



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS

MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA PROTEGIDA

**PRODUCCIÓN DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L. VAR.
AQUILES F1) CON APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS
METÁLICAS BAJO CONDICIONES DE AGRICULTURA PROTEGIDA**

TESIS
QUE PRESENTA

SAMUEL VALLE PANTOJA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

MAESTRO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

DIRECTOR DE TESIS
DR. PATRICIO APÁEZ BARRIOS

Apatzingán, Michoacán, México. Junio 2025



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRODUCCIÓN DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L. VAR. AQUILES F1)
CON APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS BAJO CONDICIONES DE
AGRICULTURA PROTEGIDA**

**TESIS QUE PRESENTA
SAMUEL VALLE PANTOJA**

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como
requisito parcial, para obtener el grado de:

MAESTRO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

COMITÉ PARTICULAR

Director Dr. Patricio Apáez Barrios

Asesor Dr. Noé Armando Ávila Ramírez

Asesor Dr. José Luis Escamilla García

Asesor Dr. Abimael López López

Asesor Dr. José de Jesús Ayala Ortega

Apatzingán, Michoacán, México. Junio 2025

AGRADECIMIENTOS

A la Doctora Maricela Apáez Barrios que el tiempo que hizo el favor de impartir sus conocimientos siempre me motivó y alentó para echarle ganas y no abandonar este proyecto. Dando todo apoyo como catedrática y amiga siempre orientándome de la mejor manera.

Al Doctor Juan Carlos Álvarez Hernández que el tiempo que nos impartió sus materias siempre lo hizo con dedicación.

A mi director de tesis el Doctor Patricio Apáez Barrios a quien agradezco infinitamente todo el apoyo que me brindo y que gracias a él poder concluir este trabajo y con él aprendí además de sus materias conocer que los compromisos se cumplen.

Al Doctor José Luis Escamilla García mi maestro de muchos años quien siempre ha sido muy comprometido con todos sus alumnos y de manera muy práctica comparte sus conocimientos con sus alumnos.

Al Doctor Abimael López López que me impartió temas muy interesantes como lo fueron, los hongos, virus y bacteria, las cuales desde mi punto de vista son muy importante en la vida diaria de los agrónomos.

Al Doctor Noé Armando Ávila Ramírez maestro y amigo de muchos años, quien cuando necesité de su apoyo cuando enferme me brindó incondicionalmente, además agradezco todos los conocimientos que me enseñó.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ciencias Agropecuarias por darme la oportunidad de continuar con mi formación académica en sus instalaciones y también por permitir realizar mis investigaciones en sus casas malla sobre de la institución.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por continuar apoyando con estímulos económicos la investigación científica, permitiendo el desarrollo humano de los investigadores y de México.

Finalmente agradezco a Antonio Aguirre por todo el apoyo que me brindó con el acondicionamiento de terreno de investigación y algunas labores culturales que se realizaron.

DEDICATORIA

Primeramente, dedico todo este trabajo a Dios que a pesar de algunas dificultades adversas de salud que se presentaron me dio las fuerzas para seguir adelante y concluir este trabajo haciendo posible obtener el grado.

A mi madre que en gloria este que me enseñó a luchar en la vida y no rendirme jamás, a luchar por los sueños y a tener lo que uno quiere en la vida.

A mi esposa Celia Morfín Huerta que siempre ha sido un pilar fundamental en mi vida y me ha apoyado en todo para que yo pueda salir adelante en la vida preparándome a diario.

A mi hijo Marcos Gerardo Valle Morfín que me hubiera gustado que todos los logros también fueran de él, ya que es un hijo muy bueno y noble.

A mi hija María Esther Valle Morfín quien tiene todos mis respetos por ser la profesionista que es, me llena de orgullo y más en especial que no pensaba que fuera posible que a mi edad consiguiera este mérito

A mi Hija Samantha Paulina Valle Morfín. Una gran Licenciada en Derecho que admiro por ser la mujer que es y sobre todo una gran madre para sus hijas.

A mi Nieta Leath Natalia Espinosa Valle por ser la mejor alumna de su escuela y con la cual estábamos compitiendo por la mejor calificación.

Finalmente, a mi Cuñada Ma. Guadalupe Morfín Huerta ya que siempre me ha apoyado en todo con la finalidad que mi familia siempre este bien y tenga lo mejor.

La verdad vendrá del cielo
los propios y los ajenos
la vergüenza y el miedo
de cenizas y de fuego.
Samuel Valle Pantoja.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	3
Objetivo específico	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Importancia del cultivo.....	4
Estadísticas de producción mundial.....	5
Producción nacional.....	6
Producción de chile en Michoacán.....	7
Taxonomía del cultivo.....	8
Descripción botánica.....	8
Propiedades nutricionales.....	9
Requerimientos edáficos y climático para el cultivo.....	11
Temperatura y humedad relativa.....	11
Precipitación y luz.....	12
Producción bajo condiciones protegidas.....	12
Uso de nanotecnología en la agricultura.....	13
Nanopartículas como nutrientes en la agricultura.....	13
Vías de absorción y traslocación de las nanopartículas en las plantas....	14
Nanopartículas del Zn.....	15
Nanopartículas de CuO.....	18
Efectos tóxicos del cobre en las plantas.....	19
Nanopartículas de hierro.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
Descripción del área de estudio.....	24

Localización del sitio experimental.....	24
Metodología.....	25
Efecto del clima sobre la fenología.....	25
Genotipo experimental.....	25
Producción de plántula.....	26
Estructura para el establecimiento del cultivo.....	27
Preparación del terreno y acondicionamiento del sitio experimental.....	29
Trasplante y manejo del cultivo.....	31
Aplicación de riego y nutrición del cultivo.....	31
Tutorado de las plantas.....	34
Control de plantas y enfermedades.....	34
Polinización.....	35
Diseño experimental y tratamientos.....	35
Variables morfológicas.....	38
Variables de rendimiento.....	38
Análisis estadísticos.....	39
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
Efecto del clima en las etapas fenológicas.....	40
Variables morfológicas.....	42
Altura de la planta.....	42
Diámetro del tallo.....	45
Variables de rendimiento.....	47
Números de frutos.....	47
Rendimiento de frutos.....	48
Longitud, diámetro de frutos y peso promedio de frutos.....	50
CONCLUSIONES.....	52
LITERATURA CITADA.....	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Pág.
2.1. Taxonomía del chile serrano.....	8
2.2. Contenido nutrimental por cada 100 g de frutos fresco.....	10
3.1. Características físicas y químicas del suelo de la casa malla sombra.....	32
3.2. Resultados del análisis fiscos-químicos del agua (Análisis CIDAM, 2020).....	32
3.3. Solución Steiner ajustada utilizada en el cultivo.....	33
3.4. Identificación y distribución de los tratamientos en el sitio experimental..	36
4.1. Nivel de significancia y prueba de comparación de medias del número, longitud, diámetro y peso promedio de frutos de chile serrano con aplicación de nanopartículas metálicas.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.		Pág.
2.1.	Principales estados productores de chiles serranos en México del año 2023.....	7
2.2.	Principales municipios productores de chile serrano en Michoacán....	8
2.3.	Frutos de chile serrano en madurez de cosecha.....	9
3.1.	Localización del experimento. Fuente: Google Earth.....	24
3.2.	Semilla y fruto de chiles serranos Aquiles F-1 Hyb.....	25
3.3.	Charola utilizada para el almacigo y siembre del chile serrano.....	26
3.4.	Colocación de las charolas en bolsas de plástico y plántulas de chile serrano.....	27
3.5.	Características de la malla sombra utilizadas en el estudio.....	28
3.6	Sistema de riego utilizado en el cultivo de chile serrano.....	29
3.7.	Preparación del terreno y colocación del acolchado.....	30
3.8.	Instalación del acolchado en las camas de siembra.....	30
3.9.	Trasplante de chile serrano en las camas de siembra.....	31
3.10.	Atomizador usado en las aplicaciones y suministro de los tratamientos.....	37
3.11.	Balanza utilizada para el pesaje de las nanopartículas y productos usados como nanopartículas.....	38
4.1.	Efectos del clima en las etapas fenológicas y temperaturas máximas y mínimas.....	40
4.2.	Dinámica de la altura de la planta en función de los tratamientos.....	42

