

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Respuesta Agronómica y Fisiológica a la Aplicación de
Nanopartículas de Óxido de Magnesio en Plantas de Chile
Serrano Cultivadas en Invernadero.

Por:

CÉSAR LEONARDO TORRES DÍAZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Febrero, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Respuesta Agronómica y Fisiológica a la Aplicación de
Nanopartículas de Óxido de Magnesio en Plantas de Chile
Serrano Cultivadas en Invernadero.

Por:

CÉSAR LEONARDO TORRES DÍAZ

TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN


Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesor Principal



Dr. José Luis
Velasco López
Coasesor



Dr. Francisco Javier
Sánchez Ramírez
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Febrero, 2025

Carta de no plagio

Por medio del presente documento yo César Leonardo Torres Díaz, hago constar que la tesis titulada "Respuesta Agronómica y Fisiológica a la Aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio en Plantas de Chile Serrano Cultivadas en Invernadero", ha sido elaborada de mi trabajo personal, en el cual no he utilizado datos, artículos, cuadros o gráficas de otros trabajos.

Así mismo, hago constancia que las citas de otros autores han sido identificadas en el trabajo, por lo cual no han sido asumidas como propias.

Atentamente



César Leonardo Torres Díaz

DEDICATORIA

A DIOS por haberme permitido llegar al final de mi carrera profesional y acompañarme a lo largo de mi vida.

El presente trabajo se lo dedico con todo el amor y cariño a mis padres, **Dolores Elena Díaz Vidal** y **César Torres Rodríguez**, quienes me dieron la vida y siempre me brindaron su apoyo en todo momento, por sus consejos que me ayudaron a sobrepasar cualquier adversidad, su dedicación y amor incondicional, permitiéndome alcanzar mi formación profesional y cumplir una importante etapa en mi vida.

A mis queridas hermanas, **Leslie Diafania Torres Díaz** y **Bremia Guadalupe Torres Díaz**, que siempre has estado a mi lado siendo mis compañeras de vida, quienes me motivan a seguir adelante cumpliendo mis metas cada día para que se sientan orgullosas de todo lo que he alcanzado.

A mi **familia**, quienes me brindaron su apoyo y consejos para que hoy en día puedan verme realizado como profesionalista, especialmente a mi tía, **María Josefina Torres Rodríguez**, quien también formo parte de mis compañeras de vida, gracias por todo el cariño y consejos que me han ayudado a llegar hasta donde estoy ahora.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero agradecer a **Dios**, por siempre bendecirme y guiarme en mi vida, por darme las fuerzas, perseverancia y sabiduría cada día, poniéndome siempre en el camino correcto para lograr mis metas.

A mi **Alma Mater**, por abrirme sus puertas y ser mi segundo hogar durante mi etapa de estudiante, por todas las alegrías y buenos momentos que pase en la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, y sobre todo por darme las herramientas necesarias para mi formación profesional. Siempre estaré agradecido por brindarme la oportunidad de ser parte de los “buitres” de la Narro.

A la **Dra. Norma Angélica Ruiz Torres**, por su asesoramiento y por darme la oportunidad de realizar este gran proyecto, por brindarme su tiempo, dedicación y valiosos consejos para el buen término del presente trabajo. Gracias por ayudarme en mi etapa estudiantil y transmitirme la pasión por el conocimiento.

A mis **Profesores y al Departamento de Fitomejoramiento**, por haberme brindado sus conocimientos, su tiempo y paciencia durante mi carrera universitaria.

Por último, agradecer a mis **Amigos**, los cuales me brindaron su tiempo, consejos y me apoyaron en los buenos y malos momentos.

ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivo específico	3
1.3 Hipótesis	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 Funciones del magnesio (Mg ⁺⁺) en la planta	4
3.2 Síntomas de deficiencia del Mg en plantas	5
3.3 Toxicidad del Mg en plantas	6
3.4 Nanopartículas	6
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
4.1 Localización del sitio experimental.....	10
4.2 Material genético.....	10
4.3 Trasplante	10
4.4 Diseño experimental	10
4.5 Manejo nutricional.....	10
4.6 Plagas y enfermedades.	11
V. VARIABLES AGRONÓMICAS EVALUADAS	12
5.1 Altura del tallo (AT).....	12
5.2 Diámetro del tallo (DT).....	12
5.3 Número de flores (NFLOR).....	12
5.4 Número de frutos (NFRUT).....	12
5.5 Número de bifurcaciones (NBIFUR)	12
5.6 Contenido relativo de clorofila.....	12
5.7 Peso fresco de frutos (PFFRUTO)	13
5.8 Peso seco de frutos (PSFRUTO).....	13
5.9 Longitud de raíz (LR)	13

5.10	Peso seco de raíz (PSRAÍZ).....	13
5.11	Peso seco de tallo (PSTALLO).....	13
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
VII.	CONCLUSIONES.....	22
VIII.	LITERATURA CITADA	24

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición de soluciones madre para preparar Hoagland.	11
Cuadro 2. Tratamientos con NPsMgO aplicados a las plantas de chile serrano cultivadas en invernadero.....	11
Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile serrano, bajo condiciones de invernadero con la aplicación de NPsMgO.....	14
Cuadro 4. Cuadros medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile serrano, bajo condiciones de invernadero con la aplicación de NPsMgO.....	15
Cuadro 5. Cuadros medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile serrano, bajo condiciones de invernadero con la aplicación de NPsMgO.....	15
Cuadro 6. Comparación de medias del contenido de clorofila por tratamiento en plantas de chile serrano aplicando NPsMgO, bajo condiciones de invernadero. ...	16
Cuadro 7. Comparación de medias de variables agronómicas en plantas de chile serrano con tratamiento de NPsMgO.	18
Cuadro 8. Comparación de medias de las variables longitud de raíz, peso seco de raíz y tallo, peso fresco y seco de fruto por tratamiento en plantas de chile serrano aplicando NPsMgO.	19
Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Pearson para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile serrano (<i>Capsicum annum</i>) con tratamientos de NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.	21

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el invernadero No. 2, del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, con coordenadas geográficas: 25°27'36.16" de latitud Norte y 100°58'06.08" latitud Oeste, a una altitud de 1742 msnm. Se evaluó el efecto de la aplicación de nanopartículas de magnesio (NPsMgO) en plantas de chile serrano (*Capsicum annuum*), bajo condiciones de invernadero. Durante esta investigación se evaluaron variables agronómicas y fisiológicas.

Se utilizaron bolsas de polietileno color negro con capacidad de 5 L, como sustrato se usó una mezcla de vermiculita y perlita 40:60 (v/v), en cada maceta se trasplantó una plántula de chile serrano, posteriormente, se establecieron 7 macetas para cada tratamiento, con un total de 35 plantas trasplantadas.

