

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN AGROPECUARIA**



**Respuesta del tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) a la
aplicación foliar de nanopartículas de magnetita**

Por:

JAZMÍN DOLORES ESPINO REYES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ADMINISTRADOR

Saltillo, Coahuila, México
Junio, 2023

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN AGROPECUARIA**

**Respuesta del tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) a la
aplicación foliar de nanopartículas de magnetita**

Por:
JAZMÍN DOLORES ESPINO REYES

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ADMINISTRADOR

Aprobada por:

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Asesor principal

Dr. José Antonio González Fuentes
Coasesor

M.C. Rolando Ramírez Segoviano
Coasesor

M.C. Rafael de la Rosa González
Coordinador Interino de la División de Ciencias Socioeconómicas



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio, 2023.

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

DECLARO QUE:

La presente investigación titulada “**Respuesta del tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita**” es una elaboración propia, sin contener de forma total o parcial citas, imágenes, tesis, artículos y otras obras sin tener cita referida, donde señale su autor.

Estando consciente que, en caso de cometer plagio, será objeto de sanción por medio del Comité Editorial y/o legales, así mismo como el derecho de no aprobación de la misma.

PASANTE



Jazmín Dolores Espino Reyes

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme llegar hasta este punto y nunca dejarme sola, por guiar mi camino, darme fortaleza y sabiduría para continuar aún en los momentos en que yo creía que no podía más, por darme una familia maravillosa y rodearme de personas increíbles que han hecho mi vida mejor.

A mis padres, porque sin ustedes nada de esto sería posible, porque gracias a su entrega, apoyo y cariño he logrado dar cada uno de los pasos que me han conducido hasta este momento. Gracias por ser la muestra de trabajo, esfuerzo y perseverancia más importante que tengo. Gracias por nunca soltar mi mano, por darme siempre lo mejor e impulsarme a conseguir todo aquello que deseo. Son mi motor, mi más grande inspiración y fuente de amor. Este logro también es suyo y ha sido siempre inspirado en ustedes.

A mi Alma Mater, por recibirme y hacerme sentir en casa desde mi ingreso, por las oportunidades que me brindaste como estudiante, por cada aprendizaje que adquirí durante mi estancia, por todas las buenas personas que conocí y por las experiencias que me han ayudado a construir lo que soy.

A mi director de tesis, el Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, gracias por depositar su confianza en mi y darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, que ha sumado un sinnúmero de cosas a mi vida profesional y personal. Gracias por todo el conocimiento que ha compartido conmigo siempre con tanta paciencia y dedicación. Desde el día uno he admirado el gran docente que es y con el tiempo, también la calidad de ser humano que lo caracteriza. Gracias por inspirarme y alentarme continuamente a dar lo mejor de mí. Ha sido una fortuna ser siempre recibida con una sonrisa, a pesar de hacer mil preguntas en cada visita.

A mis asesores, Dr. José Antonio González Fuentes, M.C. Rolando Ramírez Segoviano y Dra. Lydia Venecia Gutiérrez López. *Gracias por el apoyo que me han brindado, por no dudar en ser partícipes de este proyecto, por su paciencia, disponibilidad y amabilidad para revisar este trabajo y acompañarme en ello.*

A Salma Reyes Macín, *por ofrecernos tu apoyo para llevar a cabo parte importante de este trabajo y por todas las horas que estuviste compartiendo con nosotros, aprecio mucho cada minuto que nos dedicaste.*

A Conchita, *gracias por tenerme tanta paciencia y apoyarme con los trámites una y otra vez.*

DEDICATORIAS

A mis padres, Verónica Reyes Méndez y Silvano Federico Espino, *como una muestra de cariño y eterno agradecimiento a quienes siempre me han demostrado su amor y apoyo incondicional, a quienes sin escatimar esfuerzo alguno han dedicado gran parte de su vida para educarme y darme siempre lo mejor, a quienes nunca podré pagar todo aquello que me han brindado ni aún con las riquezas más grandes del mundo. Todo lo que soy es de ustedes. Los amo con todo mi ser.*

Al Dr. Luis Alonso, *por creer en mí y ser uno de los pilares fundamentales para poder concluir este trabajo.*

A mis hermanas, María y Marisol Espino Reyes, *que sin duda, han sido una parte muy importante en este y en todos los pasos que Dios me ha permitido dar. Gracias por estar para mí en cada momento, aún a la distancia. Por apoyar mis sueños, por consentirme y siempre hacerme sentir que todo estará bien, por enseñarme tantas cosas e impulsarme a crecer. Son mi fuente de inspiración y ejemplo de superación. Las amo infinitamente y admiro todo lo que son.*

A mi tía Agus, *por estar presente y alentarme en cada etapa de mi vida, por su apoyo incondicional y por recibirme siempre con amor y alegría.*

A mis amigos, Moisés Verdín, Isabel Torres, Mary Campa, Francisco Rodríguez, Betzi Silva, Daniela Gutiérrez, Carlos Corral, Emmanuel Pozos, Susana Calpulalpan, Ángel Aguilar, Omar Galindo, Rodolfo Martínez y Francisco Agapito, *por tener siempre palabras de apoyo y cariño, por ayudarme cuando lo necesité, por abrazarme y acompañarme en momentos buenos y en aquellos difíciles, por enseñarme cosas nuevas, y hacer todo más fácil y divertido. Tienen un lugar muy especial en mi corazón. Los quiero mucho, los admiro y les deseo el mayor de los éxitos en todas las etapas de su vida.*

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	3
1.1.1 Objetivos específicos	3
1.2 Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Nanotecnología	4
2.2 Nanotecnología en agricultura	5
2.3 Nanofertilizantes	6
2.4 Micronutrientes	8
2.5 Hierro	8
2.6 Magnetita (Fe ₃ O ₄)	10
2.7 Cultivo de tomate en México	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1 Localización del experimento	19
3.2 Material vegetal	19
3.3 Condiciones del experimento	19
3.4 Tratamientos	21
3.5 Variables de respuesta	22
3.6 Diseño experimental y análisis estadístico	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1 Rendimiento	25
4.2 Peso seco	27
4.3 Diámetro basal y diámetro medio	29
4.4 Índice de cosecha en base seca	32
4.5 Firmeza	33
4.6 Concentración de potasio en fruto y hojas	35
4.7 Concentración de nitrógeno en hojas	37
4.8 Concentración de fósforo, calcio y magnesio en hojas	39
V. CONCLUSIONES	41
VI. BIBLIOGRAFÍA	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita sobre el rendimiento de fruto en cultivo de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	26
Figura 2. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita sobre el peso seco total en plantas de tomate cherry(<i>Solanum lycopersicum</i> L.).	28
Figura 3. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.), para peso seco del tallo.....	29
Figura 4. Efecto de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de nanopartículas de magnetita para diámetro basal de tallo en tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	31
Figura 5. Efecto de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de nanopartículas de magnetita sobre diámetro medio de tallo en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	31
Figura 6. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita sobre el índice de cosecha en base seca en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	33
Figura 7. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) para firmeza de fruto.....	34
Figura 8. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en la concentración de potasio (K) en fruto.....	36
Figura 9. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en la concentración de potasio (K) en hojas.....	36
Figura 10. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en la concentración de nitrógeno (N) en hojas.....	38
Figura 11. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en la concentración de fósforo (P) en hojas.....	39
Figura 12. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en la concentración de calcio (Ca) en hojas.....	40
Figura 13. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en la concentración de magnesio (Mg) en hojas.....	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) para rendimiento por planta y peso seco de hoja, tallo y total.....	26
Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) para diámetro basal y medio de tallo e índice de cosecha en seco.....	30
Cuadro 3. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) para parámetros de calidad en fruto.....	34
Cuadro 4. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en la concentración de macronutrientes en hoja.....	38

RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es un cultivo de gran importancia económica en México y el mundo debido a su elevada demanda comercial. Sin embargo, el uso indiscriminado de agroquímicos y su baja eficiencia, el deterioro a la salud del suelo, y el aumento del costo productivo crea la necesidad de desarrollar tecnología que nos permita aumentar la productividad de forma sustentable. La nanotecnología surge como una respuesta a ello; los nanofertilizantes son una nueva generación de fertilizantes que ofrecen una serie de beneficios en comparación con los fertilizantes convencionales, por lo que es necesario indagar sobre su uso potencial en la agricultura moderna.

El objetivo de este experimento ha sido determinar el efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita como fuente de hierro sobre diversos parámetros en el cultivo de tomate cherry. Mediante un diseño de bloques al azar, se evaluaron cuatro tratamientos con diferentes concentraciones de magnetita: T1 – 0 ppm, T2 – 250 ppm, T3 - 500 ppm y T4 - 1000 ppm, realizando cinco aplicaciones foliares con intervalo de 15 días entre ellas.

La aplicación de magnetita presentó un efecto tóxico sobre el rendimiento, con una disminución con respecto al testigo, de 11.49% y 17.26% al aplicar 250ppm y 1000 ppm, respectivamente. Se observó una disminución en el índice de cosecha en base seca de 22.72% en comparación con el testigo. Además, causó decrementos en la concentración foliar de N y K, e incremento en la concentración del K en el fruto, por lo que se sugiere que tiene impacto sobre la absorción y translocación de estos nutrientes, así como la relación entre crecimiento vegetativo y generativo.

Palabras clave: *Nanotecnología, nanofertilizantes, hierro, tomate.*

ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a crop of great economic importance in Mexico and over the world due to its high demand. However, the indiscriminate use of agrochemicals and their low efficiency, the deterioration of the soil health, and the increase in production costs create the need to develop technology that allows increasing productivity in a sustainable fashion. Nanotechnology emerges as a response to this; nanofertilizers are a new generation of fertilizers that offer more benefits compared to conventional fertilizers, so it is necessary to investigate their potential use in modern agriculture.

The objective of this experiment was to determine the effect of the application of magnetite nanoparticles as a source of iron, on various parameters in cherry tomato. Using a randomized block design, four treatments were evaluated with different concentrations of magnetite: T1 – 0 ppm, T2 – 250 ppm, T3 – 500 ppm and T4 – 1000 ppm, applied through five foliar sprays with an interval of 15 days between them.

The application of magnetite had a toxic effect on yield, with a decrease with respect to the control of 11.49% and 17.26% when 250 ppm and 1000 ppm were applied, respectively. A 22.72% decrease in the harvest index on dry basis was observed compared to the control. In addition, magnetite caused decreases in the foliar concentration of N and K, and an increase in the concentration of K in the fruit, suggesting that it has an impact on the absorption and translocation of these nutrients, as well as the relationship between vegetative and generative growth.

Key words: *Nanotechnology, nanofertilizers, iron, tomato.*

I. INTRODUCCIÓN

Ante el incremento de la población mundial, la disminución de la productividad agrícola por el uso indiscriminado de agroquímicos, el deterioro de la salud del suelo, la degradación de agroecosistemas, el aumento del costo productivo y el riesgo de no poder producir alimentos, surge la necesidad de generar tecnología innovadora que nos permita producir la cantidad y calidad de alimentos necesarios para asegurar la alimentación de la población mundial que está en rápido crecimiento (Lira *et al.*, 2018; Rai *et al.*, 2023). En 1991, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), pronosticó que para el año 2050, la población será de alrededor de 9.1 millones de habitantes (Pérez *et al.*, 2018), situación que presentará un desafío para la producción de alimentos con cada vez menor disponibilidad de agua, tierra y recursos en condiciones adecuadas (Rai *et al.*, 2023).

La nanotecnología surge como un avance tecnológico-científico capaz de transformar sectores de la industria y agricultura (Lira *et al.*, 2018). Se define como el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica. El término “nano” es un prefijo griego que significa enano, en términos numéricos, un nanómetro es equivalente a la millonésima parte de un milímetro (The Royal Society, 2004). El objetivo de esta ciencia multidisciplinaria es comprender, caracterizar, manipular y explotar las características de la materia a nanoescala, para generar innovaciones tecnológicas que tengan un impacto social y ambiental positivos (Castañeda y Palacios, 2014).

La nanotecnología se ha convertido en una herramienta poderosa y ha tenido un desempeño fundamental en todos los ámbitos de la vida como la biomédica, alimentación y agricultura, electrónica, energía, textiles y cosméticos, entre otras. (Rai *et al.* 2022). En el área agrícola, proporciona herramientas para la detección rápida de enfermedades en los cultivos, mejoramiento en la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y crecimiento con mayor velocidad, así como en la detección de

estrés biótico y abiótico. Adicionalmente, presenta oportunidades para producir insumos agrícolas como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores, los cuales permiten incrementar el rendimiento de cultivos reduciendo el impacto ambiental (Lira *et al.* 2018).

El hierro (Fe) es un elemento esencial en el desarrollo de los cultivos, está involucrado en diversos procesos fisiológicos y metabólicos de la planta, tales como fotosíntesis, respiración y síntesis de compuestos (Ahammed *et al.*, 2020), por ende, la deficiencia de este nutriente conlleva problemas en el desarrollo y crecimiento de las plantas. El método foliar de aplicación de nanofertilizantes ha resultado en muchas ocasiones en el aumento del crecimiento y rendimiento de los cultivos (Jat *et al.*, 2021). La nanopartículas de hierro generalmente se presentan como óxidos de hierro: magnetita (Fe_3O_4), maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), entre otros (Ali *et al.*, 2016).

El uso de nanofertilizantes surge como una opción beneficiosa para la agricultura en diferentes sentidos, entre ellos la eficiencia que pueden ofrecer, no obstante, algunos de ellos, como la magnetita (Fe_3O_4), se han considerado también un factor de estrés en las plantas (Liu *et al.*, 2013) y por la posibilidad de provocar toxicidad es necesario determinar las dosis óptimas para cada cultivo (Aslani *et al.*, 2014).

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es un importante cultivo modelo para estudiar la calidad de las hortalizas (Zhang *et al.*, 2023). Este cultivo ha sido clave en el desarrollo de tecnologías de fitomejoramiento, nuevos métodos de producción, transporte, almacenamiento y tratamiento postcosecha, puesto que se ha posicionado como la hortaliza con mayor demanda, distribución y venta (Guzmán *et al.*, 2021). El tomate cherry es una de las especies hortícolas más producidas en invernadero debido principalmente a su gran potencial económico (Meza, 2022).

Actualmente no existen suficientes estudios que presenten el impacto de la aplicación de nanopartículas de magnetita como sustituto de Fe en cultivo de tomate. Por ello,

este proyecto de investigación se realizó con el fin de mejorar el conocimiento sobre el tema.

1.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta del cultivo de tomate cherry a la aplicación de nanopartículas de magnetita.