4.3.	Prueba de comparación de medias de la altura de la planta de chile serrano a los 50 días después del trasplante.....	43
4.4.	Dinámica del diámetro del tallo del chile serrano en función de los tratamientos.....	45
4.5.	Prueba de comparación de medias del diámetro del tallo la planta de chile serrano a los 50 días después del trasplante.....	46
4.6.	Prueba de comparación de medias del número de frutos de chile serrano con aplicación de nanopartículas metálicas.....	47
4.7.	Prueba de comparación de medias del rendimiento de fruto verde de chile serrano en función de la dosis y numero de aplicaciones de nanopartículas.....	48

RESUMEN

El chile serrano (*Capsicum annuum* L.) es un cultivo de gran importancia en México, con alta demanda y valor nutritivo, destaca por sus antioxidantes y beneficios para la salud. Sin embargo, existen retos en su producción sostenible, que hace necesario buscar alternativas que mejoren su nutrición y sean amigables con el ambiente, como lo es el uso de nanopartículas de elementos esenciales. Por lo que el objetivo del estudio fue determinar el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas metálicas sobre la producción y calidad de producción del chile serrano bajo condiciones protegidas. El trabajo se realizó en Apatzingán, Michoacán, se utilizó chile serrano híbrido Aquiles F1 en un sistema de agricultura protegida con malla sombra y riego por goteo. Los tratamientos consistieron en la aplicación conjunta de nanopartículas de ZnO, CuO y FeO a las dosis de 10 y 20 mg L⁻¹ en dos, cuatro y seis aplicaciones distribuidas en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. Se encontró que los tratamientos de 10 y 20 mg L⁻¹ de nanopartículas suministrados cuatro veces incrementaron del 6 al 21 % la altura de la planta y 22 % el diámetro del tallo. Así mismo, estos tratamientos aumentaron la producción de frutos en 48 y 41 %, respectivamente, relacionado con el aumento en el número de frutos, mientras que dosis altas (20 mg L⁻¹) en seis aplicaciones redujeron el rendimiento en 29 %. En calidad de frutos, con 10 mg kg⁻¹ en dos aplicaciones se logró la mayor longitud (101.45 mm) y peso promedio (10.53 g). Por lo que la aplicación conjunta de ZN+Cu+Fe como nanopartículas a 10 mg L⁻¹ en cuatro aplicaciones es la mejor alternativa para mejorar la producción y calidad de chile serrano.

Palabras clave: dosis de nanopartículas, número de aplicaciones, rendimiento de fruto, aplicación foliar.

ABSTRACT

Serrano pepper (*Capsicum annuum* L.) is a crop of great importance in Mexico, with high demand and nutritional value, highlighted by its antioxidants and health benefits. However, there are challenges in its sustainable production, which makes it necessary to look for alternatives that improve its nutrition and are friendly to the environment, such as the use of nanoparticles of essential elements. Therefore, the objective of the study was to determine the effect of foliar application of metallic nanoparticles on the production and quality of serrano pepper production under protected conditions. The work was carried out in Apatzingán, Michoacán, using Aquiles F1 hybrid serrano pepper in a protected agriculture system with shade mesh and drip irrigation. The treatments consisted of the joint application of ZnO, CuO and FeO nanoparticles at doses of 10 and 20 mg L⁻¹ in two, four and six applications distributed in a randomized block experimental design with four replications. It was found that treatments with 10 and 20 mg L⁻¹ of nanoparticles applied four times increased plant height by 6 to 21% and stem diameter by 22%. Likewise, these treatments increased fruit production by 48 and 41%, respectively, related to the increase in the number of fruits, while high doses (20 mg L⁻¹) in six applications reduced yield by 29%. Regarding fruit quality, 10 mg kg⁻¹ in two applications achieved the greatest length (101.45 mm) and average weight (10.53 g). Therefore, the joint application of ZN+Cu+Fe as nanoparticles at 10 mg L⁻¹ in four applications is the best alternative to improve the production and quality of serrano chili.

Key words: nanoparticle dose, number of applications, fruit yield, foliar application.

INTRODUCCIÓN

La familia de las solanáceas es un amplio grupo de plantas, con más de 3,000 especies que están adaptadas a varios tipos de condiciones geográficas de todos los continentes, a excepción de la Antártida y el ártico (FAO, 2023). Dentro de las solanáceas más importantes destaca el chile (*Capsicum annuum L.*), que produce frutos que han sido usado por los americanos como componente de la dieta desde hace 7,500 años, son consumidos en fresco, como especia o combinado con otros vegetales en ensaladas o salsas (Perry y Flanery, 2007; Kantar *et al.*, 2016).

El chile serrano produce frutos que son altamente nutritivos, al ser fuente importante de carbohidratos, fibra, ácidos grasos, proteínas y minerales, así como antioxidantes como el ácido ascórbico, betacarotenos, capsaicina que mejoran la salud de las personas al tener efecto antioxidant, actividad anticancerígena, actividad antiinflamatoria, entre otros (Khan *et al.*, 2014).

En México, en el año 2021 el chile serrano se produjo en 23 entidades federativas, que aportaron 302.7 mil t, entre los cuales destacan Sinaloa, San Luis Potosí y Sonora como los principales productores. En Michoacán se cosecharon 7847 t de fruto, con un rendimiento promedio de 16.9 t ha⁻¹ (SIAP, 2023). Este cultivo tiene potencial para aumentar su rendimiento en el estado de Michoacán y ser un cultivo alternativoen la región de tierra Caliente.

Así mismo, la agricultura además de buscar la manera de producir más, tiene que enfocarse al cuidado ambiental, por lo que se deben buscar alternativas de manejo amigables con el ambiente, con enfoque de sustentabilidad y sostenibilidad que garantice a las próximas generacionesla producción de alimentos suficientes (Xiong *et al.*, 2017). En la actualidad se está estudiando el uso de la nanotecnología aplicada a la agricultura, principalmente como plaguicidas, aunque también la aplicación de nanopartículas de elementos esenciales podría contribuir a lamejora en la nutrición de la planta al ser más eficientes y no contaminante (Xiong *et al.*, 2017).