Se evaluaron cinco concentraciones (0, 10, 20, 30 y 50 ppm), con siete repeticiones cada uno. Para la nutrición de las plantas se utilizó una solución nutritiva Hoagland, excluyendo el nutriente aplicado en forma de nanopartícula (NPsMgO), aplicando 200 ml por maceta de NPsMgO correspondiente, tres veces por semana.

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar, utilizando NPsMgO como parte de la nutrición a las plantas. Las variables que se evaluaron fueron: contenido de clorofila en la base de la planta, contenido de clorofila en la parte media de la planta 1, contenido de clorofila en la parte media de la planta 2, contenido de clorofila en el ápice de la planta, diámetro de tallo, número de bifurcaciones, altura a la primera bifurcación, altura a la segunda bifurcación, número de flores, número de frutos, longitud de raíz, peso seco de la raíz, peso seco del tallo, peso fresco del fruto y peso seco del fruto. Para analizar los datos se utilizó un análisis de varianza, comparación de medias y coeficientes de variación con la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), para ello, se utilizó en programa estadístico SAS versión 9.3.

La aplicación de NPsMgO al sustrato aumentó el contenido de clorofila en la parte media de la planta, asimismo, incrementó la acumulación de materia seca en el tallo.

En las variables longitud de raíz y peso seco de la raíz la concentración de 30 ppm mostró ser estadísticamente superior a las demás concentraciones. Por tal razón, se observó que la aplicación de NPsMgO a una concentración de 30 ppm fue la óptima para el crecimiento y desarrollo de la raíz.

Las variables diámetro del tallo, número de flores y altura a la primera bifurcación no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, por lo tanto, la aplicación de NPsMgO a concentraciones menores a 50 ppm, no afectó en gran medida a dichas variables. Por otra parte, en la variable peso fresco del fruto, el testigo fue superior estadísticamente al resto de tratamientos.

Hubo correlaciones positivas y significativas entre algunas variables, evidenciando la relación entre el contenido de clorofila en la parte media de la planta 1 con el número de bifurcaciones, longitud de raíz y peso seco de la raíz. También, correlaciones altamente significativas se observaron entre las variables longitud de raíz y peso seco de la raíz, asimismo con el peso seco del tallo.

Se obtuvo también, una correlación altamente significativa entre el peso seco de la raíz y el peso seco del tallo. Del mismo modo, se observó una correlación altamente significativa entre el peso fresco del fruto con el peso seco del fruto.

Palabras clave: Nanopartículas, magnesio, chile serrano.

I. INTRODUCCIÓN

El chile serrano (*Capsicum annuum*) es una planta esencial en la gastronomía mexicana y parte integral de la cultura y tradición. Se considera un alimento básico en la dieta y la agricultura del país. Es la segunda variedad de chile más cultivada en México, después del jalapeño.

En México como en el mundo, existe una notable demanda de alimentos debido al aumento gradual de la población, esto propicia al uso indiscriminado de productos químicos en la agricultura para cubrir la demanda alimenticia, pero con consecuencias devastadoras para la salud de los suelos agrícolas y los agroecosistemas. Por ello, la agricultura moderna requiere generar e implementar nuevas tecnologías para la producción de alimentos en cantidad y calidad sin perjudicar el medio ambiente. Por lo tanto, la aplicación de la nanotecnología (NT) en la agroindustria surge como una alternativa potencial ya que proporciona herramientas para la rápida detección de enfermedades de los cultivos y mejora la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y crecer de una manera más rápida. La NT brinda diversas oportunidades para optimizar la producción agrícola, facilitando el desarrollo de productos como nanofertilizantes, nanoinsecticidas, nanoherbicidas y nanosensores, aumentando así de manera sostenible la producción de alimentos y reduciendo el impacto ambiental (Lira et al., 2018).

Se ha demostrado que el uso de nanopartículas (NPs) en diversos cultivos tienen un impacto positivo en la germinación, el crecimiento y las actividades fisiológicas de las plantas. Además, influyen en la expresión genética y los niveles bioquímicos de proteínas y enzimas, lo que resalta su potencial para aumentar el rendimiento agrícola de manera sostenible.

El magnesio (Mg^{++}) es un nutriente esencial para las plantas y es clave para la fotosíntesis, ya que es un componente importante de la clorofila. Participa en la síntesis de xantofilas, caroteno y activa las enzimas involucradas en el metabolismo de proteínas y carbohidratos. Es fundamental para la fosforilación, el almacenamiento y regulación energético. También influye en la síntesis de ARN, la

estabilidad celular, germinación de las semillas y el equilibrio hídrico. Las deficiencias de este elemento pueden limitar el rendimiento de los cultivos.

El Mg^{++} puede proceder de diversas fuentes de fertilizantes, como sulfato de magnesio ($MgSO_4$), óxido de magnesio (MgO) y NPs de óxido de magnesio (NPsMgO) (Kanjana, 2020).

El propósito de este trabajo fue estudiar el efecto de las NPsMgO en variables agronómicas y fisiológicas de plantas de chile serrano, cultivadas bajo condiciones de invernadero.

II. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

- Evaluar el efecto de la aplicación al sustrato de nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO) a diferentes concentraciones, en la respuesta de variables agronómicas y fisiológicas, en plantas de chile serrano bajo condiciones de invernadero.

1.2 Objetivo específico

- Medir el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de NPsMgO en las variables asociadas al crecimiento de las plantas.
- Determinar el efecto de la NPsMgO en el contenido relativo de clorofila, peso seco del tallo, frutos y la raíz.

1.3 Hipótesis

- H_1 = La aplicación de NPsMgO mejora la expresión de las variables agronómicas y fisiológicas en plantas de chile serrano.
- H_0 = La aplicación de NPsMgO no mejora la expresión de las variables agronómicas y fisiológicas en plantas de chile serrano.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Funciones del magnesio (Mg^{++}) en la planta

El magnesio (Mg^{++}) es un nutriente esencial ya que es la base de diversas funciones en las plantas, este juega un papel primordial en la síntesis de xantofilas y carotenos, activa diversas enzimas, especialmente las implicadas en el metabolismo de los carbohidratos y de las proteínas, y ayuda a mantener una salud celular óptima. Participa en la formación de carbohidratos en las plantas. Una de las funciones más importantes del Mg^{++} es en el proceso de la fotosíntesis, ya que es un componente importante de la clorofila, la molécula que da a las plantas su color verde. Por lo tanto, la deficiencia de Mg^{++} se ha convertido en un factor importante que limita el rendimiento de los cultivos (Cakmak and Yazici, 2010).