1.1.1 Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la dosis de nanopartículas de magnetita sobre el rendimiento del fruto.
- Determinar el efecto de las nanopartículas de magnetita sobre la calidad del tomate cherry.
- Determinar el efecto de nanopartículas de magnetita en el estatus nutrimental de las plantas de tomate.

1.2 Hipótesis

La aplicación de nanopartículas de magnetita afecta el rendimiento y crecimiento en el cultivo de tomate cherry y mejora la calidad del fruto.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Nanotecnología

El origen de la nanotecnología se remonta a 1959, cuando el físico estadounidense Richard Phillips Feynman impartió la conferencia “There is plenty of room at the bottom”, y con base en sus resultados de investigación habló acerca de la posibilidad de manipular directamente átomos y moléculas (Islam, 2014; Risk, 2015). Sin embargo, la emergencia de la nanotecnología fue posible gracias al desarrollo de instrumentos especializados que facilitan la observación y manipulación de nanoestructuras a nivel atómico o molecular. Es a principios de la década de 1980, que la invención del microscopio de túnel de barrido y un sistema de imágenes por computadora con resolución atómica proporcionaron los verdaderos avances en el área. Desde entonces, la evolución de la nanotecnología a través del tiempo ha sido producto de la aportación interdisciplinaria de ideas y propuestas procedentes de la biología, química, física, biotecnología e ingeniería (Islam, 2014; Lira *et al.*, 2018).

De acuerdo con Ramsden (2016), la nanotecnología es la manipulación controlada, medición, modelado y producción de materia en nanoescala, con el objetivo de crear materiales, dispositivos y sistemas con propiedades y funciones nuevas. Zágoyo y Foladori (2010) definen la nanotecnología como una tecnología revolucionaria, puesto que marca el desarrollo de nuevos materiales o el descubrimiento y desarrollo de propiedades nuevas en materiales ya conocidos. La nanotecnología es un área de amplia investigación científica a causa de la gran variedad de aplicaciones potenciales que posee y juega un papel importante en diferentes sectores de interés para el desarrollo y perfeccionamiento de materiales que permitan incrementar la eficacia en los procesos (Lira *et al.* 2018). Se ha considerado como una innovación tecnológico-científica que tiene el potencial de producir cambios radicales en los sistemas agrícolas, la biomedicina, la ingeniería del medio ambiente, la seguridad alimentaria y la conversión de energía, entre muchas otras áreas, más allá del alcance de las tecnologías convencionales, la cual ha comenzado una era de integración de ciencia

y tecnología a nivel atómico y molecular enfatizando la capacidad de trabajar a esa escala (Islam, 2014; Naderi y Shahraki, 2013).

A pesar de que las posibles aplicaciones de la nanotecnología son extensas, los usos actuales en el sector agrícola son relativamente escasos (Siddiqui *et al.*, 2015), por lo que es necesario llevar a cabo nuevos estudios sobre la aplicación de la misma.

2.2 Nanotecnología en agricultura

Actualmente, la investigación en el área agrícola enfrenta una amplia serie de desafíos como el estancamiento en rendimiento de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de macro y micronutrientes, la reducción de la superficie agrícola, las deficiencias nutricionales, la disminución de la materia orgánica del suelo, la baja disponibilidad de agua, y escasez de mano de obra (Lira *et al.*, 2016).

La aplicación de nanotecnología en la agricultura es un campo de investigación emergente; busca optimizar recursos con nanosensores, formular nuevos fertilizantes que liberen los nutrientes en menor cantidad y de forma lenta para que los cultivos puedan absorberlos (Ávila-Quezada *et al.*, 2022) y utilizar nanomateriales para el manejo de malezas, patógenos y detección temprana de enfermedades, principalmente (Rai *et al.*, 2023; Lira *et al.*, 2016).

Diversos experimentos realizados han determinado que esta tecnología contribuye a la obtención de beneficios en procesos y productos en la agricultura y alimentación, ejemplo de ello son el desarrollo de empaques inteligentes de alimentos que pueden revelar el desarrollo bacterial o fúngico al estar envasados (Vanderroost *et al.*, 2014), el efecto promotor de germinación en semillas por aplicación de nanopartículas (García, 2019), mayor crecimiento, velocidad de desarrollo vegetal y rendimientos (Khodakovskaya *et al.*, 2013), la elaboración de productos alimenticios con mejores sabores, aromas y texturas (Singh *et al.*, 2015), el desarrollo de nanoherbicidas para hacer frente a los problemas en el manejo de malezas (Lira *et al.*, 2018), el

encapsulamiento de ingredientes activos para liberación lenta e incremento en la eficacia de pesticidas comerciales reduciendo cantidades de aplicación al suelo y foliares a dosis significativamente menores (Xue *et al.*, 2014). Algunos tipos de nanopartículas metálicas poseen un enfoque dual, pudiendo ser utilizadas ya sea como nanofertilizantes o bien como nanopesticidas (Jeyasubramanian *et al.*, 2016; Le Van *et al.*, 2016).

2.3 Nanofertilizantes

Hoy en día la baja eficiencia de los fertilizantes y la limitada disponibilidad de agua y suelo obliga a que la agricultura sea más eficiente y productiva, por lo que es requerido el uso de tecnologías modernas. La generación de nanoproductos ha surgido como una opción para el desarrollo de la agricultura sustentable (Lira *et al.*, 2016).

Los nanofertilizantes son una nueva generación de fertilizantes sintéticos que contienen nutrientes fácilmente disponibles en escala nanométrica (Jahmohammadi *et al.*, 2016) y, ofrecen una serie de beneficios en comparación con los fertilizantes convencionales, tales como: absorción mejorada y utilización eficiente de nutrientes, reducción significativa del riesgo de contaminación ambiental debido a la disminución de pérdidas de nutrientes, alta relación superficie-volumen, liberación controlada de nutrientes en comparación con los fertilizantes químicos en los que es espontánea y rápida (Ávila-Quezada *et al.*, 2022), lo cual reduce a su vez la frecuencia de aplicaciones (Lira *et al.*, 2016) y costo de los fertilizantes (Mukhopadhyay, 2014).

Los nanofertilizantes se usan ampliamente en la nutrición de cultivos como aplicaciones en el suelo o aspersiones foliares, puesto que proporcionan nutrientes con alta eficiencia y bajo desperdicio debido a su rápida translocación a diferentes partes de las plantas (Morteza *et al.*, 2019). Han demostrado que juegan un papel importante en el aumento de crecimiento vegetativo, aumento de productividad, mejora de crecimiento reproductivo y floración, calidad y vida útil de productos (Morteza *et al.*, 2019).

Sin embargo, los nanomateriales pueden ser considerados también un factor de estrés en las plantas, debido a que existe la posibilidad de que puedan remodelar y modificar la estructura y constitución de las membranas y pared celular en las mismas (Liu *et al.*, 2013). Por la posibilidad de provocar fitotoxicidad es necesario tener en cuenta cuáles son las dosis óptimas y frecuencia de aplicación en los cultivos (Aslani *et al.*, 2014). Algunos autores mencionan que el efecto promotor o inhibidor del crecimiento generado por la aplicación de nanopartículas en las plantas, se relaciona con la concentración, tamaño y propiedades del elemento en cuestión, así como la función fisiológica y bioquímica que realiza en las plantas (Wang *et al.*, 2016).

Algunas investigaciones recientes han demostrado la perspectiva del desarrollo y aplicación de nanofertilizantes (Liu y Lal, 2015). En sus estudios, Zhao *et al.* (2013) reportaron que la aplicación de nanopartículas de ZnO a una mezcla de suelo mejoró el crecimiento del pepino (*Cucumis sativus* L.), aumentando la masa seca de raíz y fruto, el contenido de almidón, gluteína y Zn en los frutos cosechados.

Liu y Lal (2014) mostraron en sus experimentos que la aplicación de nanopartículas de hidroxiapatita aumentó la tasa de crecimiento y el rendimiento en un 33% y 20% respectivamente en comparación con un fertilizante de fósforo regular, por lo que puede ser una opción potencial al mejorar el rendimiento agronómico y aumentar la eficiencia de aplicación de fósforo.

En estudios realizados por Yang *et al.* (2007) remojaron semillas de espinaca (*Spinacia oleracea*) en 2.5 g L⁻¹ de solución de nanopartículas de TiO₂ bajo luz durante dos días antes de sembrarlas y posteriormente se asperjó solución sobre las hojas de las plántulas; sus resultados mostraron un aumento, en comparación con el tratamiento control, en contenido de N, clorofila y proteína de 23%, 34% y 13%, respectivamente. Además, los pesos frescos y secos fueron dos veces mayores que los obtenidos en tratamiento control.

Así mismo, Pradhan *et al.* (2013) informaron que las nanopartículas de Mn podrían ser una mejor fuente proveedora de Mn que el fertilizante comercial $MnSO_4$, debido a que observaron mejoras en el crecimiento y fotosíntesis del frijol mungo (*Vigna radiata*).

2.4 Micronutrientes

Los nutrientes minerales son esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Entre ellos, se distinguen dos grupos: los macronutrientes, que son necesarios y están presentes en concentraciones altas en las plantas, y los micronutrientes, que son igualmente esenciales, pero en concentraciones menores (Marschner, 2012). A pesar de estar presentes en bajas concentraciones, los micronutrientes tienen la misma importancia que los macronutrientes en el crecimiento de los cultivos (Kyrkby y Volder, 2009), llevan a cabo funciones trascendentales para el desarrollo de la planta y cualquier deficiencia puede ocasionar un decremento en la productividad (Rodríguez, 2014); juegan papeles importantes como constituyentes de estructuras orgánicas, activadores de enzimas, transportadores de electrones, en la osmorregulación, protección contra el estrés biótico y abiótico (Sharma, 2006).

Se consideran ocho micronutrientes esenciales que se requieren para todas las plantas superiores: Fe, B, Cu, Mn, Mo, Zn, Ni y Cl (Welch y Shuman, 2011).

En la actualidad, el interés por los micronutrientes ha ido creciendo debido a que éstos pueden limitar el crecimiento de los cultivos, aunque con frecuencia esta condición no es evidente, el correcto suplemento incrementa la productividad del cultivo (Kyrkby y Volder, 2009).

2.5 Hierro

El hierro (Fe) es uno de los microelementos más importantes para el crecimiento de las plantas; está involucrado en diversos procesos fisiológicos y metabólicos como la fotosíntesis, la respiración, estructura de clorofila, síntesis de proteínas y hormonas de crecimiento, el transporte de electrones, la fijación de nitrógeno, reducción de nitratos y es componente del sistema antioxidante enzimático (Ahammed *et al.*, 2020; Sharma,

2006; Zhang *et al.*, 2023). Es el segundo metal más abundante en la corteza terrestre, sin embargo, su solubilidad presenta un problema en suelos con pH alto. Las formas más dominantes de Fe soluble en el suelo y soluciones son Fe^{2+} y Fe^{3+} (Broadley *et al.*, 2012). La fácil interconvertibilidad de los dos estados de oxidación confiere al metal la capacidad de participar en reacciones oxido-reducción y transporte de electrones (Sharma, 2006). Sin embargo, el déficit o exceso del Fe es perjudicial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que puede provocar una reducción significativa en el rendimiento en calidad y cantidad (Mahender *et al.*, 2019).

La deficiencia de Fe provoca estrés oxidativo en las células, lo que causa reducción en síntesis de pigmentos fotosintéticos, por lo que los primeros síntomas visibles de deficiencia de Fe aparecen como clorosis intervenal en hojas jóvenes (Zhang *et al.*, 2023, Kyrkby y Volder, 2009).

Esta deficiencia es un problema mundial en la producción de cultivos en suelos calcáreos y afecta inicialmente el desarrollo y funcionamiento del cloroplasto, puesto que es el sitio primario de las funciones del Fe, lo que afecta el crecimiento de las plantas, la resistencia, el rendimiento y calidad de los frutos (Broadley *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2023).

Estudios realizados por Ahammed *et al.* (2020) determinaron que tanto el suministro alto como bajo de Fe en hidroponía disminuyó el crecimiento y acumulación de biomasa, indujo clorosis, estrés oxidativo, redujo el contenido de clorofila y la tasa de fotosíntesis en pepino.

A lo largo del tiempo, se han aplicado diferentes tratamientos agronómicos para contrarrestar la deficiencia de Fe, aumentando la disponibilidad de iones de Fe. Los quelatos de Fe han sido reconocidos como los suplementos más utilizados para mejorar la disponibilidad de este elemento para los cultivos, sin embargo, suelen ser caros y contraen efectos hacia el medio ambiente (Ghafariyan *et al.*, 2013).

Zhang *et al.* (2023) determinaron que la aplicación foliar de Fe-EDTA tuvo efectos significativos sobre la forma, firmeza y peso de la fruta, presentando un efecto positivo en la morfología, maduración y acumulación de materia seca en los frutos de tomate, teniendo un efecto aún más significativo al combinar la aplicación de Fe y la prolongación del fotoperiodo. Además, la aspersion foliar de Fe-EDTA incrementó el contenido de pigmentos fotosintéticos, pero disminuyó posteriormente con al seguir aumentando la concentración.

2.6 Magnetita (Fe_3O_4)

En agricultura, la principal razón del uso de fertilizantes es proveer macro y micronutrientes necesarios para el desarrollo de la planta y comúnmente escasos en el suelo (Rameshaiah, *et al.*, 2015). Los nanomateriales se utilizan cada vez más en la agricultura y representan innovaciones para la producción agrícola alrededor del mundo (Wang *et al.*, 2019).

La magnetita Fe_3O_4 es un óxido mixto de hierro, cuya composición corresponde a 27.6% de oxígeno y 72.4% de hierro (Carriazo *et al.*, 2017). Las nanopartículas de magnetita juegan un papel importante en diversos campos, y principalmente en biomedicina, donde se han utilizado en imágenes de resonancia magnética, etiquetado biológico, inmunoensayos, etcétera. En agricultura, las nanopartículas basadas en Fe tienen un potencial de aplicación como nanofertilizantes (Yan *et al.*, 2020).

Fahad *et al.* (2020), demostraron que la aplicación de nanopartículas de magnetita presentan gran eficacia para reducir la absorción de metales pesados como Cadmio y Plomo, sin pérdida de minerales esenciales en el suelo y, además, favorecen el crecimiento en plantas de cilantro. Así mismo, López-Luna *et al.* (2016) determinaron que la aplicación de nanopartículas de magnetita tiene efectos en la mitigación de toxicidad de los materiales pesados, tales como cadmio y cromo.