Existen estudios que han demostrado que con el suministro de nanopartículas se puede lograr incrementar el rendimiento de los cultivos, debido a que estos

nutrientes aplicados en tamaño de nanopartículas favorecen el aumento en el contenido de clorofilas, así como el crecimiento vegetal, el tamaño del dosel vegetal, se incrementa el crecimiento de la raíz y de los brotes. Los nutrientes como nanopartículas que más se han estudiado son: Cu, Fe y Zn en solanáceas (Delfani *et al.*, 2014; Adhikari *et al.*, 2016). De forma general se ha estudiado la aplicación individual de nanopartículas en dosis que van de 5 hasta 1000 mg kg⁻¹, con variación en la respuesta de las plantas en función del tipo de nanopartícula y la dosis (Ahmed *et al.* 2021). Por lo tanto, el suministro combinado de Zn, Cu y Fe en forma de nanopartícula podría potenciar sus efectos en el cultivo de chile serrano. Actualmente, existen estudios pocos estudios sobre la aplicación de nanopartículas metálicas en el cultivo, lo que resalta la importancia de esta investigación. Además, el uso de nanopartículas podría favorecer la producción de chile serrano en sistemas de cultivo en ambientes protegidos, ofreciendo una alternativa viable para su establecimiento en la región de Tierra Caliente, donde la demanda de este producto es alta.

Objetivo general

Determinar el efecto de la aplicación foliar de forma conjunta de nanopartículas metálicas de Zn+Cu+Fe sobre la producción y calidad de fruto del cultivo de chile serrano bajo casa malla sombra en Apatzingán.

Objetivos específicos

Determinar el efecto del clima en las etapas fenológicas del chile serrano con aplicaciones de nanopartículas metálicas de Zn+Cu+Fe.

Conocer el efecto de la aplicación de nanopartículas metálicas sobre las variables morfológicas y de rendimiento en el chile serrano

Hipótesis

La aplicación foliar de nanopartículas metálicas incrementa el rendimiento y los componentes de la producción del cultivo de chile serrano bajo condiciones de malla sombra en Apatzingán.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia del cultivo

La familia botánica de los chiles, *Capsicum*, abarca un amplio espectro de especies que se distinguen por sus diferentes tamaños, formas, colores y, especialmente, por su grado de picante, como lo indican Pérez-Castañeda *et al.* (2015).

Históricamente, el chile fue utilizado principalmente con fines medicinales antes de convertirse en un elemento esencial de la gastronomía. Civilizaciones como los mayas lo empleaban para tratar enfermedades respiratorias, mientras que otras culturas lo utilizaban para aliviar una amplia variedad de dolencias, desde resacas hasta mordeduras de serpiente. Estas propiedades se atribuyen principalmente a la capsaicina, un compuesto con potentes efectos analgésicos y antiinflamatorios. Actualmente la capsaicina es utilizada en tratamientos para aliviar problemas de artritis y el dolor postoperatorio (Azlan *et al.*, 2022).

El chile destaca como uno de los cultivos más importantes a nivel global, gracias a su presencia en diversas gastronomías como la mexicana y a su composición nutricional, rica en vitaminas, antioxidantes y otros compuestos con propiedades benéficas para la salud, como se ha demostrado en varias investigaciones (Baenas *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2013). El fruto es rico en vitaminas como la A, C y B6, principalmente, contiene antioxidantes, así como β-caroteno, flavonoides, anticancerígenos, antimicrobianos, pigmentos, saborizantes, aceites fijos y volátiles, oleoresinas y alcaloides con potencial insecticida (Baenas *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2013).

La madurez y el nivel de picor del chile influyen directamente en la cantidad de compuestos bioactivos que contiene. Entre estos compuestos, la vitamina C destaca por su capacidad para combatir los radicales libres, moléculas altamente reactivas que contribuyen a reducir el envejecimiento celular ya evitar el desarrollo de diversas enfermedades (Azlan *et al.*, 2022).

La presencia de capsaicina en los frutos del chile serrano lo convierte en un alimento

funcional con un amplio rango de beneficios terapéuticos. Además de aliviar el dolor crónico, la capsaicina ha demostrado su potencial para combatir diversas enfermedades, como el cáncer y para regular los niveles de glucosa en sangre. Sus propiedades antiinflamatorias y antioxidantes también contribuyen a la prevención de enfermedades cardiovasculares y a la lucha contra la obesidad (Szallasi, 2023).

Estudios científicos han demostrado que el consumo de la capsaicina tiene impacto positivo en el metabolismo de las grasas. Al reducir la cantidad de triglicéridos en las células grasas y al disminuir la acumulación de lípidos en tejidos como el mesenterio y el epidídimo, por lo que este compuesto contribuye a la pérdida de peso. Además, su inclusión en la dieta se ha relacionado con una mejora en los perfiles lipídicos y en el control de los niveles de glucosa en sangre (Lee *et al.*, 2013).

El cultivo del chile representa una actividad económica de gran precedente a escala mundial (López, 2016). Países como China, México e Indonesia lideran la producción, mientras que México, España y Países Bajos destacan en las exportaciones de esta hortaliza. Por su parte, Estados Unidos se posiciona como el principal importador a nivel mundial (FAOSTAT, 2023).

Estadísticas de producción mundial

En el año 2023 se produjeron a nivel mundial 55,444,831 t de chile serrano, China Continental se colocó como el principal productor, con un volumen de producción de 17,134,480 t, lo que representó el 30.9 % de la producción mundial, seguido por México con 3,237,000 t (5.86%) e Indonesia con 3,061,260 t (5.5%), por lo que estas tres naciones representaron el 43 % de la producción mundial. La superficie total destinada para este cultivo fue de 2,830,622 ha, De las cuales China Continental (765,209 ha), Indonesia (338,636 ha) y México (173,134 ha) fueron los países con mayor superficie cosechada, con el 27 %, 12 % y 6.1 %, respectivamente a nivel mundial (FAOSTAT, 2023; SIAP, 2023).

Mientras tanto, Países Bajos, Bélgica y Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte fueron los países con el mayor rendimiento promedio, con 281.0, 253.0 y 235.0 t ha⁻¹, respectivamente, por lo que superaron el rendimiento promedio mundial que fue de 17.5 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2023).

Producción nacional

México cuenta con una amplia variedad de chiles, fundamentales para su cultura, gastronomía y economía (Bobadilla-Larios *et al.*, 2017). Estos se cultivan en altitudes desde nivel del mar a los 2500 m, desde Sonora hasta Yucatán, y presentan una gran diversidad en cuanto a apariencia y sabor, adaptándose a diferentes altitudes (Ramírez *et al.*, 2018).

En México, el chile y el tomate son los cultivos más valiosos dentro del sector hortícola. El chile, en particular, representa más del 20% de la producción total de hortalizas a nivel nacional y ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, con un aumento promedio anual de 6.7%. Estados Unidos es el principal comprador de nuestro chile fresco, importando 1,160,581 t en 2023 (SIAP, 2023).