El Mg^{++} es muy móvil en las plantas y es importante para diversos procesos metabólicos, es la base estructural de la molécula de clorofila y, por tanto, es necesario como coenzima en la fotosíntesis y la fijación de dióxido de carbono. Participa en todos los procesos de fosforilación en plantas y ayuda en la transferencia, conversión y almacenamiento de energía, es decir, durante la fotosíntesis se produce la síntesis de carbohidratos, proteínas y la descomposición de los carbohidratos en ácido pirúvico (respiración). Posee un efecto activador de diversas enzimas como la glutamina sintetasa, que juega un papel importante al combinar el amonio con los carbohidratos para formar aminoácidos como la glutamina. Regula el equilibrio energético de las plantas, ya que es necesario formar un puente entre las enzimas y el transportador energético ATP. La presencia de Mg^{++} es fundamental cuando se requiere ATP. Afecta la formación de ARN, que a su vez afecta la conversión de información genética en proteínas. Forma parte de las sustancias pépticas, importante para la estabilidad de la estructura celular, y del ácido fítico, un acumulador de fósforo de baja energía (fitato de fósforo), que es importante para la germinación de las semillas. Es un componente estructural integrado en los ribosomas y la matriz nuclear, ayudando a estabilizar las membranas celulares. Interviene en la formación de paredes celulares. Tiene propiedades hidratantes y por tanto afecta el equilibrio hídrico y la eficiencia enzimática (Cakmak and Kirkby, 2008).

3.2 Síntomas de deficiencia del Mg en plantas

Diversos estudios han demostrado que las plantas con deficiencia de magnesio (Mg^{++}) muestran una inhibición significativa del crecimiento de las raíces (Cakmak *et al.*, 1994), antes de que se observen cambios significativos en el crecimiento de las plantas aéreas y la concentración de clorofila. Como resultado, las plantas con deficiencia de Mg^{++} tienen una mayor proporción aire/raíces. El impacto negativo temprano de la deficiencia de Mg^{++} en el crecimiento de las raíces, antes de que se produzca una clorosis significativa en las hojas, es un aspecto crítico, ya que un buen sistema de raíces es importante para el rendimiento. Por lo tanto, es trascendental comprender completamente el estado nutricional del Mg^{++} antes de que las plantas desarrollen síntomas de deficiencia de este (Cakmak y Yazici, 2010).

Por otro lado, Cakmak *et al.* (1994) demostraron que la acumulación de carbohidratos en hojas completamente expandidas es común en plantas deficientes en Mg^{++} y altas tanto en almidón como en azúcares reductores. Las pruebas demostraron que las raíces de las plantas con deficiencia de Mg^{++} contienen sólo un 1% de carbohidratos, mientras que las plantas con suficiente Mg^{++} contienen un 16%. Estos resultados demuestran claramente la fuerte inhibición de la exportación de azúcar del floema en hojas con deficiencia de Mg^{++} .

Según Cakmak y Yazici (2010), el mecanismo por el cual la deficiencia de Mg^{++} afecta el transporte de azúcar a través del floema no se comprende completamente, pero parece estar relacionado con la baja concentración de complejos de Mg-ATP, en donde se carga la sacarosa, en el floema. Se sabe que se requiere Mg-ATP para el funcionamiento óptimo de la H^+ -ATPasa, una enzima que proporciona energía para el proceso de carga del floema y favorece el transporte de azúcar entre las células del floema.

El amarillamiento en forma de clorosis intervenal en las hojas de las plantas más viejas es uno de los síntomas clásicos del estrés causado por la deficiencia de Mg^{++} , ya que, se sabe que hasta un 35% del Mg^{++} de las plantas está asociado a los cloroplastos. Los síntomas descritos ocurren más severamente en ocasiones solo en hojas maduras o basales.

3.3 Toxicidad del Mg en plantas

Aunque el Mg^{++} es un nutriente muy importante para las plantas, el exceso de este puede provocar problemas de toxicidad en el cultivo. Una toxicidad por Mg^{++} en las plantas, puede conllevar problemas relacionados con la absorción de otros nutrientes. Lo más usual es que la planta pierda la oportunidad de tener los niveles correctos de calcio y potasio que son nutrientes de acción muy delicada. También se afectan las relaciones catiónicas que tienen que ver con el antagonismo en el que participan, puede tener algún efecto antagónico específico tipo Mg/Ca. En suelos muy ácidos y poco aireados, el Mg^{++} asimilable puede alcanzar niveles muy elevados y las plantas lo absorben en cantidades superiores a sus necesidades, alcanzando distintos grados de toxicidad. El exceso de Mg^{++} es difícil que se produzca. Lo que puede ocurrir por un exceso de este mineral en nuestras plantas es que impida la absorción de nitrógeno (Moreno, 2007).

3.4 Nanopartículas

Las nanopartículas (NPs) son partículas de un tamaño inferior a 100 nanómetros (una milmillonésima parte de un metro). La ciencia encargada del estudio de estas pequeñas partículas es la nanotecnología.

La nanotecnología (NT) es la manipulación de la materia a nivel casi atómico para crear nuevas estructuras, materiales y dispositivos. Esta tecnología promete avances científicos en muchos campos, incluidos la medicina, la biología, los productos de consumo, la energía, ambiente y bioremedación y la agricultura (Gómez, 2018; Chavali *et al.*, 2019).

La aplicación de la NT en el sector agrícola y alimentario es una de las áreas de investigación de más rápido crecimiento. Innovar y crear tecnologías para producir alimentos suficientes y de alta calidad para alimentar a la población mundial siempre será el mayor desafío de nuestros tiempos. El uso excesivo e indiscriminado de agroquímicos para aumentar el rendimiento de los cultivos conduce al deterioro de la salud del suelo, daña los agroecosistemas, crea problemas relacionados con la

contaminación ambiental y también, crea resistencia a los insecticidas en insectos y patógenos de las plantas. En este contexto, la NT surge como un avance tecnológico que tiene el potencial de transformar el sector agrícola al proporcionar herramientas para la detección rápida de enfermedades de los cultivos y mejorar la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y crecer de una manera más rápida. La NT ofrece una amplia gama de oportunidades para que la producción agrícola produzca productos agrícolas como nanofertilizantes, nanoinsecticidas, nanoherbicidas y nanosensores, aumentando así de manera sostenible la producción de alimentos y reduciendo el impacto ambiental (Lira et al., 2018).

La mayoría de los estudios publicados indican que las NPs tienen un impacto positivo en el crecimiento de las plantas. El uso cuidadoso y sensato de la NT puede garantizar la seguridad alimentaria aumentando la producción en el sector primario, ya que su función principal es mejorar el crecimiento de las plantas y la productividad de los cultivos. Sin embargo, se requiere una experimentación extensa para determinar las concentraciones, tamaños y métodos de usos apropiados (Razzaq *et al.*, 2016).