Por otro lado, en el experimento realizado por Wang *et al.* (2019), determinaron que la aplicación de 200 mg/L de magnetita y 100,200 mg/L de magnetita promovieron el crecimiento de las plantas y elevaron el contenido de clorofila, además de que aumentaron significativamente el peso de la fruta de melón en un 9.1%, 9.4% y 11.5%.

Asímismo, los resultados obtenidos por Ghafariyan *et al.* (2013), muestran que las nanopartículas de Fe en bajas concentraciones incrementaron el contenido de clorofila en cultivo de soya, y sugirieron que este tipo de nanopartículas tiene un impacto similar al de una fuente de Fe como lo es Fe-EDTA, por lo que se podría utilizar como fuente de Fe para reducir los síntomas cloróticos provocados por su deficiencia.

Zhu *et al.* (2008) mencionan que al aplicar nanopartículas de magnetita las plantas de calabaza pueden absorber, translocar y acumular las nanopartículas en el tejido vegetal. Sin embargo, se han realizado varios estudios con enfoque en los efectos fitotóxicos de magnetita, donde diversos autores sugieren que la aplicación de nanopartículas de magnetita puede inducir estrés oxidativo, y por otro lado tener efectos positivos en crecimiento de las plantas, concentración de clorofila, promoción de biomasa seca, aumento de actividad enzimática, alivio de estrés oxidativo (Ding *et al.*, 2019; Servin *et al.*, 2015; Pariona *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2020).

2.7 Cultivo de tomate en México

2.7.1 Origen

El tomate pertenece a la familia de las Solanáceas y es originario de América del Sur, de la región andina, integrada por Chile, Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú, sin embargo, algunos autores señalan que fue en México donde se domesticó (Benton, 2007). Al principio, su uso en Europa era simplemente como planta ornamental, pero más tarde se comenzó a cultivar para el consumo del fruto (Gorini, 2018).

2.7.2 Importancia económica

El tomate es un cultivo de gran importancia económica en diversos países, es la hortaliza más cultivada en el mundo (Ramírez, 2015). De acuerdo con SIAP (2022), México es el noveno productor de tomate en el ranking mundial y a nivel nacional, el tomate es el quinto producto agroalimentario más exportado, representando un valor de 1,967 millones de dólares. En 2021, se cultivó en 48 mil 42 hectáreas, obteniendo una producción de 3 millones 324 mil toneladas, siendo los principales productores Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán y Jalisco.

2.7.3 Tomate cherry

Este cultivo presenta alta diversidad genética, actualmente existe una inmensa cantidad de variedades con distinto aspecto, color y sabor (Allende *et al.*, 2017). En México, se producen diferentes tipos de tomate: saladette, bola, cherry, campari, de los cuales existen gran variedad de híbridos y variedades con diferentes características. Siendo el tomate cherry el de mayor exportación (Martínez, 2012).

La mayoría de variedades de tomate cherry que se cultivan a nivel comercial son plantas vigorosas de crecimiento indeterminado (Grijalva *et al.*, 2013). El tomate cherry es conocido por su sabor dulce, son frutos de tamaño pequeño y piel fina que se agrupan en racimos de 15 a más de 50 frutos (Benton, 2007) y se consumen principalmente crudos como ingrediente en ensaladas y para decorar platos debido a su atractivo visual. Se producen generalmente en invernaderos y se pueden cultivar de forma orgánica o convencional. En México se comercializan de dos formas, ya sea a granel en mercados locales, o bien, en paquetes etiquetados de venta en supermercados (Leal *et al.*, 2018). Particularmente esta variedad de tomate tiende a generar valores antioxidantes más altos que los tomates saladette y bola (Crisanto *et al.*, 2010).

Actualmente, la producción en invernadero busca cultivos con margen de utilidad alta debido a los costos que la producción e infraestructura implican; diversos estudios han demostrado que el tomate cherry tiene un valor comercial superior a los demás debido

a que es una hortaliza apreciada en los mercados internacionales, principalmente (Márquez *et al.*, 2006 ; Luna, 2017).

El tomate es un importante cultivo modelo para estudiar la calidad de las hortalizas de fruto (Zhang *et al.*, 2023). Este cultivo ha sido clave en el desarrollo de tecnologías de fitomejoramiento, nuevos métodos de producción, transporte, almacenamiento y tratamiento postcosecha, puesto que se ha posicionado como la hortaliza con mayor demanda, distribución y venta (Guzmán *et al.*, 2021).

2.7.4 Descripción morfológica de la planta

El tomate es una planta herbácea, de tallo semileñoso que se cultiva como planta anual para el consumo de sus frutos (Guzmán *et al.*, 2021). Existen dos tipos de plantas de tomate: las plantas de crecimiento determinado, cuyos tallos detienen su crecimiento después de un cierto número de inflorescencias desarrolladas, y se presenta la formación de un último racimo apical; y las plantas de crecimiento indeterminado, que se caracterizan por tener tallos con un crecimiento continuo provocado por una yema terminal que sigue desarrollando, al igual que hojas y flores de forma ilimitada; este tipo de plantas son las más utilizadas comercialmente, principalmente en invernaderos o casa sombra y alcanzan rendimientos más altos (Allende *et al.*, 2017; López, 2017).

Raíz

Su sistema radicular consiste en una raíz principal pivotante que se complementa con numerosas raíces secundarias y adventicias que pueden formar una masa con bastante volumen y ayudan a mejorar el anclaje al sustrato (Escobar y Lee, 2009).

Hojas y tallo

El tallo generalmente oscila entre 2 y 4 cm en la base de la planta y se hace más delgado en la parte superior, en él se desarrollan las hojas, tallos secundarios e

inflorescencias (Monardes, 2009). Las hojas del tomate se distribuyen en la longitud del tallo en posición alterna, son compuestas e imparapinadas, con foliolos peciolados y bordes dentados (Guzmán *et al.*, 2021)

Flor y fruto

La flor es de color amarillo intenso que consta de 5 o más sépalos y es considerada una flor perfecta, con órganos femeninos y masculinos funcionales. Las flores se agrupan en inflorescencias de tipo racimo (Ramírez, 2015). Las inflorescencias que se forman en la base son más simples, y forman pocos frutos, las superiores tienden a dar mayor número de frutos (Gorini, 2018).

El fruto de tomate es una baya que puede alcanzar un peso entre 5 y 500 g, dependiendo de la variedad y condiciones de cultivo (Ramírez, 2015). Está constituido por agua en un 94-95% y el resto de constituyentes orgánicos que dan sabor y textura. Generalmente transcurren entre 60 y 70 días desde el amarre del fruto hasta la cosecha (Escobar y Lee, 2009).

2.7.5 Requerimientos edafoclimáticos

Temperatura

La temperatura óptima para el desarrollo de cultivo de tomate está entre 23 y 26°C durante el día y 14 a 17°C durante la noche, puesto que temperaturas extremas tienden a provocar trastornos en la planta. Temperaturas bajo 10°C pueden afectar la formación de flores, y temperaturas mayores a 35°C pueden reducir el desarrollo del fruto, el crecimiento y la biomasa de la planta (Díaz, 2007; Jaramillo *et al.*, 2012).

Humedad relativa

De acuerdo con Allende *et al.* (2017) y Escobar y Lee (2009) la humedad relativa óptima para el tomate en invernadero varía entre 60 y 80%, sin embargo es importante

considerar que humedades relativas altas pueden favorecer el desarrollo de enfermedades fungosas y bacterianas, y provocan problemas en la polinización por la compactación del polen.

Luminosidad

El tomate requiere de días soleados y entre 8 a 16 horas de luz para un correcto desarrollo de planta y coloración de fruto. Bajos valores de luminosidad afectan el desarrollo vegetativo, la floración y polinización, de forma que se reducen los mecanismos de absorción de agua y nutrientes (Jaramillo *et al.*, 2012).

Suelo

El tomate debe disponer de suelos bien aireados, con texturas medias y con buena tasa de infiltración de aire y agua. La conductividad eléctrica óptima está entre 1.5 y 2 dS/m (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) y el valor óptimo en cuanto al pH del suelo, oscila entre 5.8 y 6.6 (Harper, 2006) para garantizar la disponibilidad de nutrientes.

2.7.6 Manejo del cultivo

Propagación y trasplante

La producción de plántulas es el primer paso para la producción de tomate en invernadero. Esta actividad consiste en la selección del material vegetal, selección de sustrato y preparación del mismo, la siembra de la semilla en almácigos, su germinación y desarrollo de la plántula hasta conseguir una plántula de tomate con las características apropiadas para su trasplante. Una plántula de buena calidad para trasplante debe tener una altura entre 10 y 15 cm, mínimo cuatro hojas verdaderas formadas bien desarrolladas, coloración ligeramente púrpura en la base del tallo,

raíces blancas y delgadas bien desarrolladas y sin síntomas de deficiencias nutricionales o presencia de plagas (Escobar y Lee, 2009).

Tutorado y enrollado

El tutorado es una actividad que consiste en guiar verticalmente las plantas, enrollándola a lo largo de una cuerda de plástico, en sentido de las manecillas del reloj, que va desde la base de la planta hasta alrededor de 2.5 a 3 metros, apoyándose de un alambre que se establezca por encima de las plantas a tal altura. Para generar un soporte mayor a lo largo de la cuerda, es posible utilizar abrazaderas de plástico. La actividad de enrollado debe realizarse sin maltratar a las plantas para evitar estrangularlas (Escobar y Lee, 2009; Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

Podas

Una poda es la práctica de eliminar cualquier tipo de estructura en la planta para balancear el crecimiento reproductivo y vegetativo; es una práctica cultural utilizada para obtener plantas equilibradas y vigorosas, aumentar la ventilación, reducir problemas sanitarios y obtener frutos de mayor calidad (Barrios, 2015; Escobar y Lee, 2009). Existen diferentes tipos de poda, todas ellas son importantes para el correcto manejo del cultivo.

La poda de formación en las plantas de tomate puede manejarse a 1, 2, 3 y 4 tallos, dependiendo de la variedad (Allende *et al.*, 2017). En la poda a un tallo se eliminan los brotes axilares que aparezcan con el tiempo para conservar únicamente un tallo para la conducción de la planta; la poda a dos o más tallos consiste en conducir la planta dejando dos o más brotes para ello, y eliminando los que aparezcan posteriormente (Barrios, 2015).

Según lo mencionado por Sepúlveda *et al.* (2013) la poda de brotes consiste en eliminar todos los brotes secundarios que se desarrollan en las axilas de las hojas para

dejar la guía principal libre. El tamaño del brote a eliminar no debe superar los 5-6 cm de longitud, para no producir heridas de gran diámetro en la planta y así evitar el desarrollo de enfermedades con más facilidad.

Entre las podas, también se encuentra la poda o también llamado raleo de flores o frutos, que es una práctica que consiste en eliminar las flores menos vigorosas con el fin de homogeneizar e incrementar el calibre de los frutos (Allende *et al.*, 2017).

El deshoje basal es otro tipo de poda que consiste en eliminar las hojas inferiores en la planta a medida que los frutos comienzan a madurar y ser cosechados, de forma que se favorezca la aireación de la misma (Sepúlveda *et al.*, 2013).

Por otro lado, la poda apical se utiliza en tomates de crecimiento indeterminado donde se elimina la yema principal considerando que el racimo que está por debajo de ella se encuentre completamente formado. Esto se realiza con el fin de suspender el crecimiento en la planta y determinar el número de racimos a manejar por planta (Jaramillo *et al.*, 2012)

Polinización

De acuerdo con Escobar y Lee (2009), la planta de tomate no requiere de polinización cruzada, ya que los tomates pueden ser polinizados por el viento cuando se encuentran en campo abierto. Sin embargo, cuando se establecen en invernaderos, debido al insuficiente movimiento del aire e ingreso restringido de insectos polinizadores se hace necesario utilizar alguna técnica tales como vibradores eléctricos o abejorros mecánicos, o bien, la vibración mecánica de los alambres de tutorado (Cuellar *et al.*, 2001).

2.7.7 Plagas y enfermedades

El manejo integrado de plagas y enfermedades es un conjunto de diferentes prácticas y métodos de control utilizados de forma apropiada y oportuna para disminuir las poblaciones de organismos patógenos y evitar que ocasionen daños o pérdidas

económicas en los cultivos. Es un sistema orientado al monitoreo constante y programada de los cultivos para establecer estrategias de manejo (Romero, 2004). En tomate, existen diversas plagas y enfermedades, sin embargo, entre ellas destacan:

- Mosca blanca (*Bermisia tabaci – trialeurodes vaporariorum*). Se alimentan del tejido de las hojas y detienen el crecimiento en la planta, además, producen una mielecilla que desarrolla la fumagina, la cual puede cubrir totalmente la planta y disminuir la calidad de la cosecha. En el cultivo se monitorean adultos, huevos y ninfas (Jaramillo *et al.*, 2012; Godoy *et al.*, 2018)
- Minador (*Liriomyza trifolii*). El daño ocurre cuando los adultos perforan las cosas para alimentarse depositar los huevos, evidenciado como una serie de puntos blancos. Así mismo, las larvas producen galerías al interior de la hoja, lo que podría reducir la capacidad fotosintética de la planta (Allende *et al.*, 2017).
- Paratrioza (*Bactericera cockrelli*). Este insecto plaga provoca daños grandes en los cultivos al succionar la savia de las plantas e inyectar toxinas, es vector de virus y fitoplasmas. Inducen síntomas de amarillamiento y achaparramiento, deformación de hojas y senescencia prematura (Garzón *et al.*, 2007).
- Cáncer bacteriano (*Clavibacter michiganensis*). Enfermedad causada por la bacteria *Clavibacter michiganensis*, la cual ataca al sistema vascular y tejido parenquimatoso. En follaje se observa flacidez en la parte apical de la planta, en tallos se presentan lesiones de aspecto escamoso color pardo y en frutos se presentan costras oscuras con color blanco alrededor. Puede causar marchitez y muerte de la planta (García, 2009).
- Tizón temprano y tardío (*Alternaria solani – Phytophthora infestans*). El tizón temprano presenta manchas cafés irregulares con bordes amarillos en el follaje más viejo, en infecciones severas las plantas se defolían. El tizón tardío se caracteriza por el doblamiento hacia debajo de las hojas y manchas acuosas en tallos y hojas (Godoy *et al.*, 2018).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, campus Saltillo, dentro de un invernadero de baja tecnología con cubierta de plástico, situado en el Departamento de Horticultura, cuyas coordenadas son: 25°21'20.4"N, 101°02'11.4"O, a una altitud de 1,783 msnm.

3.2 Material vegetal

Se empleó plántula de tomate variedad Cherubs, la cual se distingue por producir un fruto con forma de uva, tamaño pequeño, piel externa más resistente y sabor más dulce.