Al cierre del año 2023 en México se registró la producción de 3,237,000 t de fruto de chile, con exportación a 47 países. Esta producción fue superior a la registrada en el 2021 con 3,086,000 t SIAP (2023).

Los estados de Sinaloa, Chihuahua, Jalisco, Sonora y Zacatecas, en conjunto aportan el 67 % del volumen nacional. Sinaloa, Chihuahua y Zacatecas reportaron una cosecha de 751,839 t, 701,392 t y 480,694 t, respectivamente, que de manera conjunta representa el 59.7 % del volumen nacional al mes de diciembre de 2023, mientras que San Luis Potosí con 324,870 t, Sonora con 187,591 t, Guanajuato con 145,362 t, Jalisco con 140,253 t, y Baja California Sur con 83,121 t, también sobresalen entre las 32 entidades dedicadas al cultivo de chile verde (Figura 2.1).

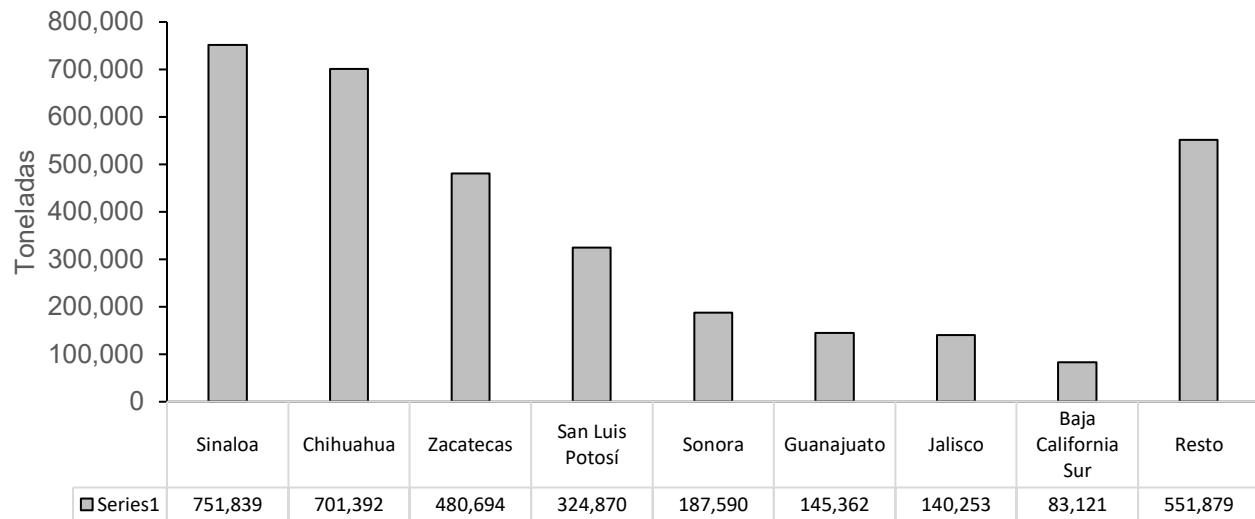


Figura 2.1. Principales estados productores de chiles serranos en México del año 2023.

Así mismo, el consumo per cápita es de 15.7 kg, en México, mientras que su participación es del 19.4 % en la producción nacional de hortalizas (SIAP, 2023).

Producción de chile en Michoacán

En el estado de Michoacán de acuerdo con el SIAP (2023) la producción total de chile serrano fue 20,903.49 t, distribuidos en los municipios de Aguililla con 7,964.50 t, seguido por San Lucas con 4,000.00 t, Coalcomán de Vázquez Pallares con 2,627.00 t, Parácuaro con 1,490.32 t, y Múgica con 1,162.24 t (Figura 2.2). Con rendimiento de 21.02 t ha^{-1} y una superficie sembrada de 994.30 ha^{-1} con un valor de aproximado de \$230 millones de pesos (MXN)

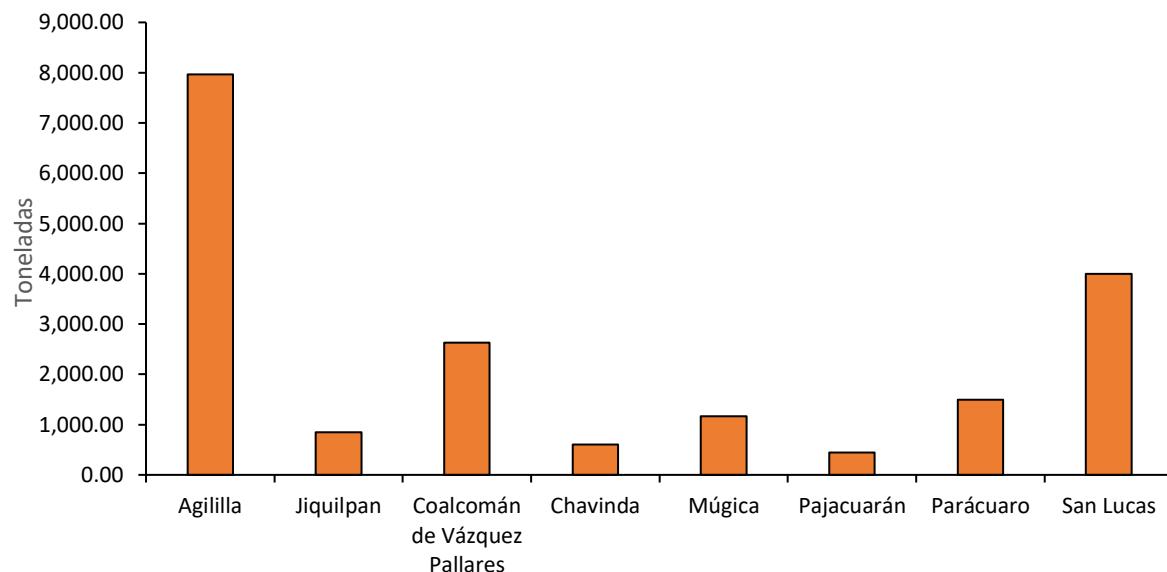


Figura 2.2. Principales municipios productores de chile serrano en Michoacán.

Taxonomía del cultivo

A continuación, se presenta la clasificación taxonómica del chile serrano que de acuerdo con Bosland, (1994) es la siguiente (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Taxonomía del chile serrano.

TAXONOMIA	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Genero	Capsicum
Especie	<i>Capsicum annuum</i> L. 1753

Descripción botánica

El chile serrano pertenece a la familia de las Solanaceae, las plantas se caracterizan

por un color verde intenso y brillante, debido a la escasez de vellos en sus hojas y tallos. Sus tallos son flexibles y resistentes, les permiten soportar las inclemencias del viento sin romperse, sus flores son pequeñas, blancas, solitarias, y hemafroditas, con cinco pétalos y se encuentran en las axilas de las ramas. Alcanzan una altura promedio de 80 a 90 cm. Los frutos, de forma alargada y lisa, carecen de punta y presentan un llamativo color verde brillante. Su tamaño es considerable, con una longitud de 6 a 8 cm y un diámetro que oscila entre 1.4 y 1.6 cm (Ramírez-Novoa, 2018) (Figura 2.3).