El efecto de las NPs comienza a notarse desde el momento en que las semillas germinan, manifestándose en la mayor tasa de germinación y uniformidad que se observa durante el proceso final de germinación, lo que se debe principalmente a la penetración de los nanomateriales en las semillas, permitiéndoles imbibir el agua y micronutrientes, lo que acelera el desdoblamiento de las reservas y favorece las primeras etapas del metabolismo del proceso de germinación. Los estudios realizados por Mahmoodzadeh *et al.* (2013), demostraron que el efecto a nanoescala del titanio en las partículas de TiO_2 era claramente visible, con una tasa de germinación un 75% más rápida cuando se usaban NPs (tamaño de partícula de 20 nm a una concentración de 2000 mg L^{-1}).

Otros autores como Almutairi y Alharbi (2015), estudiaron el efecto de NPs de Ag sobre el porcentaje de germinación, tasa de germinación, longitud de raíces, peso fresco y peso seco en plántulas de melón, maíz y calabaza. Evaluaron siete

concentraciones (0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mg ml⁻¹) durante la germinación de semillas. Las tres especies se comportaron de manera diferente; las semillas de melón y calabaza tratadas mostraron una mayor germinación en comparación con las semillas no tratadas. Las NPs de Ag mostraron efectos tóxicos, es decir, inhibición del crecimiento de las raíces en el maíz, mientras que se observaron efectos estimulantes en el melón y calabaza a determinadas concentraciones de NPs de Ag. Este estudio muestra que pueden ocurrir efectos tanto negativos como positivos dependiendo de la respuesta del cultivo a la germinación y el desarrollo de la planta.

Numerosos estudios han analizado los efectos fisiológicos y bioquímicos que provocan la aplicación de diversas NPs sobre especies vegetales. Los resultados muestran que la respuesta a la aplicación depende del tamaño de las NPs, recubrimiento de la superficie, reactividad, dosis y concentración, así como el género y especie de la planta, condiciones de desarrollo, etapa fenológica de aplicación, y el método e intervalo de aplicación. La evidencia experimental muestra que la aplicación de altas concentraciones de NPs causa múltiples lesiones, reduciendo la capacidad de germinación de las semillas y la calidad/cantidad de la biomasa, lo que lleva a cambios en el metabolismo de los nutrientes, mayor concentración de NPs en las semillas, tallos y raíces; cambios bioquímicos y formación de especies reactivas de oxígeno (ROS). La interacción de las células vegetales con diversas NPs causa genotoxicidad en las plantas, incluyendo no solo el ADN sino también componentes celulares relacionados con la función cromosómica debido a la expresión genética alterada.

La NT por otro lado, y sus múltiples aplicaciones, se han convertido en un avance tecnológico que tiene el potencial de transformar la agricultura moderna, ya que las aplicaciones de la NT en la agricultura pueden utilizarse como herramientas de diagnóstico para la detección de enfermedades, la liberación controlada de moléculas funcionales y la mejora del envasado para garantizar una vida útil más prolongada de los productos alimenticios sin perder sus propiedades organolépticas y sanitarias. En este sentido, se ha avanzado en la producción de nanopesticidas

(para el control y prevención de plagas y enfermedades) utilizando pequeñas partículas de ingredientes activos de plaguicidas y otras NPs (Ti, Al, Zn, Si, Cu, Au, Mg, Ag, entre otros), con mayor estabilidad y biodegradación. En el periodo de poscosecha es necesario mantener las propiedades de frutas y verduras, para lo que se han optimizado nanorecubrimientos y nanolaminados para proporcionar una barrera al oxígeno, dióxido de carbono, humedad y radiación UV (Castro-Restrepo, 2017).

En las últimas décadas, ha existido una gran tendencia hacia el uso de NPs en diversas aplicaciones. Se han logrado mejoras significativas en su preparación y aplicaciones en la industria, la agricultura y la medicina. Uno de los materiales con mayor potencial es el óxido de magnesio (MgO), cuyas propiedades únicas lo convierten en un candidato adecuado para una amplia gama de aplicaciones. En términos generales, el MgO es un mineral sólido higroscópico de color blanco cuya red está compuesta por iones Mg^{++} e iones O_2^- . El MgO nanoestructurado se puede preparar mediante diversos métodos químicos (enfoque de abajo hacia arriba) o físicos (enfoque de arriba hacia abajo). Dependiendo de las condiciones de reacción, el material de partida principal o su concentración, se pueden obtener propiedades únicas del material, el MgO es potencialmente llamativo porque no es tóxico y es amigable con el medio ambiente, lo que permite su uso en una amplia gama de aplicaciones médicas, agronómicas y biotecnológicas (Kanjana, 2020).

El Mg^{++} puede provenir de distintas fuentes de fertilizantes como sulfato de magnesio ($MgSO_4$), óxido de magnesio (MgO) y NPs de óxido de magnesio (NPsMgO). En un experimento realizado en el crecimiento y desarrollo del algodón se utilizaron NPsMgO a diferentes concentraciones (20, 40, 60, 80 y 100 ppm) con un diseño aleatorio factorial, se reveló que 60 ppm de NPsMgO era la dosis óptima para mejorar el valor de clorofila, el peso de la cápsula y el rendimiento de la semilla de algodón (Kanjana, 2020).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización del sitio experimental

El presente trabajo se llevó a cabo en el invernadero número 2 del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, con coordenadas geográficas: 25°27'36.16" de latitud Norte y 100°58'06.08" latitud Oeste, a una altitud de 1742 msnm.

4.2 Material genético

Para este estudio se utilizó plántula de chile serrano (*Capsicum annuum* 'Serrano') variedad comercial "Plata". Esta variedad presenta planta vigorosa, con un fuerte sistema radicular, muy productiva y mantiene la calidad durante todo el ciclo, se considera una de las variedades líderes en el mercado de México. Los frutos son uniformes, con un color verde intenso, de 9 a 11 cm de longitud, con una pulpa muy gruesa y de sabor muy picante, de la empresa CapGen Seeds.

4.3 Trasplante

Las plántulas de chile serrano se trasplantaron en macetas de polietileno color negro de 5 litros de capacidad durante el ciclo primavera-verano del año 2023, se utilizó un sustrato con una combinación de perlita (60%) y vermiculita (40%). Antes del trasplante, las plántulas fueron aclimatadas para que el cambio de ambiente no afectara su desarrollo. Posteriormente, se establecieron 7 macetas (unidades experimentales) para cada tratamiento, con un total de 35 plántulas trasplantadas.

4.4 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar, con cinco tratamientos de NPsMgO (0, 10, 20, 30, 50 ppm), y siete repeticiones por tratamiento.