3.3 Condiciones del experimento

Preparación del sustrato

Se utilizó una mezcla de sustrato 70% peat moss, 30% perlita, con pH ajustado a 5.8 mediante una dosis de 1 g de bicarbonato de sodio por 1 L de peat moss. Una vez realizada la mezcla, se colocó en 56 bolsas de polietileno negro de 10 L, previamente perforadas.

Trasplante

La plántula fue producida utilizando como sustrato de germinación lana de roca y vermiculita. El trasplante se llevó a cabo el 8 de marzo de 2022, en bolsas de polietileno negro con una mezcla de sustrato en proporción 70% peat moss, 30% perlita; realizando manualmente un orificio en el centro del sustrato para colocar el material vegetal.

Riego y fertilización

Previo al trasplante se aplicó un riego pesado de 4 L de agua por bolsa, con el fin de bajar la conductividad eléctrica (CE) del sustrato.

Cada riego se realizó de forma manual, con la solución nutritiva propuesta por Hernández *et al.* (2019), la cual fue añadida al 25% un día después de trasplante, al 50% en el segundo riego y al 100% en los riegos posteriores, ajustando el pH y CE de la misma antes de cada riego en un rango de 5.5 a 6 y 1 a 2.5 dS m⁻¹, respectivamente.

La frecuencia de riego se determinó con ayuda de un tensiómetro IRROMETER que mide la humedad del sustrato. Se aplicó riego cada vez que el manómetro del tensiómetro marcaba entre 8 y 10 centibares, teniendo un promedio de 3 riegos por semana para los primeros 20 días después de trasplante (ddt), 4 riegos por semana de 21 ddt a 51 ddt y riego diario a partir de tal fecha. La cantidad de riego por planta se estimó para cada aplicación, en base a la fracción de lixiviado, la cual tenía que ser entre 30 y 35% del total de solución aplicada.

Tutorado

Inicialmente se colocaron estacas de madera de 40 cm de largo y 4mm de espesor para dar soporte a la planta. A los 29 ddt se realizó un tutorado tipo holandés, el cual consiste en colocar un hilo de rafia por planta, sujetado por un anillo que se sitúa en la parte basal, extendido de forma vertical y atado en alambre a una altura de 2.5 metros aproximadamente, con el fin de facilitar el manejo de la planta.

Podas

Se realizaron podas manuales de chupones cada semana, con el fin de eliminar brotes axilares que restan energía y crecimiento a los órganos de interés; y poda de hojas, una vez iniciada la cosecha, conservando alrededor de 13 hojas fotosintéticamente

activas por arriba del siguiente racimo en maduración, con el objetivo de eliminar hojas viejas, disminuir la velocidad de propagación de plagas y enfermedades, mejorar la ventilación y maduración.

Para el desarrollo de este experimento no se realizaron podas de flores o frutos.

Manejo fitosanitario

Con el objetivo de mantener controlada la incidencia de plagas y enfermedades se determinó un calendario de aplicaciones para cada mes, en el cual se utilizaron diversos productos, entre ellos: Oberon (*Spiromesifen*), Abamectina delta (*Abamectina*), Confol (*Imidacloprid*), Diazinon, Sanadel (*Propiconazol*), Hidroflow (*Hidróxido cúprico*), Agrigent (*Gentamicina y Oxitetraciclina*), y Mitoff (*Amitraz*), con el fin de realizar una rotación de los mismos. Las aplicaciones se llevaron a cabo con una bomba fumigadora TRUPER de 7L.

3.4 Tratamientos

Se evaluó la aplicación de magnetita (Fe_3O_4), utilizando cuatro concentraciones diferentes: Tratamiento 1 (0ppm – tratamiento control), Tratamiento 2 (250 ppm magnetita), Tratamiento 3 (500 ppm magnetita) y Tratamiento 4 (1,000 ppm magnetita). La aplicación de los tratamientos comenzó a los 42 ddt; se realizaron 5 aplicaciones vía foliar con intervalo de 15 días entre las mismas, considerando siete repeticiones (compuestas por dos plantas cada una) por tratamiento, generando un total de 56 unidades experimentales.

Para cada tratamiento se preparó 1L de solución, de forma que se asperjaron 71 mL por planta en cada aplicación. En primer lugar, se pesó la magnetita en una báscula digital, de acuerdo a la concentración requerida para cada tratamiento, posteriormente, se disolvió la misma en 1 L de agua destilada agitando constantemente el contenedor. Una vez obtenida la solución, se utilizó un atomizador para asperjar el tratamiento en

cada planta, rodeando la misma con un plástico grueso para evitar que las aspersiones afectaran los tratamientos laterales.

3.5 Variables de respuesta

Agronómicas

- a. Rendimiento por planta. Determinado por la suma del peso total de frutos cosechados por planta los cuales fueron pesados de forma individual en una báscula digital marca Hyiear, modelo HS-ML0001.
La cosecha comenzó 49 ddt y terminó 126 ddt para concluir el experimento. Durante este periodo, se cosecharon 10 racimos por planta. Para llevar a cabo esta actividad, se utilizó como criterio la coloración del fruto, considerando el color rojo para determinar el momento de cosecha.
- b. Peso seco hojas. Luego de cada poda, se separaron las hojas retiradas por planta en bolsas de papel craft, para dejarlas secar al sol alrededor de 2 semanas. Una vez deshidratadas, se midió el peso de la materia seca de las hojas utilizando una báscula digital marca Hyiear modelo HS-ML0001. La suma del peso seco del total de hojas por planta determina esta variable.
- c. Peso seco tallo. Variable determinada por el peso de la materia seca correspondiente al tallo, el cual fue cortado y colocado en bolsas de papel craft para dejar secar al sol alrededor de cuatro semanas previamente.
- d. Peso seco total. Determinado por la suma del peso seco de hojas y peso seco de tallo de cada planta.
- e. Diámetro basal de tallo. Se determinó utilizando un vernier digital de plástico marca Steren, para medir el diámetro de la parte más baja del tallo.
- f. Diámetro medio de tallo. Esta variable, al igual que la anterior, fue obtenida haciendo uso de un vernier digital de plástico marca Steren, para medir el diámetro de la parte central de la planta.
- g. Índice de cosecha en seco. Variable determinada por el resultado de dividir rendimiento por planta entre peso seco total.

Calidad de fruto

h. Firmeza de fruto. Para la evaluación de esta variable, se recolectaron como muestra dos frutos representativos por racimo, para cada repetición de los tratamientos. Posteriormente se perforó cada uno de ellos en la parte central del fruto con ayuda de un penetrómetro WAGNER para determinar los valores.

Estatus nutrimental de fruto

i. Contenido de Potasio en fruto. Determinado por la colocación de una muestra líquida (obtenida a partir de un fruto previamente molido en un mortero de porcelana) en un sensor de potasio HORIBA LAQUAtwin. Para ello, se utilizaron como muestra dos frutos representativos por racimo, evaluando esta variable a partir del racimo 5.

Estatus nutrimental de hojas

Para realizar el análisis mineral, se trituro el total de hojas secas de 4 repeticiones por tratamiento en un molino de laboratorio para análisis foliar. Una vez pesados, los tejidos vegetales se molieron para pasar una malla #40 para la determinación de macronutrientes.

- j. Concentración de nitrógeno en hojas. Este valor se determinó siguiendo el procedimiento de Kjeldhal (Bremner, 1996).
- k. Concentración de fósforo, potasio, calcio y magnesio en hojas. Cada uno de estos parámetros fue determinado en una mezcla 2:1 de $H_2SO_4:HClO_4$ y 2 mL de H_2O_2 al 30% usando un espectrómetro de emisión de plasma acoplado inductivamente (Soltanpour *et al.*, 1996)

3.6 Diseño experimental y análisis estadístico

En este experimento se evaluó el efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en un diseño estadístico de bloques completamente al azar, donde se evaluaron cuatro tratamientos con siete repeticiones cada uno.

Los datos obtenidos se analizaron por medio del paquete estadístico SAS y se realizaron pruebas de comparación de medias con el método de Duncan ($p \leq 0.05$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. 1 Rendimiento

De acuerdo con la Figura 1, se observa que la aplicación de nanopartículas de magnetita tiende a disminuir el rendimiento de fruto. En comparación con el testigo, la disminución en el rendimiento fue de 11.49% y 17.26% al aplicar 250 ppm y 1,000 ppm, respectivamente (Cuadro 1). Estos datos sugieren que la magnetita tiene un efecto tóxico sobre el tomate; lo cual puede estar relacionado principalmente con la composición química, tamaño, forma, estructura, concentración utilizada del nanomaterial y especie vegetal, como sugieren Ghafariyan *et al.* (2013), Ren *et al.* (2011) y Racuciu *et al.* (2022).

Hasta la fecha, existen algunos estudios contradictorios sobre la fitotoxicidad ocasionada por la aplicación de magnetita, por ejemplo, Ghafariyan *et al.* (2013) mencionan en sus resultados que la aplicación de nanopartículas de magnetita en solución hidropónica (60 mg L^{-1}) promueve la aparición de síntomas de toxicidad (manchas marrones en hojas) y afecta la biosíntesis de los principales pigmentos fotosintéticos. Reséndiz (2019) menciona que la aplicación de magnetita a altas concentraciones en la solución ($>250 \text{ mg L}^{-1}$) disminuye el rendimiento del cultivo en rosal (*Rosa hybrida* L.). Yan *et al.* (2020) sugieren que las nanopartículas de magnetita aplicadas en el suelo tienen efectos tóxicos limitados en hojas o raíces de maíz (*Zea mays* L.).

Por otro lado, Iannone *et al.* (2016) en su estudio demuestran que la aplicación de nanopartículas de magnetita recubiertas de ácido cítrico en solución (5, 10, 15 y 20 mg L^{-1}) no produce fitotoxicidad en plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.), y aumenta significativamente la actividad de las enzimas antioxidantes, mostrando respuesta favorable para prevenir el daño oxidativo. En la investigación de Racuciu *et al.* (2022) concluyeron que la adición de concentraciones de hasta 11 mg L^{-1} de nanopartículas de magnetita recubiertas con ácido aspártico en maíz durante la germinación mostró un efecto positivo sobre el crecimiento, biosíntesis de clorofila y actividad enzimática

de catalasa y peroxidasa, sugiriendo un sistema de defensa activado por las nanopartículas de magnetita y baja toxicidad en las plántulas.

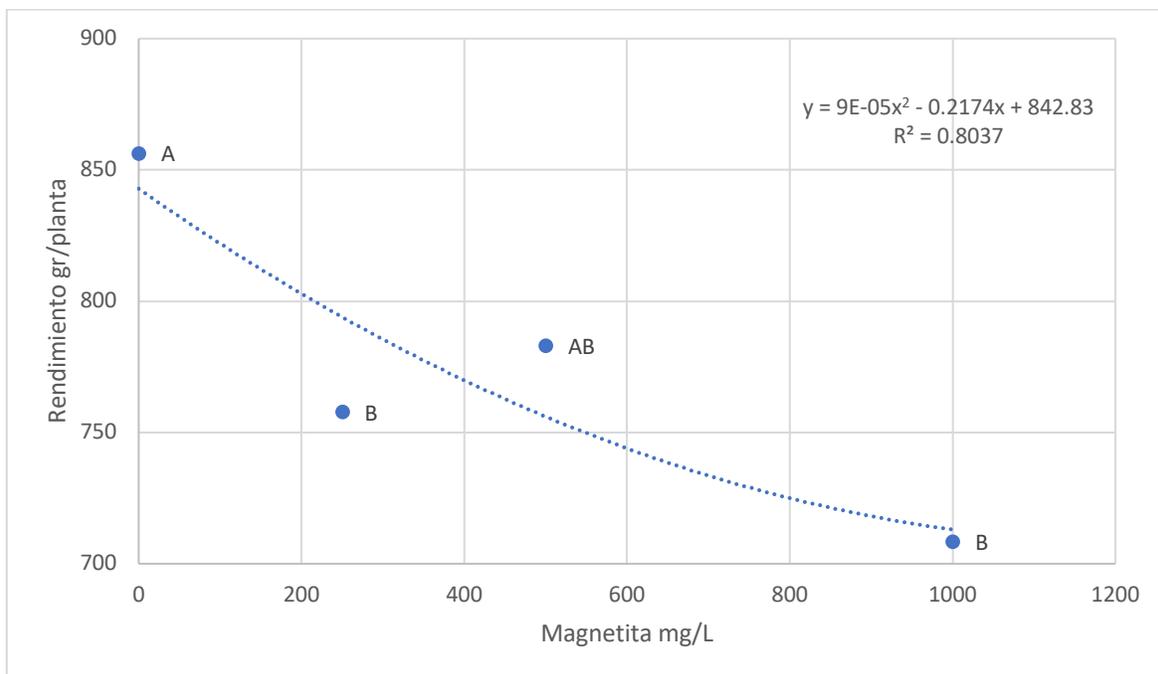


Figura 1. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita sobre el rendimiento de fruto en cultivo de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.). Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

Cuadro 1. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) para rendimiento por planta y peso seco de hoja, tallo y total.

Magnetita mg/L	Rendimiento g	Peso Seco Hojas g	Peso Seco Tallo g	Peso Seco Total g
0	856.36 A	57.118 A	94.727 A	151.845 A
250	757.88 B	56.575 A	95.958 A	152.533 A
500	783.08 AB	53.192 A	99.008 A	152.200 A
1,000	708.50 B	57.815 A	103.485 A	161.300 A

Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

Así mismo, estudios realizados en pepino, determinan que no existe diferencia significativa en aplicaciones foliares de nanopartículas de magnetita en pepino (*Cucumis sativus* L.) (Flores, 2023). Sin embargo, Aguilar (2020) señala que mediante la aplicación de magnetita en drench, el rendimiento total de fruto en tomate es significativamente mayor, superando a las plantas testigo en 7.1% y 11.9% con aplicaciones de 50 y 1000 ppm, respectivamente.

Lo anterior, explicaría que el efecto tóxico que se refleja en la disminución en el rendimiento podría estar relacionado con las propiedades del nanomaterial, la concentración y forma de aplicación utilizadas para la aplicación de las nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate, y así mismo, que la aplicación de nanopartículas de magnetita puede inducir estrés oxidativo, lo que podría tener efectos en los mecanismos antioxidantes de la planta (Racuciu *et al.*, 2022).

4.2 Peso seco

La aplicación de nanopartículas de magnetita no ocasionó diferencia estadísticamente significativa en el peso seco total (Cuadro 1), sin embargo, se observa una tendencia a aumentar el peso seco total de la planta conforme aumenta la concentración de nanopartículas (Figura 2), siendo este influenciado principalmente por el peso seco del tallo (Cuadro 1, Figura 3).