Figura 2.3. Frutos de chile serrano en madurez de cosecha.

Propiedades nutricionales

Los chiles serranos son una excelente fuente de nutrientes. Su composición nutricional incluye carbohidratos (6.65 g por cada 100 g), proteínas (0.9 g por cada 100 g), fibra (1.2 g por cada 100 g), y una variedad de vitaminas y minerales, como

la vitamina A, el ácido ascórbico y el potasio (Khan *et al.*, 2014).

Cuadro 2.2. Contenido nutrimental por cada 100 g de frutos fresco.

Nutriente	Contenido
Carbohidratos	6.65 g*
Fibra alimentaria	1.2 g
Grasa	0.13 g
Proteínas	0.9 g
Tiamina B1	0.055 mg (4%)
Riboflavina B2	0.142 mg (9%)
Vitamina B3	0.02 mg (7%)
Vitamina B6	0.303 mg (23%)
Ácido fólico B9	47 µg (12%)
Vitamina C	142 mg (237%)
Calcio	6 mg (15)
Hierro	0.35 mg (3%)
Magnesio	11 mg (3%)
Manganoso	0.133 mg (7%)
Fósforo	27 mg (4%)
Potasio	213 mg (5%)
Zinc	0.2 mg (2%)

*Valor nutricional por cada 100 g

% de la cantidad diaria recomendada para adultos

De acuerdo con Khan *et al.* (2014) algunas de características más sobresalientes del fruto se presentan a continuación:

- Fuente de vitamina C: El chile serrano es un verdadero concentrado de vitamina C, superando incluso a la naranja en contenido de esta vitamina esencial para el sistema inmunológico.
- Rico en betacaroteno: Su color intenso se relaciona con una alta concentración de betacaroteno, un poderoso antioxidante que protege el corazón fortalece las defensas y cuida la piel y la vista.
- Complemento vitamínico: Además de la vitamina C y el betacaroteno, el chile serrano aporta vitaminas del complejo B y E, además de minerales como

hierro y potasio, fundamentales para diversas funciones corporales.

- Quemador de grasas: La capsaicina, el compuesto que le da el sabor picante al chile, estimula el metabolismo y ayuda a quemar grasas durante la digestión.
- Acelera el metabolismo: El consumo regular de chile serrano puede aumentar el metabolismo hasta en un 25%, lo que contribuye a la pérdida de peso.
- Saciante y depurativo: Además de acelerar el metabolismo, el chile serrano reduce el apetito y ayuda a limpiar el estómago.
- Propiedades antiinflamatorias y anticoagulantes: El chile serrano posee propiedades antiinflamatorias que ayudan a reducir la inflamación en el cuerpo y actúa como anticoagulante natural.

Requerimientos edáficos y climático para el cultivo

El cultivo del chile se adapta a una amplia gama de suelos, pero se desarrolla de manera óptima en suelos profundos (30-60 cm) con textura franco-arenosa, franco-limosa o franco-arcillosa. Estos suelos deben ser ricos en materia orgánica y tener buen drenaje. En agricultura protegida, un pH superior a 5.5 favorece su crecimiento. El chile es un cultivo adaptable a diferentes altitudes (0-2300 msnm), aunque la variedad o híbrido influye en su desarrollo. Los chiles serranos, en particular, requieren climas cálidos y son sensibles a las bajas temperaturas (MEFCCA, 2024).

Temperatura y humedad relativa

La temperatura es un factor crucial para el cultivo del chile. Temperaturas demasiado altas o bajas pueden afectar la floración y fructificación de la planta. El rango óptimo de temperatura para el desarrollo del chile se encuentra entre 15 y 30 °C, mientras que la humedad relativa apropiada se sitúa entre el 70 al 90% (MEFCCA, 2024).

Precipitación y luz

El cultivo del chile requiere una cantidad de agua que oscila entre 600 y 1200 milímetros a lo largo de todo su ciclo de vida. Es esencial que esta precipitación se distribuya de manera uniforme para evitar problemas. Excesos de lluvia pueden provocar la caída de flores, deformidades en los frutos, pudrición y un incremento en enfermedades fúngicas. Necesita una exposición prolongada a la luz solar (12 horas) para producir frutos de calidad (MEFCCA, 2024).

Producción bajo condiciones protegidas

En México, el uso de invernaderos ha permitido incrementar hasta siete veces la productividad del cultivo de chile serrano en comparación con los métodos de producción a cielo abierto. Un invernadero es una estructura cerrada y fija, diseñada para el cultivo y protección de plantas, con acceso peatonal. Estas instalaciones están cubiertas con materiales translúcidos, como plástico o vidrio, que optimizan la captación de la radiación solar y permiten mantener condiciones controladas de temperatura, humedad y otros factores ambientales, favoreciendo el crecimiento de los cultivos. Su diseño facilita el trabajo del personal en su interior.

Ante la reducción en la disponibilidad de agua, los invernaderos se presentan como una alternativa para la producción intensiva de alimentos, que garantizan la cosecha de hortalizas de alta calidad durante todo el año. Entre sus principales ventajas destaca la posibilidad de generar un ambiente controlado que protege a las plantas de patógenos del suelo, además de brindar resguardo contra malezas, plagas, animales, viento y condiciones climáticas adversas. También permiten regular la luz, la temperatura y aplicar estrategias de control químico y biológico para crear un microclima óptimo. Gracias a estas características, los invernaderos contribuyen a reducir los tiempos de cultivo, mejorar los rendimientos y aumentar los ingresos en comparación con el sistema tradicional a cielo abierto, además de posibilitar la producción fuera de temporada (Valadez, 2001).

A lo largo del tiempo, la extensión de tierras destinadas a la agricultura protegida ha crecido considerablemente, lo que ha facilitado la producción de alimentos de alta calidad, adecuados para la exportación. Los invernaderos contribuyen a la disponibilidad de productos frescos y accesibles en cualquier estación del año, beneficiando a los consumidores en naciones desarrolladas (Valadez, 2001).

Elementos como la altura, el grosor del tallo, la cantidad de hojas, la superficie foliar, el tamaño de las raíces y el nivel de nutrientes son factores fundamentales que influyen en la calidad de las plántulas (Vidigal *et al.*, 2011; Araméndiz *et al.*, 2013).

Para asegurar una adaptación óptima al trasplante, las plantas deben contar con una alta capacidad de absorción de agua y nutrientes, un desarrollo adecuado y estar exentas de plagas y enfermedades (Salusso *et al.*, 2015). De acuerdo con Sarduy *et al.* (2016), la calidad en la producción de chile serrano está estrechamente relacionada con el manejo inicial en el almácigo dentro de los invernaderos, donde se desarrollan las plántulas.