4.5 Manejo nutricional

Una vez colocadas las plantas en el invernadero, se utilizó la solución nutritiva Hoagland (Cuadro 1), excluyendo el nutriente aplicado en forma de nanopartícula (NPsMgO).

Cuadro 1. Composición de soluciones madre para preparar Hoagland.

Compuesto	Concentración ml/L
KNO ₃	24
Ca(NO ₃) ₂	16
(NH ₄) ₃ PO ₄	8
MoO ₃ .H ₂ O	8
Quelato de Fe (FeSO ₄ +Na ₂ EDTA)	2
Micronutrientes	8

Cada planta recibió dosis de NPsMgO en suspensión de acuerdo con la concentración correspondiente de cada tratamiento (Cuadro 2), aplicando 200 ml por maceta del tratamiento con NPsMgO correspondiente, tres veces por semana.

Las aplicaciones de NPsMgO se llevaron a cabo los lunes, miércoles y viernes, en el riego directamente a la raíz, utilizando un vaso Beaker (de precipitado).

Diariamente a cada planta se le suministraron 400 ml de agua potable directamente al sustrato.

Cuadro 2. Tratamientos con NPsMgO aplicados a las plantas de chile serrano cultivadas en invernadero.

Tratamiento	NPsMgO (ppm)
T1	0
T2	10
T3	20
T4	30
T5	50
ppm = partes por millón	

4.6 Plagas y enfermedades.

A lo largo del desarrollo del experimento, no se presentaron problemas con plagas o enfermedades. Se realizó un monitoreo diario para verificar que no hubiera factores que pudieran afectar el desarrollo de las plántulas.

V. VARIABLES EVALUADAS

5.1 Altura del tallo (AT)

A los 41 días después del trasplante se midió la altura del tallo (AT), desde la base del tallo hasta el punto apical más alto, y se expresó en centímetros (cm).

5.2 Diámetro del tallo (DT)

La medición del tallo se realizó con ayuda de un Vernier, midiendo los primeros 10 cm del tallo a partir de la base o antes de la primera bifurcación, expresando los datos en milímetros (mm).

5.3 Número de flores por planta (NFLOR)

Se contabilizó la cantidad de flores que tenía cada planta al momento de la evaluación.

5.4 Número de frutos por planta (NFRUT)

Se contabilizaron todos los frutos desarrollados que tenía cada planta, para determinar si alguna de las concentraciones influía en la producción de frutos.

5.5 Número de bifurcaciones por planta (NBIFUR)

Se contaron todas las bifurcaciones que contenía cada una de las plantas al momento de la evaluación.

5.6 Contenido relativo de clorofila (CLB, CLM1, CLM2, CLA)

Con ayuda de un SPAD 502 se determinó el contenido relativo de clorofila en las hojas (correlacionado con el color verde). Este valor se calcula con base a la cantidad de luz absorbida por la clorofila en las hojas, en dos regiones de longitud de onda (roja y cercanas a infrarroja), donde la absorción de la luz es diferente.

CLB = base de la planta

CLM1 = parte media de la planta, lectura 1

CLM2 = parte media de la planta, lectura 2

CLA = ápice de la planta

5.7 Peso fresco de frutos (PFFRUTO)

Se cortaron cuidadosamente cada uno de los frutos de las plantas para obtener su peso fresco en gramos (g) en una balanza semianalítica.

5.8 Peso seco de frutos (PSFRUTO)

Para esta variable se colocaron los frutos ya cosechados en bolsas de papel de estraza y se dejaron secar en una estufa de secado a 35 °C, posteriormente se pesaron en una balanza semianalítica y se obtuvieron los resultados en gramos (g).

5.9 Longitud de raíz (LR)

Se separó con cuidado la raíz del sustrato para posteriormente colocarla sobre una superficie plana y poder medirla con ayuda de una regla, obteniendo los datos en centímetros (cm).

5.10 Peso seco de raíz (PSRAÍZ)

Se eliminó el exceso de sustrato de la raíz y cada una se colocó en bolsas de papel estraza con pequeños orificios, enseguida en una estufa de secado (72 °C), por 72 horas, después se obtuvo el peso seco en gramos (g) con una balanza semianalítica.

5.11 Peso seco de tallo (PSTALLO)

Se coloraron los tallos en bolsas de papel estraza con pequeños orificios para secarlos en una estufa de secado (72 °C), por 72 horas, posteriormente, con ayuda de una balanza semianalítica se obtuvo el peso seco representado en gramos (g).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza para las variables agronómicas y fisiológicas evaluadas bajo condiciones de invernadero (Cuadros 3, 4 y 5), se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las variables contenido de clorofila en la parte media de la planta 1 (CLM1), número de bifurcaciones (BIF), altura a la primera bifurcación (AltB1), altura a la segunda bifurcación (AltB2), peso fresco del fruto (PFF) y peso seco del fruto (PSF). Mientras tanto, las variables número de frutos (NFRUT), longitud de raíz (LR), peso seco de la raíz (PSR) y peso seco del tallo (PSTa) manifestaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$).

Asimismo, los resultados obtenidos en el análisis de varianza para variables agronómicas y fisiológicas evaluadas bajo condiciones de invernadero (Cuadros 3 y 4), para las variables contenido de clorofila en la base (CLB), contenido de clorofila en la parte media de la planta 2 (CLM2), contenido de clorofila en el ápice de la planta (CLA), diámetro de tallo (DT) y número de flores (NFLOR) no se presentaron diferencias significativas. Esto indica que los diferentes tratamientos con NPsMgO, no modificaron la expresión de estas variables.

Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para variables fisiológicas evaluadas en plantas de chile serrano variedad Plata, bajo condiciones de invernadero con la aplicación de NPsMgO.

F.V.	G.L.	CLB (Spad)	CLM1 (Spad)	CLM2 (Spad)	CLA (Spad)
Tratamiento	4	67.84 NS	78.71*	73.88 NS	41.53 NS
Error	30	32.55	27.19	52.70	23.09
C.V.		13.03	12.16	16.55	11.08

*= Diferencias Significativas ($P \leq 0.05$); NS= Diferencias no Significativas; F.V.= Fuente de variación; G.L.= Grados de libertad; CLB= Contenido relativo de clorofila en la base de la planta; CLM1= Contenido relativo de clorofila en la parte media de la planta 1; CLM2= Contenido relativo de clorofila en la parte media de la planta 2; CLA= Contenido relativo de clorofila en el ápice de la planta; C.V.= Coeficiente de variación.

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile serrano variedad Plata, bajo condiciones de invernadero con la aplicación de NPsMgO.