Esto sugiere que las nanopartículas de magnetita aplicadas foliarmente favorecen el crecimiento vegetativo, lo cual podría deberse a que el Fe participa en la biosíntesis de clorofila y otros procesos metabólicos, pudiendo aumentar la actividad fotosintética y así, el crecimiento vegetativo.

Esta información concuerda con lo reportado por Li *et al.* (2020), quienes determinaron que la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita aumentó significativamente la biomasa en plantas de maíz, con mayores alturas y hojas más anchas y largas en

comparación con el tratamiento control. Reséndiz (2019) presentó en sus resultados que la aplicación de nanopartículas de magnetita en solución (<250 mg L⁻¹) incrementa el rendimiento en biomasa en plantas de rosal, sin embargo, el mismo estudio determinó que al incrementar la concentración en solución de nanopartículas de magnetita por arriba de 250 mg L⁻¹, el peso seco total de plantas de rosal tiende a disminuir, destacando que la toxicidad ocasionada por magnetita esté influenciado por la concentración en la que se aplica a las plantas.

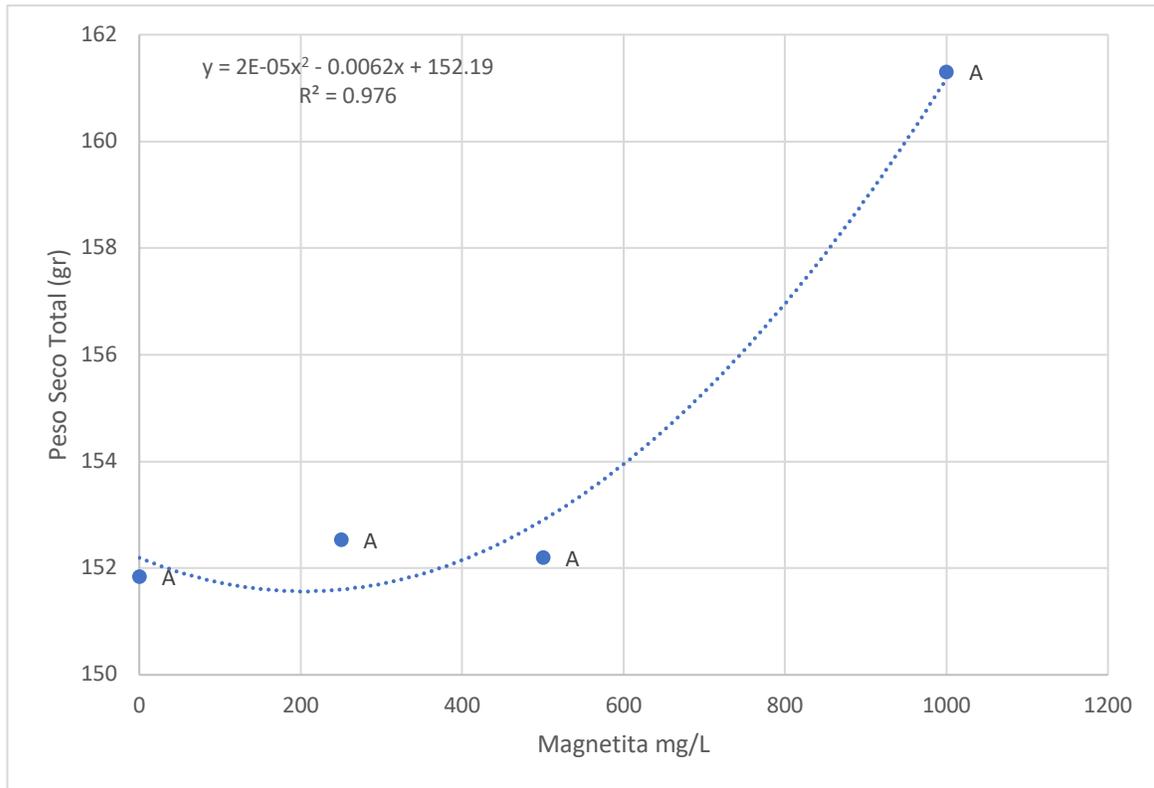


Figura 2. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita sobre el peso seco total en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.). Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

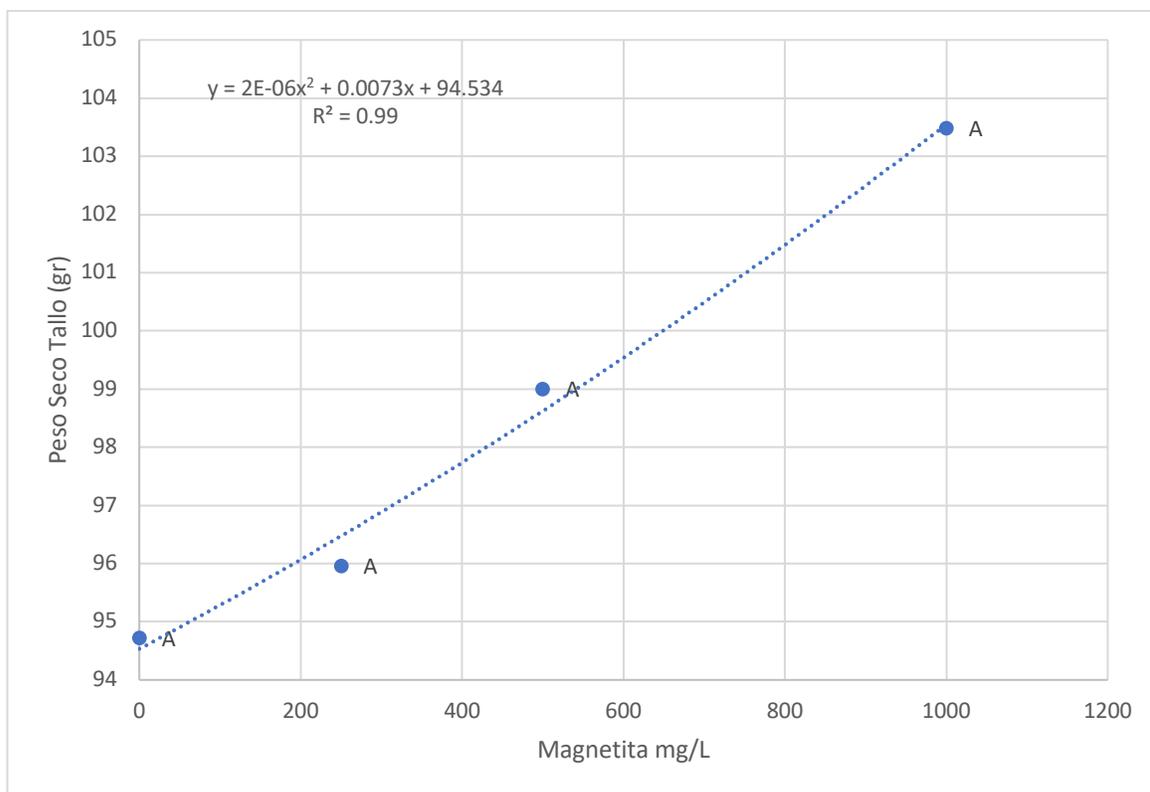


Figura 3. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.), para peso seco del tallo. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

4.3 Diámetro basal y diámetro medio

La aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate causó efectos significativos sobre el diámetro basal de los tallos cuando se emplearon las concentraciones de 250 ppm y 1000 ppm de magnetita, causando este último un incremento de 7.83% en comparación con el primero, sin embargo, no existen diferencias significativas en comparación con el tratamiento control (Cuadro 2, Figura 4).

Como se observa en la Figura 5, la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita tiende a incrementar ligeramente el diámetro medio de las plantas de tomate, sin embargo, los resultados obtenidos no fueron significativos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) para diámetro basal y medio de tallo e índice de cosecha en seco.

Magnetita mg/L	Diámetro Basal mm	Diámetro Medio mm	Índice de cosecha en base seca
0	14.08 AB	12.01 A	5.83 A
250	13.94 B	11.96 A	4.99 AB
500	14.91 AB	12.40 A	5.17 AB
1,000	15.03 A	12.21 A	4.51 B

Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

Estos datos sugieren que existe la posibilidad de que en concentraciones adecuadas, la aplicación foliar de magnetita aumente el grosor del tallo, lo cual puede deberse a que el hierro participa en procesos como fotosíntesis y procesos metabólicos que favorecen el crecimiento vegetativo, y, la aplicación de nanopartículas de magnetita aumenta el contenido de Fe significativamente, de acuerdo con resultados obtenidos por Yan *et al.* (2020).

Esta información pudiera relacionarse con los resultados obtenidos para peso seco total, de forma que se sugiere el impacto positivo en el desarrollo vegetativo. Los datos coinciden con lo que Reséndiz (2019) demostró en sus resultados, ya que la aplicación de nanopartículas de magnetita en concentraciones de hasta 250 ppm en solución, incrementa el diámetro de tallo de plantas de rosal.

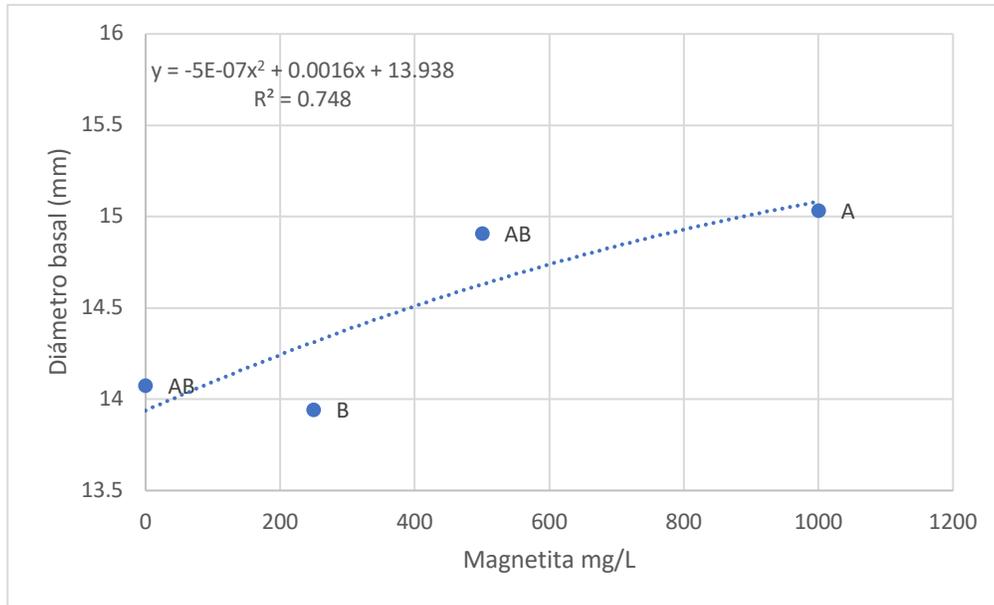


Figura 4. Efecto de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de nanopartículas de magnetita para diámetro basal de tallo en tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.). Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

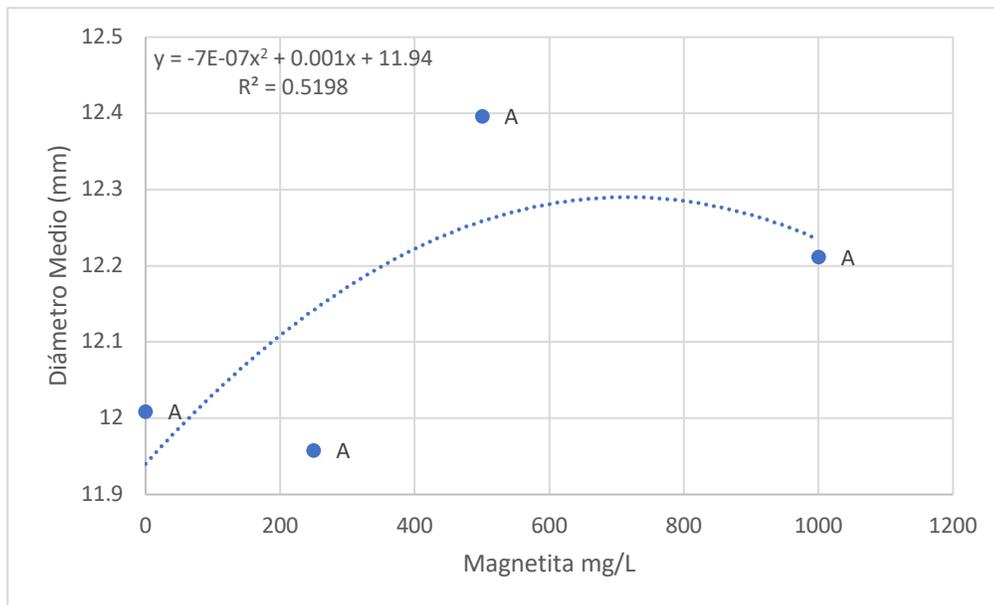


Figura 5. Efecto de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de nanopartículas de magnetita sobre diámetro medio de tallo en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.). Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

4.4 Índice de cosecha en base seca

La aplicación de nanopartículas de magnetita causó un decremento significativo en el índice de cosecha (Cuadro 2). Aplicaciones foliares de 1000 ppm de esta nanopartícula disminuyeron 22.72% el índice de cosecha en comparación con el tratamiento testigo (Figura 6). Esto sugiere que la magnetita promueve el crecimiento vegetativo sobre el crecimiento generativo. Ya que como reportan Jalal *et al.* (2020), el índice de cosecha es un indicador de la partición de la materia seca hacia el órgano reproductor, de forma tal que puede aumentar o disminuir si el rendimiento del fruto cambia más o menos rápidamente que la materia seca total (Asefa, 2019).

Brown *et al.* (2014) mencionan que el rendimiento tiene dos componentes principales: la biomasa, que hace referencia a la capacidad de producir y mantener la cantidad adecuada de material vegetativo, y la partición, que hace referencia a la capacidad de desviar la biomasa hacia el producto cosechable deseado.

Janmohammadi *et al.* (2016) encontraron que la aplicación foliar de nanofertilizantes como dióxido de titanio, óxido de zinc y óxido férrico aumentaron el índice de cosecha en cebada. Sheykhbaglou *et al.* (2010) reportan que la aplicación de nanopartículas de óxido de hierro mejoró 3.86% el índice de cosecha en plantas de soja, sugieren que el uso de nanopartículas de hierro (75 g L^{-1}) causan un incremento en peso seco de vaina y hojas secas debido al aumento de la concentración y absorción de hierro.