Uso de nanotecnología en la agricultura

Nanopartículas como nutrientes en la agricultura

El uso excesivo de fertilizantes en la agricultura moderna ha provocado contaminación en el suelo, el agua y las plantas, generando impactos negativos en los ecosistemas, en los seres humanos y en los animales. Para abordar estos problemas, la agronanotecnología ha surgido como un campo innovador que busca desarrollar métodos más sostenibles y ecológicos, con el objetivo de optimizar la eficiencia de las prácticas agrícolas actuales (Ditta *et al.*, 2015), incluyendo estrategias para el manejo de enfermedades en los cultivos (Patel *et al.*, 2014).

Investigaciones recientes sugieren que diversas nanopartículas pueden estimular el crecimiento de las plantas y tienen el potencial de emplearse como nanofertilizantes

para mejorar la productividad agrícola. Esta tecnología busca, además, disminuir el uso de agroquímicos sintéticos y reducir la generación de residuos contaminantes, favoreciendo así el desarrollo y rendimiento de los cultivos (Liu y Lal, 2015).

La nanotecnología se basa en enfoques innovadores para diseñar, analizar y aplicar materiales de tamaño extremadamente pequeño, con dimensiones inferiores a 100 nm, que trabajan a nivel atómico y molecular (Duran y Marcato, 2013). Entre estos materiales se encuentran nanopartículas metálicas de zinc, hierro, cobre y plata, las cuales presentan un gran potencial en la agricultura, ya que pueden utilizarse como nanofertilizantes (Liu y Lal, 2015; Naderi y Danesh-Sharharaki, 2013), así como en la formulación de nanoherbicidas, nanopesticidas y nanosensores (Dubey y Mailapalli, 2016).

Vías de absorción y traslocación de las nanopartículas en las plantas

Las investigaciones han identificado diversas rutas por las cuales las nanopartículas son absorbidas y transportadas dentro de las plantas. Los estudios científicos indican que el sistema vascular funciona como un canal eficiente para su desplazamiento. Además, se ha demostrado que estas partículas pueden penetrar a través de diminutas aberturas en las hojas, activando procesos metabólicos celulares. Este mecanismo favorece un crecimiento más robusto de las plantas y un incremento en la productividad de los cultivos en comparación con los fertilizantes tradicionales. Los efectos de las nanopartículas se han encontrado en múltiples funciones fisiológicas, como son: el desarrollo de las raíces, las flores y los frutos, así como en la síntesis de clorofila y enzimas antioxidantes (Siskani *et al.*, 2015).

Las nanopartículas pueden administrarse tanto por vía foliar como radicular. En las raíces, son absorbidas y movilizadas a través de las paredes celulares (apoplasto) y los citoplasmas (simplasto) y posteriormente desplazarse por el xilema en dirección ascendente. En el caso de la aplicación foliar, las hojas las absorben y luego son

transportadas hacia las raíces a través del floema, siguiendo un movimiento descendente (Wang *et al.*, 2023).

Nanopartículas del Zn

Aunque el zinc no se mueve fácilmente dentro de las plantas, es indispensable para la vida de éstas. Participa en la síntesis y el funcionamiento de muchas enzimas, ya que unas 2800 proteínas lo necesitan para formarse y actuar. También es esencial para que las plantas produzcan azúcares durante la fotosíntesis y para transformar esos azúcares en almidones.

Además, el zinc influye en las hormonas de las plantas, controlando los niveles de auxinas mediante la creación del aminoácido triptófano. En la maduración y producción de semillas, el zinc ayuda a formar polen y a que éste sea fértil. La falta de zinc afecta más a la producción de granos que al crecimiento general de la planta. Asimismo, el zinc ayuda a mantener fuertes las paredes de las células y a que la planta resista mejor a las enfermedades, sobre todo provenientes del suelo (Castillo-González *et al.*, 2018).

El zinc es uno de los nutrientes del que más carecen las plantas a nivel mundial. Esta escasez puede reducir la producción de los cultivos hasta en un 20 %, incluso cuando las plantas no muestran señales visibles de deficiencias, lo que se conoce como “hambre oculta”. Los micronutrientes, como el hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, cloro y molibdeno, son vitales para que las plantas crezcan sanas. Si alguno de estos nutrientes falta, aunque sea un poco, la planta no podrá completar su vida, y ningún otro elemento puede ocupar su lugar (Chakraborty *et al.*, 2021).

Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) han experimentado un incremento significativo en su aplicación industrial, abarcando sectores como la cosmética, textil, medicina, electrónica y alimentaria. Se ha establecido que estas nanopartículas exhiben propiedades antifúngicas, demostrando eficacia en la reducción de la incidencia de patógenos fúngicos, incluyendo *Penicillium expansum*, *Botrytis cinerea*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus*, *Fusarium culmorum* y *F.*

oxysporum (Rajiv *et al.*, 2013; He *et al.*, 2011). El mecanismo de acción antifúngica se asocia, parcialmente, a la inducción de anomalías morfológicas en las hifas fúngicas, resultando en la inhibición del crecimiento y la consecuente muerte celular del hongo (Servin *et al.*, 2015).

Adicionalmente, se ha evidenciado que las nanopartículas de ZnO ejercen efectos promotores sobre el crecimiento vegetal (Liu y Lal, 2015) y mejoran los atributos organolépticos de los frutos, específicamente el contenido de azúcares solubles (Zhao *et al.*, 2014). No obstante, es importante señalar que ciertos estudios han reportado efectos fitotóxicos asociados a la aplicación de estas nanopartículas, manifestándose en diversas especies de plantas cultivadas (Dimkpa *et al.*, 2015; Bandyopadhyay *et al.*, 2014).

La eficacia de las nanopartículas en la agricultura se atribuye, en gran medida, a su elevada tasa de penetración en los tejidos vegetales. Estudios han documentado efectos positivos y significativos de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc en el crecimiento de diversas especies de plantas, como el maíz (*Zea mays*), cebolla (*Allium cepa*), pimiento (*Capsicum annuum*) y trigo (*Triticum aestivum*) (Esper-Neto *et al.*, 2020). Los nanofertilizantes, una tecnología agrícola contemporánea, se emplean como fertilizantes foliares, cuya aplicación mediante pulverización promueve el desarrollo vegetal y el rendimiento productivo. Estos insumos representan una estrategia eficiente y económicamente viable, que minimiza el impacto ambiental y los riesgos para la salud humana. La nanotecnología ha demostrado su potencial para incrementar la producción agrícola y fomentar la sostenibilidad de los sistemas de cultivo (Esper-Neto *et al.*, 2020).

La aplicación de nanopartículas de zinc a una concentración de 1.5 ppm ha demostrado incrementar la biomasa seca en plantas. Así mismo, la fertilización foliar con zinc en diversas dosis en *C. annuum* ha inducido un incremento significativo en la altura de la planta, el número de hojas, la floración, la fructificación y el peso de los frutos, con aumentos que oscilan entre el 29 % y el 32 %. Además, la aplicación de

nanopartículas de óxido de zinc como fertilizante mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Nandhini *et al.*, 2019).

Al respecto, se encontró que en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L) cv. Crusier la aplicación foliar de nanopartículas de ZnO a las dosis de 50, 100, 150, 200, y 250 mg L⁻¹ se mejora la producción, pero el mejor resultado se logró con el tratamiento de 200 mg L⁻¹ de nanopartículas de ZnO con un incremento de 53 t ha⁻¹ con relación al testigo (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021).