F.V.	G.L.	DT (mm)	BIF	AltB1 (cm)	AltB2 (cm)	NFLOR	NFRUT
Tratamiento	4	0.26NS	3.18*	7.81*	12.04*	2.71NS	2.44**
Error	30	0.13	1.10	3.43	4.15	3.85	0.57
C.V.		10.07	16.57	8.61	6.20	30.55	38.09

*= Diferencias Significativas ($P \leq 0.05$); **= Diferencias Altamente Significativas ($P \leq 0.001$); NS= Diferencias no Significativas; F.V.= Fuente de variación; G.L.= Grados de libertad; DT= Diámetro de tallo; BIF= Número de bifurcaciones por planta; AltB1= Altura a la primera bifurcación; AltB2= Altura a la segunda bifurcación; NFLOR= Número de flores por planta; NFRUT= Número de frutos por planta; C.V.= Coeficiente de variación.

Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables fisiológicas evaluadas en plantas de chile serrano, bajo condiciones de invernadero con la aplicación de NPsMgO.

F.V.	G.L.	LR (cm)	PSR (g)	PSTa (g)	PFF (g)	PSF (g)
Tratamiento	4	197.50**	1.66**	3.01**	1.85*	0.08*
Error	30	23.22	0.08	0.34	0.52	0.03
C.V.		19.53	17.91	15.88	41.14	73.88

*= Diferencias Significativas ($P \leq 0.05$); **= Diferencias Altamente Significativas ($P \leq 0.001$); F.V.= Fuente de variación; G.L.= Grados de libertad; LR= Longitud de raíz; PSR= Peso seco de la raíz; PSTa= Peso seco del tallo; PFF= Peso fresco de fruto; PSF= Peso seco de fruto; C.V.= Coeficiente de variación.

En la comparación de medias para el contenido de clorofila evaluado bajo condiciones de invernadero (Cuadro 6), las variables CLB, CLM2 y CLA no mostraron diferencias significativas. Por otra parte, se evidenciaron diferencias significativas en la variable CLM1. Eso es, se observó un incremento de clorofila con relación al incremento de NPsMgO, en el follaje de la parte media de la planta.

El tratamiento 5 (50 ppm) mostró un CLM1 de 47.41, superior en comparación con los demás tratamientos, específicamente con relación al testigo (0 ppm), que mostró un CLM1 de 38.55. Por lo tanto, se puede deducir que a mayor concentración de NPsMgO, se eleva el CLM1, mientras que, a concentraciones menores a 50 ppm se tiene un comportamiento estadísticamente igual al testigo.

En un estudio realizado por Reyes *et al.* (2017), encontraron que la aplicación foliar de Mg tuvo un incremento en el índice del verdor de las hojas en el cultivo de *Lilium formosanum* 'Acapulco'. Esto es consistente con lo que describieron Cakmak y Yazici (2010), mencionando al Mg como un elemento básico de la estructura molecular de la clorofila, por lo tanto, la presencia o ausencia de Mg afecta el contenido de clorofila de las plantas.

Las plantas con una deficiencia de Mg suelen presentar clorosis internerval en las hojas ubicadas en el tercio medio, que va progresando hacia las hojas viejas (Zelia *et al.*, 2017).

Cuadro 6. Comparación de medias del contenido relativo de clorofila por tratamiento, en plantas de chile serrano aplicando NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento (ppm)	CLB (Spad)	CLM1 (Spad)	CLM2 (Spad)	CLA (Spad)
Testigo	47.22 a	38.55 b	46.42 a	43.41 a
10	40.58 a	42.94 ab	41.60 a	41.70 a
20	42.55 a	41.04 ab	40.34 a	41.28 a
30	41.48 a	44.41 ab	42.85 a	42.87 a
50	46.92 a	47.41 a	48.00 a	47.41 a
Media	43.75	42.87	43.84	43.33
Tukey	8.84	8.08	11.25	7.45

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; CLB = Contenido de clorofila en la base de la planta; CLM1 = Contenido relativo de clorofila en la parte media de la planta 1; CLM2 = Contenido relativo de clorofila en la parte media de la planta 2; CLA = Contenido relativo de clorofila en el ápice de la planta; ppm= Partes por millón.

Al realizar comparación de medias de las variables diámetro del tallo, número de bifurcaciones, altura a la primera y segunda bifurcación, número de flores y número de frutos (Cuadro 7), para la variable número de bifurcaciones se observó que los tratamientos 10, 20 y 30 ppm en comparación al testigo resultaron estadísticamente iguales, sin embargo, el tratamiento 50 ppm obtuvo el valor más alto con 7.14 en comparación al testigo que presentó 5.28 en promedio. Mientras que para la variable altura a la segunda bifurcación, solo el tratamiento con 10 ppm alcanzó 34.21 cm, siendo estadísticamente diferente al testigo que midió 30.81 cm. Para la variable número de frutos, los tratamientos 20 ppm, 30 ppm y 50 ppm comparados con el testigo, resultaron estadísticamente iguales, no obstante, el tratamiento 10 ppm obtuvo el valor más alto (3 frutos), superando al testigo en 1.29.

Las variables restantes no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, por lo tanto, la aplicación de NPsMgO a concentraciones menores a 50 ppm, parece no afectar en gran medida al diámetro del tallo, número de flores y altura a la primera bifurcación.

Reyes *et al.* (2017) mencionaron que la aplicación foliar de Mg influye positivamente en la altura y calidad de los tallos, así como el número de hojas. Esto indicaría que la correcta aplicación se relaciona con mayor tasa de crecimiento vegetal.

Investigaciones previas realizadas por Yfran *et al.* (2024), han evaluado el impacto de nanopartículas de calcio/magnesio en plantas de limón 'Eureka'. Los datos obtenidos mostraron que el tratamiento con nanofertilizante de calcio/magnesio (4 L/ha⁻¹) resultó en un incremento significativo en el porcentaje del fruto.

Por otra parte, se ha encontrado que una baja concentración de Mg en cítricos (*Citrus spp.*) disminuye considerablemente la altura de la planta (Xiao *et al.*, 2014).

Considerando el efecto de otras NPs, Méndez-Argüello *et al.* (2016) reportaron que la aplicación foliar de NPsZnO a una concentración de 1.25 y 2.5 molar, mejoró considerablemente algunas variables fisiológicas, entre ellas el crecimiento de la planta y la cantidad de biomasa en plantas de *Capsicum annum*.

Cuadro 7. Comparación de medias de variables agronómicas en plantas de chile serrano con tratamiento de NPsMgO.