Ghaffari y Razmjoo (2015) reportan que el índice de cosecha aumentó con la aplicación de 2 g L^{-1} de nanoóxido de hierro en trigo, pero disminuyó a medida que aumentaron la tasa de aplicación, por lo que sugirieron que la tasa de aplicación de nanofertilizantes de Fe debe regularse cuidadosamente. Los autores establecen la posibilidad de que el tamaño de las nanopartículas de hierro y su área de superficie específica aumente el contacto con la planta, la eficacia, absorción y actividades del hierro en la misma, causando que sea más eficaz que otras fuentes y dosis de Fe.

Estos resultados pueden ser contrastantes debido a que el efecto de la aplicación de diferentes nanopartículas puede variar y depende de factores como tamaño de partícula, composición, concentración, tiempo de exposición, tipo de especie vegetal, entre otros factores (Guzmán *et al.*, 2021).

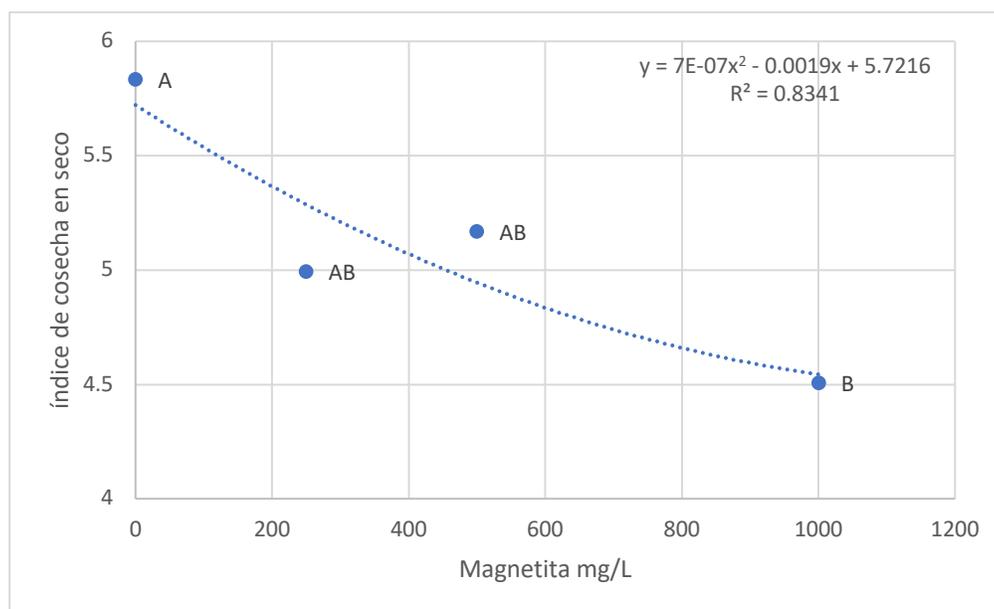


Figura 6. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita sobre el índice de cosecha en base seca en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.). Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

4.5 Firmeza

De acuerdo con el Cuadro 3, no se presentó diferencia estadísticamente significativa en la firmeza de fruto de plantas de tomate al realizar aplicaciones foliares de magnetita en diferentes concentraciones, sin embargo, este parámetro presenta una tendencia cuadrática en el que la firmeza fue más alta con 500 ppm de nanopartículas de magnetita (Figura 7). Esto sugiere que a pesar de que la aplicación foliar de magnetita tuvo un efecto tóxico en el rendimiento, este no se manifestó sobre la firmeza del fruto, lo cual implica que la calidad del mismo se mantiene, característica que es sumamente importante para la comercialización, vida de anaquel y aceptación en el mercado. Actualmente no existe suficiente información que evalúe la aplicación de nanopartículas de magnetita sobre esta variable. Sin embargo, los resultados no

coinciden con los reportados por Álvarez *et al.* (2011), quienes determinan en sus estudios que el aumento de firmeza en fruto de durazno se relaciona con deficiencia de hierro; ni con los resultados de López *et al.* (2019), quienes encontraron diferencia significativa en firmeza en cultivo de chile serrano al aplicar fulvatos de hierro en solución nutritiva. Las diferencias en los métodos de aplicación de Fe y las especies de cultivo pueden explicar esta variación.

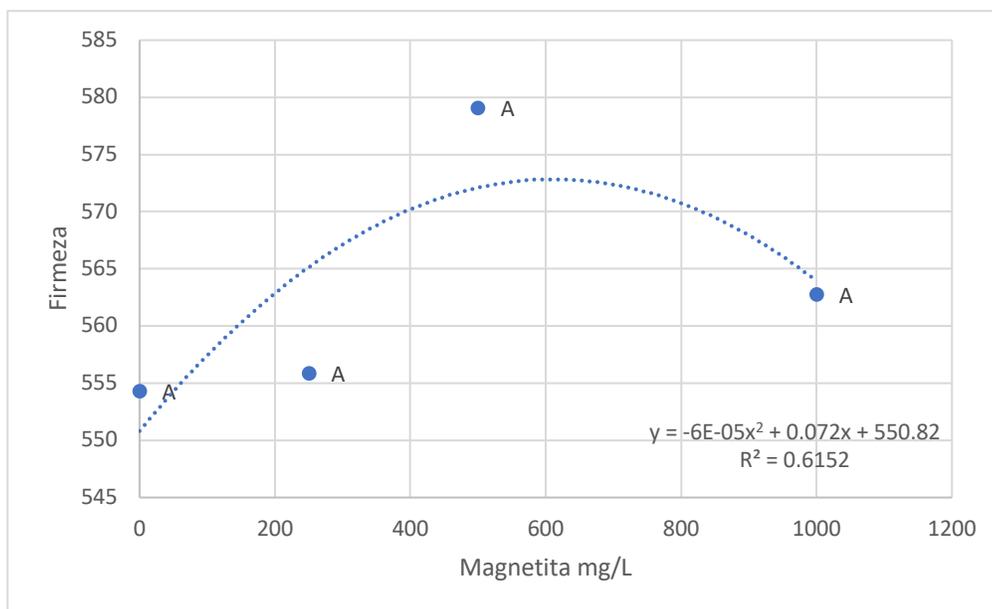


Figura 7. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) para firmeza de fruto. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

Cuadro 3. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) para parámetros de calidad en fruto

Magnetita mg/L	Firmeza gf	K en fruto mg/L
0	554.30 A	4177.1 B
250	555.86 A	4103.1 B
500	579.06 A	4054.7 B
1,000	562.78 A	4496.9 A

Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

4.6 Concentración de potasio en fruto y hojas

La aplicación de nanopartículas de magnetita causó un incremento significativo en la concentración de K en fruto de tomate cherry (Cuadro 3); aplicaciones de 1000 ppm de esta nanopartícula aumentaron esta variable en 7.65% en comparación de los frutos del tratamiento control, los cuales contenían menor concentración de K (Figura 8).

En hojas, la aplicación de magnetita provocó una disminución significativa sobre el contenido de potasio en hojas (Cuadro 4). La aplicación foliar de 250 ppm, 500 ppm y 1000 ppm de magnetita en comparación con el testigo, disminuyó el contenido de K en hojas en 23.36%, 44.58% y 43.65%, respectivamente.

Estos datos sugieren que la magnetita presenta un efecto sobre la translocación de K, la cual tiende a aumentar hacia el fruto, y causa la disminución de la misma hacia las hojas. Lo anterior puede deberse a que como sugirieron Luo *et al.* (1997) y Li *et al.* (2001), una concentración excesiva de Fe reduce la absorción de K en arroz, lo que estaría ocasionando que el escaso K que ya se presenta en las hojas sea reducido aún más por la translocación hacia el órgano con la demanda más fuerte como lo es el fruto de tomate.

Vittori *et al.* (2013) reportan que los frutos de tomate expuestos a nanopartículas de CeO_2 , Fe_3O_4 , SnO_2 muestran un enriquecimiento en K desde 59% comparados con el control; además señalan que estas nanopartículas pueden inhibir la translocación de K a tallo y hojas, al encontrar disminuciones en la concentración de este elemento en los órganos mencionados de hasta 50% con respecto al control. Sin embargo, no existen muchos estudios acerca de la influencia de la aplicación de nanopartículas sobre la acumulación de nutrientes en diferentes órganos de la planta.

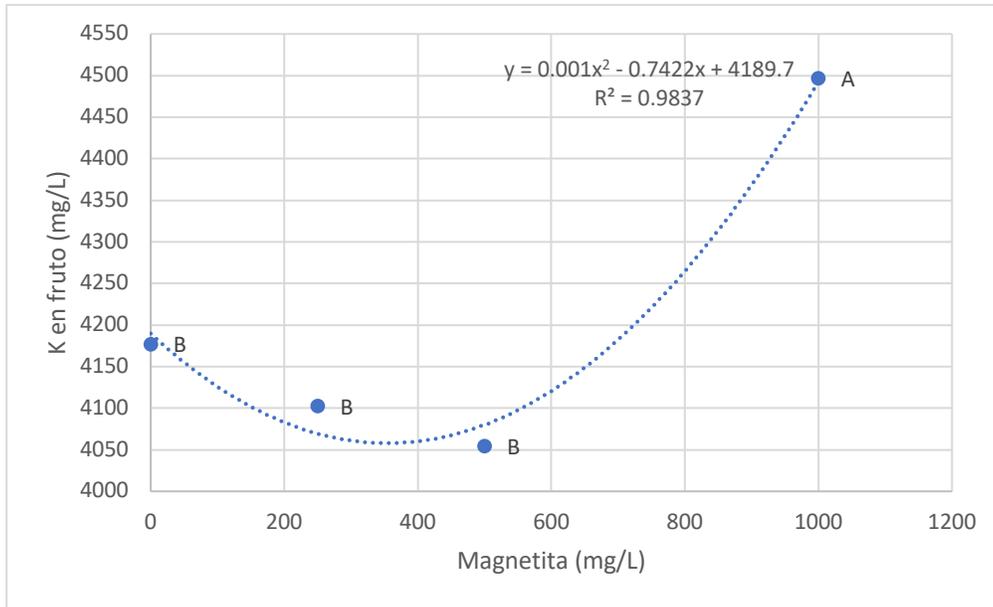


Figura 8. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) en la concentración de potasio (K) en fruto. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

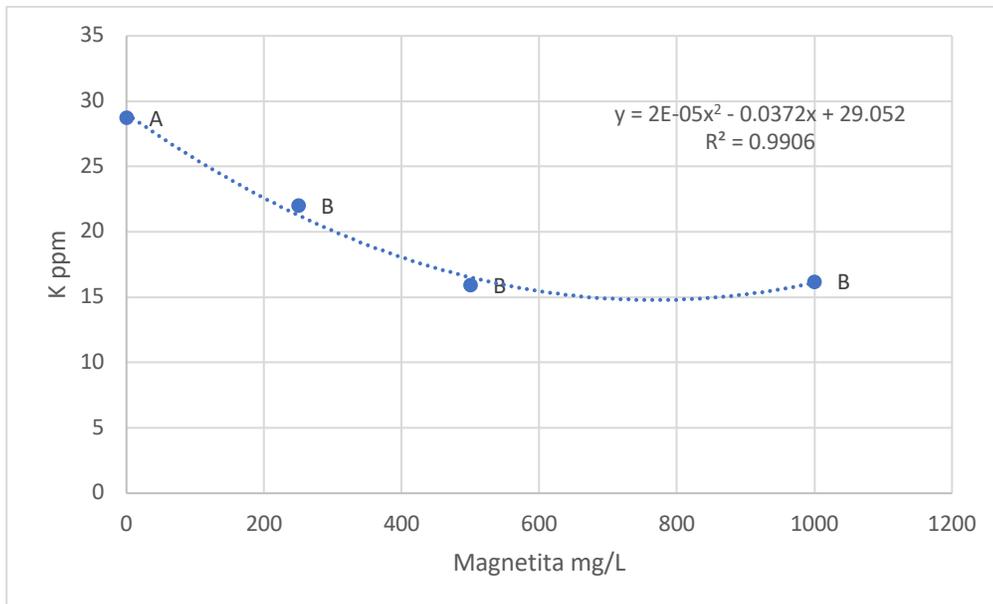


Figura 9. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) en la concentración de potasio (K) en hojas. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

4.7 Concentración de nitrógeno en hojas

La aplicación de nanopartículas de magnetita disminuyó significativamente la concentración de N en hojas (Cuadro 4). La disminución fue en el orden de 16.39%, 12.99% y 19.77% por las aplicaciones de 250 ppm, 500 ppm y 1000 ppm, respectivamente, en comparación con el tratamiento testigo (Figura 10). Esta información sugiere que la magnetita tiene un efecto negativo sobre el nitrógeno, disminuyendo su absorción.

Luo *et al.* (1997) reportaron en sus resultados que el exceso de Fe reduce la absorción de N, P, K y Mg en diferentes genotipos de arroz, sin embargo, las concentraciones de estos elementos fueron más altas que los criterios de deficiencia incluso en las plantas más afectadas, por lo que suponen que el retraso en el crecimiento puede no deberse a la deficiencia de los mismos.

Por otro lado, Li *et al.* (2001), obtuvieron un aumento en las concentraciones de N al incrementar los niveles de Fe en plantas de arroz híbridas. Así mismo, en el experimento realizado por Abou El-Nasr *et al.* (2015), se determina que la aplicación de nanopartículas de magnetita a 125 y 250 ppm aumentan el contenido de N en las hojas de árboles de peral (*Pyrus sp.*). Los autores explican tal efecto debido al papel del hierro en el crecimiento vegetativo y aumento en el contenido de clorofila.

Como se ha mencionado anteriormente, estas diferencias pueden deberse a la influencia de la concentración utilizada, tamaño de partícula y especie vegetal, entre otros factores.

Cuadro 4. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de magnetita en cultivo de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) en la concentración de macronutrientes en hoja.