La aplicación de nanopartículas de ZnO inorgánico representa una estrategia innovadora con potencial para la modernización de la agricultura y la industria alimentaria. Estas nanopartículas ejercen una modulación fisiológica en las plantas, mediante la optimización de los procesos metabólicos que mitigan el impacto del estrés abiótico y biótico en las plantas. Las nanopartículas de ZnO presentan una elevada área superficial específica, lo que facilita su absorción y utilización como fuente de zinc, un micronutriente esencial. La aplicación de nanofertilizantes a base de ZnO se plantea como una alternativa para incrementar la productividad de los cultivos. Sin embargo, es importante considerar el potencial de fitotoxicidad asociado a concentraciones elevadas, dada la solubilidad del óxido de zinc y la consiguiente liberación de iones Zn²⁺. A nivel celular, se ha documentado que las nanopartículas de ZnO inducen un incremento en el número de cloroplastos, lo que representa una mejora en la eficiencia fotosintética. El uso de nanopartículas de óxido de zinc inorgánico en la agricultura también tiene potencial en modernizar la agricultura y los alimentos en la industria. Sin embargo, puede ser peligroso en grandes cantidades (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021; Magdaleno-García *et al.*, 2023). No obstante, es necesario realizar investigaciones exhaustivas para dilucidar los mecanismos de acción y los efectos a largo plazo de estas nanopartículas en los ecosistemas agrícolas (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021; Magdaleno-García *et al.*, 2023).

Nanopartículas de CuO

El cobre (Cu) es un micronutriente esencial para la nutrición de las plantas, participa en diversos procesos fisiológicos y es fundamental para su crecimiento. Su capacidad para activar las enzimas del ciclo de Calvin hace que mejore la actividad fotosintética, lo que aumenta el rendimiento de las plantas (Pradhan *et al.*, 2015). Las nanopartículas de cobre, al actuar como agentes reductores u oxidantes en las reacciones bioquímicas celulares, catalizan la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que genera estrés oxidativo. No obstante, los efectos de estas nanopartículas dependen de su concentración: en dosis bajas favorecen el crecimiento y la germinación, mientras que en concentraciones altas pueden inhibir el desarrollo (Kasana *et al.*, 2017). Además, cuando se aplican de forma foliar, las nanopartículas de Cu pueden mejorar la firmeza del fruto y aumentar los niveles de antioxidantes como la vitamina C, el licopeno y los fenoles (López-Vargas *et al.*, 2018; Pérez-Labrada *et al.*, 2019).

El cobre es un micronutriente esencial que requieren las plantas en concentraciones extremadamente bajas para completar su ciclo de vida (Taiz y Zeiger, 2010). Este elemento desempeña un papel determinante en la catálisis de reacciones de oxidación-reducción y actúa como un grupo prostético en diversas enzimas involucradas en procesos fundamentales para el desarrollo de las plantas, como el transporte de electrones durante la fotosíntesis y la respiración celular. Además, el cobre es necesario para la actividad de enzimas que participan en la lignificación de la pared celular y en la neutralización de especies reactivas de oxígeno (ERO). Entre estas enzimas se incluyen plastocianinas, citocromos, tirosinatas, D-galactosa oxidasa, polifenol oxidasa, ascorbato oxidasa y superóxido dismutasa (Maksymiec, 1997).

Las plantas llevan a cabo sus funciones de manera adecuada cuando las concentraciones de cobre en el tejido seco oscilan entre 5 y 30 mg kg⁻¹. Niveles superiores de cobre son considerados tóxicos, ya que afectan negativamente el crecimiento y la fotosíntesis. Debido a su capacidad redox, el cobre actúa como

catalizador en la formación de especies reactivas de oxígeno (ERO), lo que provoca la oxidación de componentes celulares. Los radicales hidróxidos (OH^-) generados pueden inducir la peroxidación de lípidos, alterando la estructura de las membranas celulares. Como respuesta al daño oxidativo inducido por el cobre, las plantas incrementan la expresión génica y la actividad de enzimas antioxidantes. Además, algunos estudios sugieren que los metabolitos secundarios antioxidantes también desempeñan un papel en la defensa contra el estrés oxidativo (Yruela, 2005).

Efectos tóxicos del cobre en las plantas

El cobre, a concentraciones ligeramente superiores a las requeridas por las plantas (30 mg kg^{-1} de tejido en peso seco), provoca efectos tóxicos, tales como la inhibición del crecimiento en raíces y brotes (Zhao *et al.*, 2010). En las raíces, esta inhibición del crecimiento puede ser resultado de una disminución en la división celular y daño estructural en las células del meristemo apical (Lui *et al.*, 2009). Además, la reducción del tamaño celular inducida por el cobre provoca la contracción en el diámetro de las raíces y tallos, y una disminución en el crecimiento de las hojas, lo que sugiere que el cobre también afecta la expansión celular (Kasim, 2006). El proceso de expansión celular puede ser restringido por el aumento en la lignificación y rigidez de la pared celular. El cobre estimula la actividad de la peroxidasa y del ácido indolacético oxidasa en las raíces, lo que indica que la inhibición del crecimiento se debe al aumento de la lignificación en la pared celular y al catabolismo de auxinas (Chaoui *et al.*, 2004).

La inhibición del crecimiento de la raíz principal se acompaña generalmente de una reducción en la zona de elongación y de un aumento en la formación de raíces laterales o pelos radicales, desarrollándose más allá del meristemo apical. Este reordenamiento en la arquitectura radicular involucra cambios en la distribución de auxinas y citocininas, así como en el metabolismo de las especies reactivas de oxígeno (ERO) (Lequeux *et al.*, 2010).

La exposición al cobre también reduce la productividad de granos, posiblemente debido al cierre de los estomas, lo que afecta el intercambio de gases y el transporte de electrones en la fotosíntesis (Kasim, 2006). En este sentido, el cobre bloquea el transporte de electrones en diferentes sitios del fotosistema II, específicamente en el centro de reacción de la quinona (QB) y en la tirosina de la proteína D1. En el fotosistema I, el cobre interactúa con la ferredoxina, inhibiendo la fotorreducción del NADP+. Esta alteración en la función de los fotosistemas está relacionada con cambios en la composición lipídica, lo que disminuye la fluidez de la membrana tilacoide (Quartacci *et al.*, 2000).

La reducción en los niveles de cobre, clorofila y carotenoides también afecta la eficiencia fotosintética. El cobre inhibe la actividad enzimática *in vitro* del ácido δ-aminolevulínico deshidratasa, enzima clave en la síntesis de los anillos de porfirinas de las clorofilas. Además, el cobre interfiere con el transporte de hierro hacia las hojas, lo que puede reducir la síntesis de clorofila. Esta disminución de pigmentos fotosintéticos genera un aspecto clorótico característico en las hojas de las plantas expuestas a niveles elevados de cobre. La actividad de la ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa oxigenasa y la fosfoenolpiruvato carboxilasa, enzimas involucradas en la fijación de carbono, también se ve reducida en presencia de cobre (Tewari *et al.*, 2006).