Tratamiento (ppm)	DT (mm)	BIF	AltB1 (cm)	AltB2 (cm)	NFLOR	NFRUT
Testigo	3.32 a	5.28 b	20.57 a	30.81 b	6.57 a	1.71 b
10	3.67 a	6.28 ab	21.50 a	34.21 a	5.85 a	3.00 a
20	3.85 a	6.42 ab	20.35 a	33.77 ab	6.85 a	1.95 ab
30	3.70 a	6.57 ab	22.57 a	32.71 ab	5.71 a	1.45 b
50	3.57 a	7.14 a	22.57 a	32.75 ab	7.14 a	1.85 ab
Media	3.62	6.34	21.51	32.85	6.42	1.99
Tukey	0.56	1.62	2.87	3.16	3.04	1.17

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; DT= Diámetro de tallo; BIF= Número de bifurcaciones; AltB1= Altura a la primera bifurcación; AltB2= Altura a la segunda bifurcación; NFLOR= Número de flores por planta; NFRUT= Número de frutos por planta; ppm= Partes por millón.

En el Cuadro 8 se presenta la comparación de medias de las variables LR, PSR, PSTa, PFF y PSF. La variable PSTa resultó estadísticamente igual en las concentraciones 10, 20, 30 y 50 ppm, pero estadísticamente superiores al testigo, que presentó el menor valor con 2.58 g. Por otra parte, en la variable PFF el testigo (0 ppm) superó estadísticamente (2.24 g) a la concentración con 50 ppm, que obtuvo 2.01 g. Asimismo, la variable PSF no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, por tal razón, la aplicación de NPsMgO a concentraciones menores de 50 ppm parece no influir en gran medida al peso del fruto, tanto fresco como seco.

Para la variable LR la concentración testigo (0 ppm) presentó el valor más bajo con 16.78 cm, con respecto a las demás concentraciones, mientras tanto, la concentración de 30 ppm mostró el valor más alto con 29.75 cm. Para la variable PSR la concentración con 30 ppm presentó un valor de 2.01 g, siendo estadísticamente superior a las concentraciones con 10, 20 y 50 ppm, en cambio, la concentración testigo mostró el valor más bajo con 0.78 g. Por lo tanto, se observó

que la aplicación de NPsMgO a una concentración de 30 ppm fue la óptima para el crecimiento y desarrollo de la raíz.

La aplicación de NPsMgO en plantas de trigo de manera foliar, mejoró considerablemente la longitud y biomasa de la raíz, así mismo, incrementó la calidad de puntas de raíz, lo que permite una correcta absorción de otros nutrientes (Rathore y Tarafdar., 2015).

En un estudio realizado por Prasad *et al.* (2012), reportaron que, en semillas y plantas de cacahuete (*Arachis hypogaea*) tratadas con NPs promovió una mejor germinación y elongación de raíz.

Las NPsMgO en una concentración óptima pueden resultar demasiado valiosas en las prácticas agrícolas para facilitar la fisiología y bioquímica de las plantas, por ende, brindan mayores beneficios agroeconómicos (Cai *et al.*, 2018).

Cuadro 8. Comparación de medias de las variables longitud de raíz, peso seco de raíz y tallo, peso fresco y seco de fruto por tratamiento en plantas de chile serrano aplicando NPsMgO.

Tratamiento (ppm)	LR (cm)	PSR (g)	PSTa (g)	PFF (g)	PSF (g)
Testigo	16.78 b	0.78 c	2.58 b	2.24 a	0.28 a
10	23.00 ab	1.47 b	3.75 a	0.98 b	0.12 a
20	24.42 a	1.77 ab	3.97 a	2.07 ab	0.30 a
30	29.75 a	2.01 a	4.27 a	1.52 ab	0.12 a
50	29.35 a	1.87 ab	3.98 a	2.01 ab	0.36 a
Media	24.66	1.58	3.71	1.76	0.23
Tukey	7.47	0.43	0.91	1.12	0.27

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; LR= Longitud de raíz; PSR= Peso seco de la raíz; PSTa= Peso seco del tallo; PFF= Peso fresco del fruto; PSF= Peso seco del fruto; ppm= Partes por millón.

En el Cuadro 9 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson, la variable contenido de clorofila en la parte media de la hoja (CLM1) está relacionada significativamente con las variables número de bifurcaciones ($r=0.420^*$), longitud de raíz ($r=0.480^{**}$) y peso seco de la raíz ($r=0.340^*$).

La variable número de bifurcaciones mostró correlación con la variable altura a la segunda bifurcación ($r=0.371^*$), longitud de raíz ($r=0.532^{**}$), peso seco de la raíz ($r=0.567^{**}$) y peso seco del tallo ($r=0.564^{**}$), por otra parte, las variables número de frutos, peso fresco del fruto y peso seco del fruto no presentaron correlación con el número de bifurcaciones.

Se presentó una correlación significativa entre las variables número de frutos con peso fresco del fruto ($r=-0.342^*$); demostrando que, para las demás variables no hubo correlación con el número de frutos.

Para la variable altura a la segunda bifurcación se mostraron un par de correlaciones con las variables peso seco de la raíz ($r=0.505^{**}$), así como el peso seco del tallo ($r=0.593^{**}$), por el contrario, las variables restantes no presentaron correlación con la variable altura a la segunda bifurcación.

La longitud de raíz presentó correlación altamente significativa con las variables peso seco de la raíz ($r=0.660^{**}$) y peso seco del tallo ($r=0.629^{**}$), las variables restantes peso fresco del fruto y peso seco del fruto no presentaron correlación con la variable longitud de raíz.

Con respecto a la variable peso seco de la raíz, solo mostró correlación con la variable peso seco del tallo ($r=0.823^{**}$).

En cuanto a la variable peso seco del tallo no se presentó correlación significativa con las variables peso fresco del fruto y peso seco del fruto respectivamente.

Por último, en la variable peso fresco del fruto se observó correlación altamente significativa con la variable peso seco del fruto ($r=0.727^{**}$).

Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Pearson para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile serrano (*Capsicum annuum*) con tratamientos de NPsMgO, bajo condiciones de invernadero.

Variables	BIF	NFRUT	AltB2 (cm)	LR (cm)	PSR (g)	PSTa (g)	PFF (g)	PSF (g)
CLM1	0.420*	-0.223 ^{NS}	0.159 ^{NS}	0.480**	0.340*	0.299 ^{NS}	-0.220 ^{NS}	-0.029 ^{NS}
BIF		-0.121 ^{NS}	0.371*	0.532**	0.567**	0.564**	0.184 ^{NS}	0.223 ^{NS}
NFRUT			0.331 ^{NS}	-0.170 ^{NS}	0.039 ^{NS}	0.089 ^{NS}	-0.342*	-0.243 ^{NS}
AltB2 (cm)				0.206 ^{NS}	0.505**	0.593**	0.036 ^{NS}	0.113 ^{NS}
LR (cm)					0.660**	0.629**	-0.124 ^{NS}	0.039 ^{NS}
PSR (g)						0.823**	-0.052 ^{NS}	0.040 ^{NS}
PSTa (g)							-0.174 ^{NS}	-0.029 ^{NS}
PFF (g)								0.727**

*= Significativas ($P \leq 0.05$); **= Altamente Significativas ($P \leq 0.001$); NS= No Significativas; CLM1= Contenido relativo de clorofila en la parte media de la planta 1; BIF= Número de bifurcaciones por planta; NFRUT= Número de frutos por planta; AltB2= Altura a la segunda bifurcación; LR= Longitud de raíz; PSR= Peso seco de la raíz; PSTa= Peso seco del tallo; PFF= Peso fresco del fruto; PSF= Peso seco del fruto.