Magnetita mg/L	N g/kg	P g/kg	K g/kg	Ca g/kg	Mg g/kg
0	30.98 A	5.86 A	28.76 A	34.75 A	6.83 A
250	25.90 B	6.58 A	22.04 B	31.60 A	6.61 A
500	26.95 B	5.06 A	15.94 B	34.15 A	6.75 A
1,000	24.85 B	6.18 A	16.21 B	33.87 A	6.83 A

Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

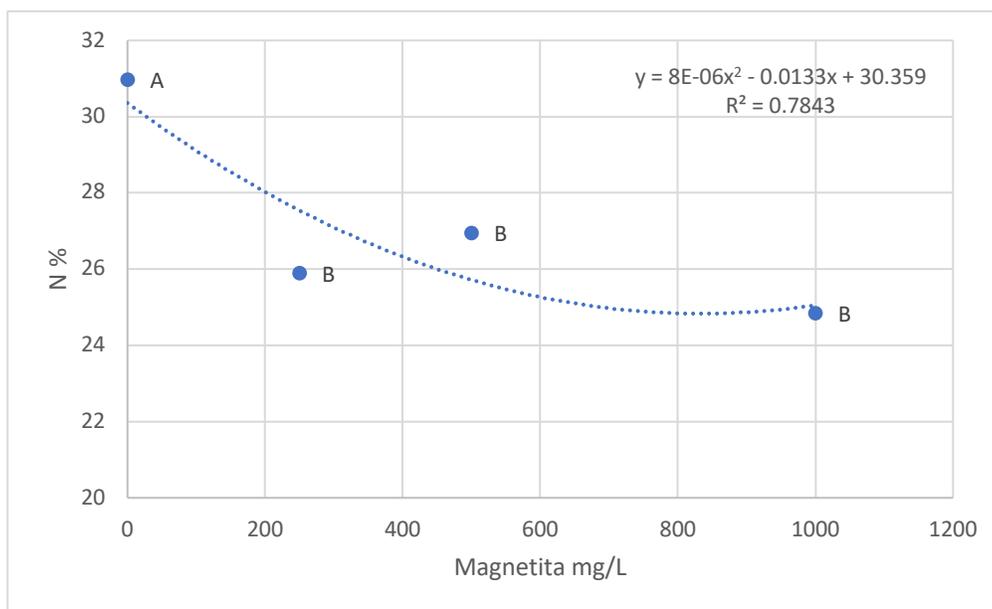


Figura 10. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) en la concentración de nitrógeno (N) en hojas. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

4.8 Concentración de fósforo, calcio y magnesio en hojas

La aplicación foliar de magnetita no causó efectos significativos en la concentración de P, Ca y Mg en la hoja (Cuadro 4), lo que sugiere que a pesar del efecto tóxico que presentó en rendimiento, no afectan la absorción de estos macronutrientes en los tejidos vegetales. Lo anterior coincide con los resultados reportados por Yan *et al.* (2020), quienes determinan en su experimento que la aplicación de magnetita en el suelo, no presenta diferencia significativa en contenido de Ca y Mg.

Por otro lado, en el experimento realizado por Vittori *et al.* (2013), se determinó que diversos tipos de nanopartículas como SnO₂, TiO₂, Ag-NP, Ni-NP, Fe₃O₄ pueden causar incrementos o decrementos en el contenido de Ca, Mg, P, Na en órganos de plantas de tomate, dependiendo del tamaño, tipo de nanopartícula y concentración, entre otros factores.

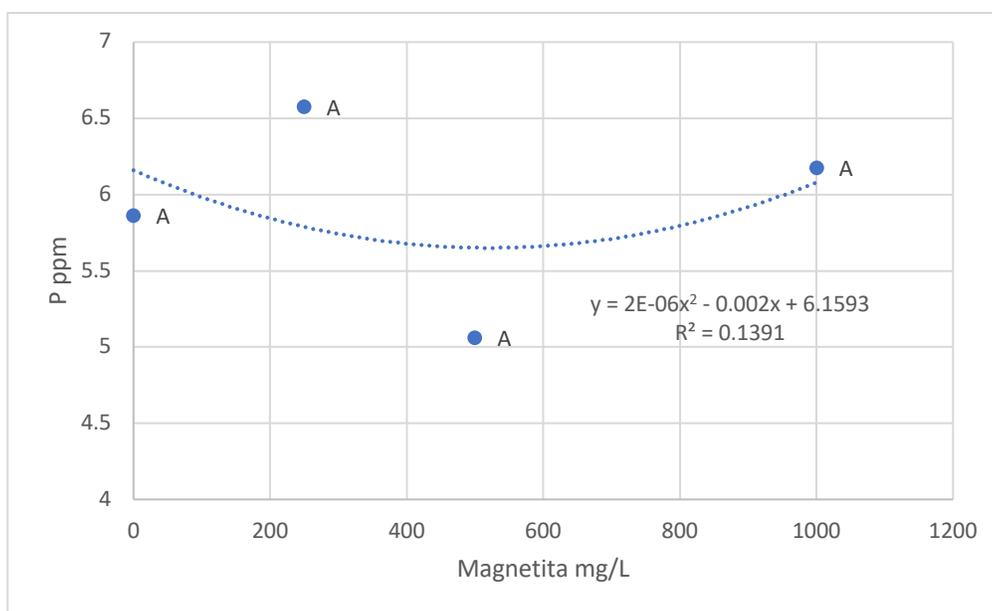


Figura 11. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) en la concentración de fósforo (P) en hojas. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

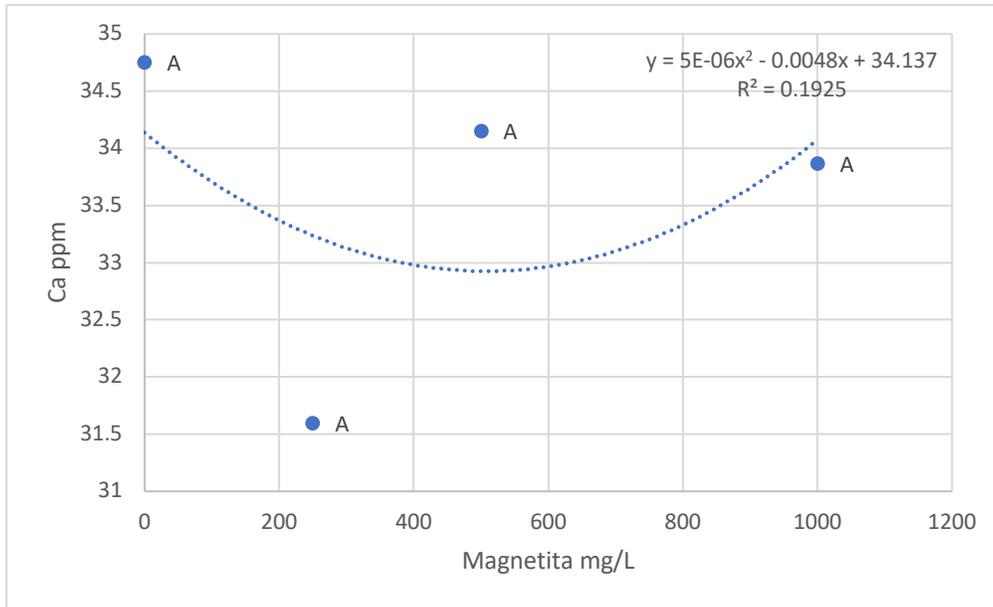


Figura 12. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) en la concentración de calcio (Ca) en hojas. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

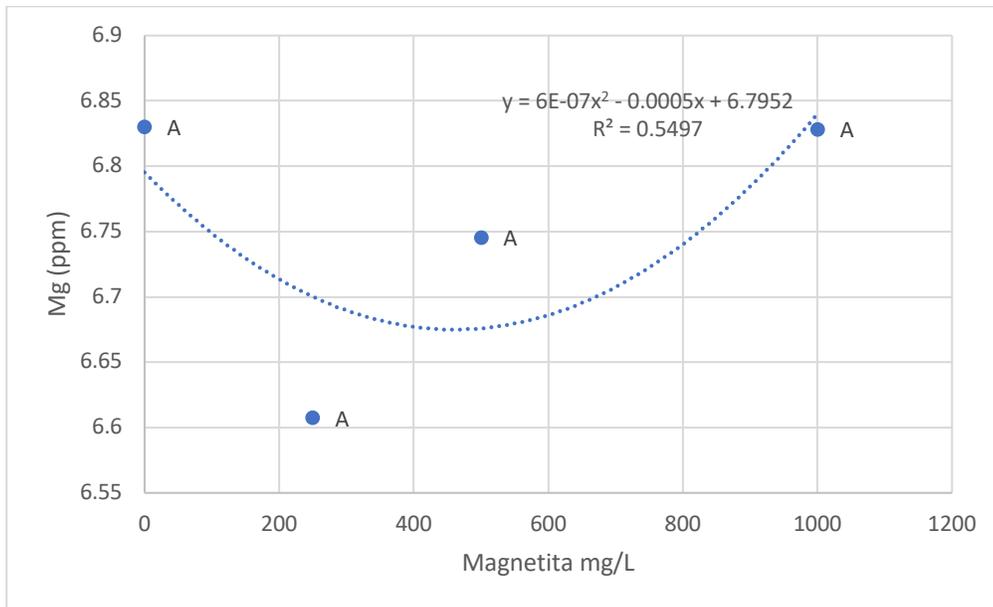


Figura 13. Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) en la concentración de magnesio (Mg) en hojas. Promedios con la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $p < 0.05$.

V. CONCLUSIONES

La aplicación foliar de nanopartículas de magnetita provocó un efecto de toxicidad sobre el rendimiento en el cultivo de tomate cherry, sin embargo, es necesario probar dosis más bajas de esta nanopartícula para determinar si promueve una respuesta favorable del tomate a bajas concentraciones. Este efecto podría estar asociado con un desbalance nutrimental, ya que la magnetita ocasionó una reducción en la concentración foliar de N y K; asimismo aumentó la concentración de K en el fruto, lo que sugiere que la aplicación foliar de magnetita influye en la absorción y translocación de dichos nutrientes. La disminución en rendimiento pudo estar relacionada con la promoción del crecimiento vegetativo, puesto que se observó un decremento en el índice de cosecha en base seca y tendencia en aumento del peso seco de los órganos vegetativos.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Abou El-Nasr, M., El-Hennawy, H., El-Kereamy, A., Abou El-Yazied, A., Salah Eldin, A. (2015). Effect of magnetite nanoparticles (Fe_3O_4) as nutritive supplement on pear saplings. *Middle East Journal of Applied*, 5(3), 777-785.
- Aguilar, J. (2020). Respuesta del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación de nanopartículas de magnetita. Tesis de licenciatura – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Ahammed, G., Wu, M., Wang, Y., Yan, Y., Mao, Q., Ren, J., Ma, R., Liu, A., Chen, S. (2020). Melatonin alleviates iron stress by improving iron homeostasis, antioxidant defense and secondary metabolism in cucumber. *Scientia Horticulturae*, 265, 1-10. DOI: 10.1016/j.scienta.2020-109205
- Ali, A., Hira, M., Ul Haq, I., Phull, R., Ali, S., Hussain, A. (2016). Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology, Science and Applications*, 9, 49-67.
- Allende, M., Salinas, L., Rodríguez, F., Olivares, N., Riquelme, J., Antúnez, A., Martínez, J., Corradini, F., Sepúlveda, P., Abarca, P., Guzmán, A., Felmer, S. (2017). Manual de cultivo del tomate bajo invernadero. *Boletín INIA*, 377, 114 pp. ISSN: 0717-4829.
- Álvarez, A., Melgar, J., Abadía, J., Abadía, A. (2011). Effects of moderate and severe iron deficiency chlorosis on fruit yield, appearance and composition in pear (*Pyrus communis* L.) and peach (*Prunus persica* L. Batsch). *Environmental and Experimental Botany*, 71(2), 280-286. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.12.012
- Asefa, G. (2019). The role of harvest index in improving crop productivity: a review. *Journal of Natural Sciences Research*, 9(6), 24-28. DOI: 10.7176/JNSR
- Aslani, G., Bagheri, S., Muhd, N., Shukor, A., Golestan, F., Baghdadi, A. (2014). Effects of engineered nanomaterials on plants growth: An overview. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-28. DOI: 10.1155/2014/641759
- Ávila-Quezada, G.D., Ingle, A., Golinska, P., Rai M. (2022). Strategic applications of nano-fertilizers for sustainable agriculture: Benefits and bottlenecks. *Nanotechnology Reviews*, 11, 2123-2140. DOI: 10.1515/ntrev-2022-0126.
- Barrios, J. (2015). Evaluación de sistemas de podas sobre el rendimiento de tomate; Catarina, San Marcos. Tesis de grado – Universidad Rafael Landívar.
- Benton, J. (2007). *Tomato plant culture: in the field, greenhouse and home garden*. Second edition. CRC Press. ISBN: 978-0-8493-7395-4

- Bremner, J.M. (1996). Total nitrogen. In: Methods of soil analysis. Part II. Chemical methods. Ed. D.L. Sparks, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, 1085-1086.
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., Zhao, F. (2012). Function of nutrients: Micronutrients in Marschner, P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3a ed., 191-248). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8
- Brown, J., Caligari, P., Campos, H. (2014). Plant breeding. Second edition. Wiley Blackwell. pp 26. ISBN: 978-0-470-65830-7
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). Manual tomate. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial. Núcleo ambiental, 55 pp.
- Carriazo, J., Noval, V., Ochoa, C. (2017). Magnetita (Fe_3O_4): una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. Revista Colombiana de Química, 46(1), 42-59. DOI: 10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62831
- Crisanto, A., Vera, A., Chávez, J., Carrillo, J. (2010). Calidad de frutos de tomates silvestres (*Lycopersicon esculentum* var. Cerasiforme Dunal) de Oaxaca, México. Revista Fitotecnia Mexicana, 33(4), 7-13.
- Cuellar, J., Cooman, A., Arjona, H. (2001). Incremento de la productividad del cultivo de tomate bajo invernadero mejorando la polinización. Agronomía Colombiana, 18(1-2), 7-13.
- Díaz, C. (2007). Caracterización agrocadena de tomate. Dirección Regional Central Occidental. MAG, 46p.
- Escobar, H., Lee, R. (2009). Manual de producción de tomate bajo invernadero. Segunda Edición. Centro de investigaciones y asesorías agroindustriales. ISBN: 978-958-725-025-1
- Fahad, B., Agheem, M., Memon, S., Baloch, A., Tunio, A., Pato, A., Jagirani, M., Panah, p., Gabole, A., Qasim, S. (2020). Efficient mitigation of cadmium and lead toxicity in coriander plant utilizing magnetite (Fe_3O_4) nanofertilizer as growth regulator and antimicrobial agent. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 102(16), 1-12. DOI: 10.1080/03067319.2020.1776861
- Flores, M. (2023). Efecto de la aplicación de nanopartículas de magnetita y dióxido de zinc en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.). Tesis de licenciatura - Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- García, E. (2009). Cáncer bacteriano del tomate en Manual de tomate de invernadero. Castellanos, J. INTAGRI, 383-394.

