R. 2024. Nanopartículas de óxido de zinc para

incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. Ecosistemas y recursos agropecuarios, 11, 1.

Galindo, E. 2021. Biotecnología en movimiento. Al rescate de la agricultura: nanofungicidas y nanopartículas, 2, 25, 13-17.

García-López, J.I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R.H., Barriga-Castro, E.D., Vázquez-Alvarado, R., Rodríguez-Salinas, P.A., Zavala-García, F. Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants* 2019, 8, 254

Hafeez, F.Y., Abaid-Ullah, M., Hassan, M.N. Plant growth-promoting Rhizobacteria as zinc mobilizers: A promising approach for cereals biofortification. In *Bacteria in Agrobiolgy: Crop Productivity*; Maheshwari, D., Saraf, M., Aeron, A., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; pp. 217–235.

Higuera, APC, Rojas, JNG, Salamanca, JAM, Escobar, JGR, Rendón, JDV, Sánchez, LB, and Cubillos, CFA (2015). Growth of *Raphanus sativus* L. with arvences *Plantago media* L. and *Polygonum nepalense* Meins. *Journal of Agricultural Sciences (RCA)*, 1, 1, 31-55.

L. Xiang, H.M. Zhao, Y.W. Li, X.P. Huang, X.L. Wu, T. Zhai, Y. Yuan, Q.Y. Cai, C.H. Mo, Effects of the size and morphology of zinc oxide nanoparticles on the germination of Chinese cabbage seeds, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22 2015, 10452–10462.

Latef, A.A.H.A., Alhmad, M.F.A., and Abdelfattah, K.E. 2017. The possible roles of priming with ZnO nanoparticles in mitigation of salinity stress in lupine (*Lupinus termis*) plants. *Journal of Plant Growth Regulation* 36: 60–70.

Montero S.M; B.K. Singh y R. Taylor. 2006. Evaluación de seis estructuras de producción hidropónica diversificada en el trópico húmedo de costa rica. *Tierra Tropical* 2, 1, 27-37

Noulas, C., Tziouvalekas, M., and Karyotis, T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *J. Trace Elements Med. Biol.* 49, 252–260.

Polishchuk, S.; Nazarova, A.; Kutskir, M.; Churilov, D.; Ivanycheva, Y.; Kiryshin, V., and Churilov, G. Ecologic-biological effects of cobalt, cuprum, copper oxide nano-powders and humic acids on wheat seeds. *Mod. Appl. Sci.* 2015, 9, 354.

Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. 2021. Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12, 5, 791-803.

Rizwan, M., Ali, S., Hussain, A., Ali, Q., Shakoor, M. B., Zia-ur-Rehman, M., and Asma, M. 2017. Effect of zinc-lysine on growth, yield, and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment. *Chemosphere*, 187, 35-42.

Semida, W.M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G., El-Mageed, A., Taia, A., El-Mageed, A., Shima, A., Rady, M.M., Ali, E.F. Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Plants* 2021, 10, 421.

Sofo, A., Moreira, I., Gattullo, C. E., Martins, L. L., and Mourato, M. 2018. Antioxidant responses of edible and model plant species subjected to subtoxic zinc concentrations. *J. Trace Elements Med. Biol.* 49, 261–268.

Stekalovskaya, E. I., Perfileva, A. I., & Krutovsky, K. V. 2024. Zinc oxide nanoparticles in the “Soil–Bacterial Community–Plant” system: Impact on the stability of soil ecosystems. *Agronomy*, 14, 7, 1588.

Sturikova, H., Krystofova, O., Huska, D., and Adam, V. 2018. Zinc, zinc nanoparticles and plants. *Journal of hazardous materials*, 349, 101-110.

Tredenick, E.C.; Farrell, T.W.; Forster, W.A.; Psaltis, S.T. Nonlinear porous diffusion modeling of hydrophilic Ionic agrochemicals in stomatous plant cuticle aqueous pores: A mechanistic approach. *Front. Plant Sci.* 2017, 8, 746

van Ommen, J.R., Valverde, J.M., Pfeffer, R. Fluidization of nanopowders: A review. *J. Nanoparticle Res.* 2012, 14, 737.

Wang, X.; Yang, X.; Chen, S.; Li, Q.; Wang, W.; Hou, C.; Wang, S. Zinc oxide nanoparticles affect biomass accumulation and photosynthesis in Arabidopsis. *Front. Plant. Sci.* 2016, 6, 1243

Zeidan, M.S.; Mohamed, M.F.; Hamouda, H.A. Effect of foliar fertilization of Fe, Mn and Zn on wheat yield and quality in low sandy soils fertility. *World J. Agric. Sci.* 2010, 6, 696–699.

Zhang, L.; Yan, M.; Li, H.; Ren, Y.; Siddique, K.H.; Chen, Y.; Zhang, S. Effects of zinc fertilizer on maize yield and water-use efficiency under different soil water conditions. *Field Crop Res.* 2020, 248, 107718.

Zlobin, I. E. 2021. Current understanding of plant zinc homeostasis regulation mechanisms. *Plant Physiol. Biochem.* 162, 327–335.