VII. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis de varianza, se observó en las variables número de frutos, longitud de raíz, peso seco de la raíz y peso seco del tallo, que la aplicación de NPsMgO, influyó en la expresión de estos parámetros.

Al aplicar NPsMgO se logró mayor acumulación de materia seca en el tallo (PSTa), indicando la importancia que tiene el magnesio en la fotosíntesis, como la base estructural de la molécula de clorofila.

En la variable peso fresco del fruto, el testigo superó estadísticamente a los demás tratamientos.

La aplicación de NPsMgO al sustrato aumentó el contenido de clorofila en la parte media de la planta (CLM1), siendo el tratamiento de 50 ppm el que presentó los valores más altos, como resultado de la acumulación de estos pigmentos.

Para las variables de longitud de raíz y peso seco de la raíz, la concentración de 30 ppm resultó ser estadísticamente superior en comparación con las concentraciones de 10, 20 y 50 ppm. Por ello, se determina que la aplicación de NPsMgO a una concentración de 30 ppm fue la más adecuada para favorecer el crecimiento y desarrollo de la raíz.

Las variables diámetro del tallo, número de flores y altura a la primera bifurcación no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Por lo tanto, la aplicación de NPsMgO en concentraciones inferiores a 50 ppm no parece tener un impacto considerable en estas variables.

La relación entre el contenido de clorofila en la parte media de la planta 1 con el número de bifurcaciones, longitud de raíz y peso seco de la raíz, resultó positiva significativa.

Correlaciones altamente significativas se observaron entre las variables longitud de raíz y peso seco de la raíz, asimismo con el peso seco del tallo.

Se obtuvo también, una correlación altamente significativa entre el peso seco de la raíz y el peso seco del tallo. Del mismo modo, se observó una correlación altamente significativa entre el peso fresco del fruto con el peso seco del fruto.

Los resultados indican que la aplicación de NPsMgO tienen un efecto significativo en el desarrollo de las plantas, no obstante, su efecto depende de la concentración aplicada.

VIII. LITERATURA CITADA

Almutairi, Z., and A. Alharbi. 2015. Effect of Silver Nanoparticles on Seed Germination of Crop Plants. *Journal of advances in agriculture*, 4(1), 280–285. <https://doi.org/10.24297/jaa.v4i1.4295>

Cai, L., Liu, M., Liu, Z., Yang, H., Sun, X., Chen, J., Xiang, S., & Ding, W. 2018. NPsMgO Can Boost Plant Growth: Evidence from Increased Seedling Growth, Morpho-Physiological Activities, and Mg Uptake in Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Molecules*, 23(12), 3375.

Cakmak, I. and A.M. Yazici. 2010. Magnesium: Forgotten elements in Crop Production. *Better Crops* 94(2):23-25.

Cakmak, I. and E.A Kirkby. 2008. *Physiologia Plantarum*. 133:692-704.

Castro-Restrepo, D. 2017. Nanotecnología en la agricultura. *Revista Bionatura. Nanotechnology in agriculture.*, 48-50. <https://revistabionatura.com/files/2017.03.03.9.pdf>

Chavali M.S., Nikolova M.P. Metal oxide nanoparticles and their applications in nanotechnology. *SN Appl. Sci.* 2019; 1:607. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0592-3>

Gómez-Garzón, M. 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de medicina y cirugía*, 27(2). pp. 75-80 <https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191>

Kanjana, D. 2020. Foliar application of magnesium oxide nanoparticles on nutrient element concentrations, growth, physiological, and yield parameters of cotton. *Journal of Plant Nutrition*, 43(20). pp. 3035 - 3049.

Lira S., R. H., B. Méndez Argüello, G. De los Santos Villarreal, e I. Vera Reyes. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura sostenible. *Acta Universitaria*. Vol. 28(2). <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>

Mahmoodzadeh, H., M. Nabavi, and H. Kashefi. 2013. Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus*). Journal of Ornamental and Horticultural Plants. 25-32.

Méndez, B., Vera, I., Mendoza, E., García, L.A., Puente, B.A., Lira, R.H. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. Nova Scientia. 8(17), 140-156.

Moreno R., A. 2007. Elementos nutritivos. Asimilación, funciones, toxicidad e Indisponibilidad en los suelos. Coahuila de Zaragoza, México. Amertown International S.A.

Prasad, T.N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K.R. y Pradeep, T. 2012. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanuts. Journal of Plant Nutrition, 35:905-927.

Rathore, I., & Tarafdar, J. C. 2015. Perspectives of biosynthesized magnesium nanoparticles in foliar application of wheat plant. Journal of Bionanoscience, 9(3), 209-214.

Razzaq, A., R. Ammara, H.M. Jhanzab, T. Mhamood, A. Hafeez, and S. Hussain. 2016. A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. Journal of Nanoscience and Technology. 2(1), 55-58.

Reyes Alemán, M. del R., Franco Mora, O., Morales Rosales, E. J., & Pérez López, D. de J. 2017. Influencia del magnesio y zinc en la altura de planta y verdor de hojas en *Lilium*. Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes, 70, 31–37. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2017701825>.

Xiao, J. X., Hu, C. Y., Chen, Y. Y., Yang, B., & Hua, J. 2014. Effects of low magnesium and an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth, magnesium distribution and photosynthesis of two citrus cultivars. Scientia Horticulturae, 177, 14-20.

Yfran Elvira, M. de las M., Chabbal Monzón, M. D., Píccoli Delbón, A. B., & I Giménez, L. 2024. Incidencia de las nanopartículas de calcio y magnesio sobre la

productividad del limón Eureka. *Cultivos Tropicales*, 45(3), <https://cu-id.com/2050/v45n3e05>.

Zelia, S. A., Fernando, W. A., Hiyoshi, N. R., Filho, C., Bernardes, A., & Waldir, J. 2017. Symptoms of Macronutrients Deficiency in Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agrociencia Uruguay*, 31–43. <https://doi.org/10.31285/agro.21.2.5>.