- García, J. (2019). Respuestas fisiológicas y bioquímicas inducidas por nanopartículas de ZnO en semillas y plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq). Tesis doctoral - Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Garzón, J., Bujanos, R., Marin, A. (2007). Manejo integrado de Paratrypanosoma *Bactericera cockerelli*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
- Ghafariyan, M., Malakouti, M., Dadpour, M., Stroeve, P., Mahmoudi, M. (2013). Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. *Environ Science & Technology*, 47(18), 10645-10652. DOI: 10.1021/es402249b
- Ghaffari, H., Razmjoo, J. (2015). Response of durum wheat to foliar application of iron fertilizers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 7, 321-331.
- Godoy, P., Zolezzi, M., Sepúlveda, P., Estay, P., Chacón, G. (2018). Principales plagas y enfermedades en lechuga, tomate y cebolla. INIA, 388, 58 pp. ISSN 0717-4829.
- Gómez, G.M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2), 75-80. DOI: 10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191
- Gorini, F. (2018). Guía completa del cultivo del tomate. De Vecchi Editorial. 86 pp. ISBN: 978-1-68325-585-7
- Grijalva, R., Macías, R., Grijalva, S., Núñez, F., Robles, F. (2014). Productividad de cultivares de tomate cherry bajo condiciones de invernadero en el noroeste de Sonora. *Biotecnia*, 16(2), 27–30. <https://doi.org/10.18633/bt.v16i2.43>
- Guzmán, R., Hernández, J., Parola, I. (2021). Propiedades y ventajas del tomate cherry negro. *Perspectivas de la ciencia y la tecnología*, 4(7), 59-76.
- Guzmán, G., Trejo, L., Ramírez, S., Salinas, J., Bello, J., Alcántar, G., Hidalgo, J., Gómez, F. (2021). Silver nanoparticles increase nitrogen, phosphorus and potassium concentrations in leaves and stimulate root length and number of roots in tomato seedling in a hormetic manner. *Dose Response*, 19(4), 1-15. DOI: 10.1177/15593258211044576
- Harper, J. (2006). Tomato production. *Agricultural alternatives*. Agricultural Research and Cooperative Extension.
- Hernández, O., Valdez, L., Alía, I., Cartmill, A., Cartmill, D. (2019). Tomato fruit yield, quality, and nutrient status in response to potassium: calcium balance and electrical conductivity in the nutrient solution. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 484-492. ISSN 0718-9508

- Iannone, M., Groppa, M., de Sousa, M., van Raap, M., Benavides, M. (2016). Impact of magnetite iron oxide nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) development: Evaluation of oxidative damage. *Environmental and Experimental Botany*, 131, 77-88. DOI: <http://fx.doi.org/doi.10.1016/j.envexpbot.2016.07.004>
- Islam, N. (2014). *Nanotechnology. Recent trends, emerging issues and future directions*. Nova Science Publishers. New York. ISBN: 978-1-63117-567-1
- Jalal, A., Shah, S., Carvalho, M., Khan, A., Shah, T., Hussain, Z., Younis, M., Ilyas, M. (2020). Yield and phenological indices of wheat as affected by exogenous fertilization of Zin and Iron. *Revista Brasileira de Ciencias Agrarias*, 15(1), 1-8. DOI: 10.5039/agrarian.v15i1a7730
- Jaramillo, J., Rodríguez, V., Aguilar, P. (2012). Factores climáticos y su influencia en la producción de tomate en Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas. *Jaramillo, N. CORPOICA*, 141-164.
- Janmohammadi, M., Amanzadeth, T., Sabaghnia, N. & Dashti, S. (2016). Impact of foliar application of nano micronutrient fertilizers and titanium dioxide nanoparticles on the growth and yield components of barley under supplemental irrigation. *Acta agriculturae Slovenica*, 107(2), 265-276. DOI: 10.14720/AAS.2016.107.2.01
- Jat, R., Shekh, S., Shah, J., Vainshnav, P., Suresh, P. (2021). Effecto of stabilized magnetite nanofertilizer on growth, yield and nutrient contents of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* L.). *Pantnagar Journal of Research*, 19(2), 180-186.
- Jeyasubramanian, K., Thoppey, U., Hikku, G., Selvakumar, N., Subramania, A., Krishnamoorthy, K. (2016). Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles. *RSC Advances*, 6(19), 15451-15459. DOI: 10.1039/c5ra23452e
- Khodakovskaya, M., Kim, J., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., Cernigla, C. (2013). Carbon nanotubes as plan growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*, 9(1), 115-123. DOI: 10.1002/smll.201201225
- Le Van, N., Ma, C., Shang, J., Rui, Y., Liu, S., Xing, B. (2016). Effects of CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton. *Chemosphere*, 144, 661-670.
- Leal-Cervantes, M., Arvizu-Medrano, S., Martínez-Peniche, R., Martínez-González, N., Hernández-Iturriaga, M. (2018). Microbiological quality and incidence of salmonella on cherry tomatoes at retail in Querétaro, México. *Jorunal of Food Protection*, 81(4), 614-618. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-17-377

- Li, H., Yang, X. & Luo, A. (2001). Ameliorating effect of potassium on iron toxicity in hybrid rice. *Journal of Plant Nutrition*, 24(12), 1849-1860. DOI: 10.1081/PLN-100107598
- Li, P., Wang, A., Du, W., Mao, L., Wei, Z., Wang, S., Zhao, L. (2020). Insight into the interaction between Fe-based nanomaterial and maize (*Zea mays*) plants at metabolic level. *Science of the Total Environment*, 738(78), 1-9. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139795
- Lira, R., Méndez, B., De los Santos, G., Vera, I. (2016). Potencial de la nanotecnología para el desarrollo de la agricultura sustentable en Lira, R., Méndez, B. *Agronano Tecnología*. CIQA, 20-41. ISBN: 978-607-7692-37-9
- Lira, R., Méndez, B., De los Santos, G., Vera, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9-24. DOI: 10.15174/au.2018.1575
- Liu, Q., Zhang, X., Zhao, Y., Lin, J., Shu, C., Wang, C., Fang, X. (2013). Fullerene-induced increase of glycosyl residue on living plant cell wall. *Environmental Science and Technology*, 47, 7490-7498.
- Liu, R., Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports*, 4, 5686-5691.
- Liu, R., Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514, 131-139. DOI: 10.1016/j.scototenv.2015.01.104.
- López, L. (2017). Manual técnico del cultivo del tomate *Solanum lycopersicum* L. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 121 pp. ISBN: 978-9968-586-27-6
- López-Luna, J., Silva-Silva, M., Martínez-Vargas, S., Mijangos-Ricardez, O., González-Chávez, M., Solís-Domínguez, F., Cuevas-Díaz, M. (2016). Magnetite nanoparticle (NP) uptake by wheat plants and its effect on cadmium and chromium toxicological behavior. *Science of the Total Environment*, 565, 941-950.
- López, R., Peña, F., Lozano, C., Benavides, A., Gonzáles, J. (2019). Efecto de un fulvato de hierro sobre la calidad y producción de frutos de chile serrano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1367-1378. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1779>
- Luna, J. (2017). Sustratos, soluciones nutritivas e intensidad de raleo de fruos en la producción t calidad de tomate cherry en hidroponía. Tesis de maestría – Universidad Autónoma de Nayarit.

- Luo, A., Jing, G., Wu, P., Ni, J., Jiang, A., Zhang, Y. (1997). Rice genotype differences in nutrient status under excessive ferric-iron conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 20(10), 1361-1373.
- Mahender, A., Swamy, B., Anandan, A., Ali, J. (2019). Tolerance of iron-deficient and toxic soil conditions in rice. *Plants*, 8(2), 31. DOI: 10.3390/plants8020031
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier. Third edition. ISBN: 978-0-12-384905-2
- Márquez, C., Cano, P., Chew, I., Moreno, A., Rodríguez, N. (2006). Sustratos en la producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(2), 183-188.
- Martínez, J., Vicente, A., Montañéz, J., Rodríguez, R., Aguilar, C. (2012). Un tesoro percedero en México: el tomate, tecnologías para prolongar su vida de anaquel. *Investigación y Ciencia*, 54, 42-48.
- Meza, E. (2022). Caracterización del cultivo de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. Cerasiforme) en sistemas hidropónicos. Tesis de licenciatura – Universidad Técnica de Babahoyo. Ecuador.
- Monardes, H. (2009). Manual de cultivo de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill): Características botánicas. Origen. Universidad de Chile, 13 pp.
- Morteza, S., Karimi, M., Teixeira, J. (2019). The use of nanotechnology to increase quality and yield of fruit crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 25-31. DOI: 10.1002/jsfa.10004
- Mukhopadhyay, S. (2014). Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints. *Nanotechnology, Science and Applications*, 7(2), 63-71. DOI: 10.2147/NSA.S39409.
- Naderi, M.R., Shahraki, D.A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19), 2229-2232.
- Pérez, A., Leyva, D., Gómez, F. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 175-189. DOI: 10.29312/revmexca.v9i1.857
- Pradhan, S., Patra, P., Das, S., Chandra, S., Mitra, S., Kumar, K., Akbar, S., Palit, P., Goswami, A. (2013). Photochemical modulation of biosafe manganese nanoparticles on *Vigna radiata*: a detailed molecular, biochemical, and biophysical study. *Environmental Science and Technology*, 47(22), 13122-13131.

- Racuciu, M., Tecucianu, A., Oancea, S. (2022). Impact of magnetite nanoparticles coated with aspartic acid on the growth, antioxidant enzymes activity and chlorophyll content of maize. *Antioxidants*, 11(6), 1193. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11061193>
- Rai, M.K. y Ávila-Quezada, G.D. (2023). Nanotechnology in combating plant pathogens: Emerging trends, chances and challenges. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(1), 1-4. DOI: 10.18781/R.MEX.FIT.2212-6.
- Ramírez, M. (2015). Variabilidad natural de caracteres morfológicos y fisiológicos de la raíz de tomate: implicaciones en la mejora de la eficiencia del uso del agua. Tesis doctoral – Universidad de Málaga.
- Ramsden, J. (2016). *Nanotechnology: An Introduction*. Elsevier. Second edition. ISBN: 978-0-323-39311-9
- Rameshaiah, G., Pallavi, J., Shabnam, S. (2015). Nano fertilizers and nano sensor as an attempt for developing smart agriculture. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1), 314-320.
- Reséndiz, R. (2019). Evaluación de nanopartículas de óxido de hierro en cultivo hidropónico de rosa (*Rosa hybrida* L.) en invernadero. Tesis de licenciatura – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Risk, M. (2015). Nanobioingeniería: Historia y futuro. *TecnoLógicas*, 18(34), 9-11. DOI: 10-22430/22565337.216
- Rodríguez, N. (2014). Micronutrientes en la agricultura de alto rendimiento. Intagri. México.
- Sepúlveda, R., González, V., Ardiles, S. (2013). Poda y deshoje en cultivo de tomate bajo malla antiafido en el valle de Azapa. *Informativo INIA*, 77, 1-4.
- Siddiqui, H.M., Al-Whaibi, H., Mohammad, F. (2015). *Nanotechnology and plant sciences: Nanoparticles and their impact on plants*. Springer International Publishing Switzerland. DOI: 10.1007/978-3-319-14502-0
- Singh, A., Lal, M., Singh, S. Khan, A., Singh, S., Tiwari, A. (2015). Scope of nanotechnology in future agriculture-an overview. *Agrica*, 3(2), 1-13.
- Sharma, C.P. (2006). *Plant micronutrients*. Science Publishers. USA. ISBN: 978-1-57808-416-6
- Sheykhbaglou, R., Sedgui, M., Tajbakhsh, S., Seyed, R. (2010). Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(2), 112-113. DOI: 10.15835/nsb224667

- Soltanpour, P.N., Johnson, G.W., Workman, S.M., Jones, J.B., Miller, R.O. (1996). Inductively coupled plasma mass spectrometry. In: Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods, ed. Sparks, D.L., Soil Science Society of North America, Madison, 91-139.
- The Royal Society. (2004). Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. ISBN-0-85403-604-0
- Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: the next generation. Trends in Food Science and Technology, 39(1), 47-62. DOI: 10.1016/j.tifs.2014.06.009
- Vittori, L., Carbone, S., Gatti, A., Vianello, G., Nannipieri, P. (2013). Uptake and translocation of metals and nutrients in tomato grown in soil polluted with metal oxide (CeO₂, Fe₃O₄, SnO₂, TiO₂) or metallic (Ag, Co, Ni) engineered nanoparticles. Environmental Science and Pollution Research, 22(3), 1841-1853. DOI: 10.1007/s11356-014-3509-0
- Wang, P., Lombi, E., Zhao, F., Kopittke, P. (2016) Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. Trends in Plant Science, 21(8), 699-712. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.04.005
- Wang, Y., Wang, S., Xu, M., Xiao, L., Dai, Z., Li, J. (2019). The impacts of Fe₃O₄ nanoparticles on the physiology and fruit quality of muskmelon (*Cucumis melo*) in plants. Environmental Pollution, 249, 1011-1018.
- Welch, R., Shuman, L. (2011). Micronutrient nutrition of plants. Critical Reviews in Plant Sciences, 14(1), 49-82. DOI: 10.1080/713608066
- Xue, J., Luo, Z., Li, P., Li, P., Ding, Y., Cui, Y., Wu, Q. (2014). A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles. Scientific Reports, 4(1), 1-9. DOI: 10.1038/srep05408
- Yan, L., Li, P., Zhao, X., Ji, R., Zhao, L. (2020). Physiological and metabolic responses of maize (*Zea mays*) plants to Fe₃O₄ nanoparticles. Science of the Total Environment, 718, 1-10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137400
- Yang, F., Liu, C., Gao, F., Su, M., Wu, X., Zheng, L., Liu, C., Hong, F., Yang, P. (2007). The improvement of spinach growth by nano-anatase TiO₂ treatment is related to nitrogen photoreduction. Biological Trace Element Research, 119(1), 77-88.
- Zágoyo, E., Foladori, G. (2010). La nanotecnología en México: un desarrollo incierto. Economía, Sociedad y Territorio, 10(32), 143-178. DOI: 10.22136/est00201055
- Zhao, L., Sun, Y., Hernandez, J., Servin, A., Hong, J., Niu, G., Peralta, J., Duarte, M., Gardea, J. (2013). Influence of CeO₂ and ZnO nanoparticles on cucumber

physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: a life cycle study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(49), 11945-11951.

Zhang, Y., Liang, H., Han, J., Xu, X., Li, X., Zhao, H., Bai, L., Shi, Y., Ahammed, G. (2023). Interactive effects of iron and photoperiods on tomato plant growth and fruit quality. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, 376-389.

Zhu, H., Han, J., Xiao, J., Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal Environmental Monitoring*, 10(6), 713-717. DOI: 10.1039/b805998e