El cobre también inhibe la fotosíntesis a nivel genético, disminuyendo la expresión de genes que codifican para la subunidad grande de la ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa oxigenasa, proteínas de unión a clorofila a-b, citocromos y proteínas del centro de reacción de los fotosistemas I y II (Sudo *et al.*, 2008). El cobre promueve la generación de ERO, tales como el anión superóxido (O_2^-), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radicales hidroxilos (OH^-), a través de varios mecanismos. Uno de estos mecanismos que ocurre durante el acarreo de electrones en la fotosíntesis, donde los electrones de la plastoquinona son aceptados por el cobre y transferidos al oxígeno, generando O_2^- . Otros mecanismos incluyen la inducción de la actividad de las enzimas NADPH oxidasa y superóxido dismutasa (SOD), la reacción de Fenton y la reducción de la actividad de las enzimas antioxidantes (Zhang *et al.*, 2010). La oxidación de lípidos y proteínas sirve como indicador de daño oxidativo debido al exceso de cobre (Cuypers

et al., 2000; Tewari *et al.*, 2006). La peroxidación de lípidos y la liberación extracelular de potasio son indicadores del daño en la membrana plasmática por exposición al cobre. La pérdida de integridad de la membrana celular también está asociada con la acumulación de ERO y la peroxidación de lípidos (Wang *et al.*, 2011).

Las lipoxigenasas (LOX), enzimas catalizadoras de la peroxidación de lípidos, exhiben un incremento en su actividad en respuesta al aumento de la concentración de cobre (Cu) y a la elevación de los niveles de especies reactivas de oxígeno (ERO). La acumulación de Cu induce la muerte celular en los tejidos radiculares (Lequeux *et al.*, 2010). La necrosis, un tipo de muerte celular no programada, se desencadena por concentraciones elevadas de ERO. Sin embargo, las ERO también pueden activar vías de muerte celular programada (MCP), un mecanismo de suicidio celular controlado, en respuesta a diversas condiciones de estrés (Pellinen *et al.*, 2002).

El pretratamiento de las raíces mediante la aplicación de un choque térmico moderado ha demostrado ser eficaz en la mitigación de la producción de ERO inducida por Cu, lo que a su vez reduce la incidencia de muerte celular (Chen *et al.*, 2008). Este hallazgo sugiere que el estrés térmico controlado puede activar mecanismos de defensa antioxidante, limitando así el daño oxidativo y la muerte celular en las raíces expuestas a Cu.

Nanopartículas de hierro

El hierro (Fe), es constituyente fundamental de la corteza terrestre, se posiciona como el cuarto elemento más abundante, precedido por silicio (Si), oxígeno (O) y aluminio (Al), representando el 5.1 % de la masa total de la corteza. En el edafosfera, su concentración se estima en un 3.8 %, encontrándose predominantemente en la estructura cristalina de diversos minerales. La génesis del Fe disponible en el suelo se origina en la meteorización de minerales primarios, específicamente silicatos ferromagnesianos como olivino, augita, hornblenda y biotita, siendo estos últimos, junto con las biotitas, las principales fuentes de Fe en rocas ígneas. La alteración de

estos minerales libera Fe soluble a la solución del suelo, el cual puede ser asimilado por organismos, completar con ligandos orgánicos o precipitar como minerales secundarios. Entre estos, destacan sulfuros, carbonatos y minerales de arcilla, pero principalmente óxidos e hidróxidos de Fe, cuya especiación y grado de cristalinidad controlan la solubilidad del elemento en el suelo (Linsay, 1979).

Desde una perspectiva fisiológica, el Fe desempeña un rol crucial en el desarrollo vegetal, participando activamente en la biosíntesis de clorofila y en la estructura de la ferredoxina, un aceptor de electrones esencial en la fotosíntesis. La absorción de Fe por las plantas ocurre principalmente en su forma ferrosa (Fe^{2+}), y su concentración en tejidos vegetales oscila entre 20 y 250 mg kg⁻¹ de materia seca. Adicionalmente, el Fe interviene en procesos respiratorios y en la síntesis de proteínas (Ning *et al.*, 2023).

El hierro (Fe) desempeña un rol crítico en procesos fisiológicos esenciales de las plantas, incluyendo la síntesis de clorofila, la fotosíntesis y la respiración. La deficiencia de Fe induce desequilibrios metabólicos severos, pudiendo comprometer la viabilidad de los cultivos. La clorosis férrica, manifestada como la pérdida de color verde en las hojas, es un síntoma característico de la carencia de Fe. La limitación en la disponibilidad de Fe para la absorción radicular, más que la carencia total en el suelo, constituye frecuentemente el factor limitante. Por ende, la suplementación mediante aplicaciones foliares o fertirrigación se presenta como una estrategia necesaria (Ning *et al.*, 2023).

El Fe se distingue como uno de los micronutrientes que presentan mayores desafíos en la nutrición vegetal. En sistemas aireados con pH fisiológico, la concentración de iones Fe^{3+} y Fe^{2+} es inferior a 10^{-15} M, insuficiente para satisfacer los requerimientos vegetales. En consecuencia, los quelatos de Fe(III), y en menor medida de Fe(II), constituyen las formas predominantes de Fe soluble en suelos y soluciones nutritivas. La absorción de Fe^{2+} suele ser preferencial respecto a Fe^{3+} , aunque esta selectividad varía según la especie vegetal (estrategias I y II). Durante el transporte xilemático, predominan los complejos de Fe(III) (Juárez *et al.*, 2024).

La asimilación de Fe^{2+} requiere la actividad de una enzima reductasa, localizada en la membrana plasmática de la raíz, capaz de reducir aceptores externos de electrones de alto potencial, como ferricianuro (+360 mV) y posiblemente O_2 (+280 mV), así como quelatos férricos con potenciales menores (+100 a +250 mV). La actividad óptima de esta enzima se sitúa en un rango de pH de 4 a 5. Temperaturas extremas (superiores o inferiores a 25°C), pH superiores a 7.5 y la presencia de metales pesados inhiben su actividad (Lucena, 2000).

Las nanopartículas de Fe_3O_4 estimulan la biosíntesis de ácido salicílico, potenciando sus efectos como fitoestimulante (Rout y Sahoo, 2015). La aplicación de nanofertilizantes optimiza la eficiencia en el uso de nutrientes, minimizando la toxicidad edáfica al requerir dosis reducidas. Esto reduce los efectos adversos de la sobredosis, disminuye la frecuencia de aplicación de fertilizantes y reduce los costos de insumos. Un estudio de dos años demostró incrementos significativos en la producción de azafrán *Crocus sativus* con la aplicación de nanofertilizantes de Fe, P y K (Amirnia et al., 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización del sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, ubicada en Apatzingán, Michoacán (Figura 3.1). El área de estudio se encuentra geográficamente situada en las coordenadas 19° 06' 00 LN y 102° 22' 00 LO, a una altitud de 350 m sobre el nivel del mar. La región se caracteriza por presentar un clima cálido seco, con una precipitación anual de 750 mm, registra temperaturas que oscilan entre una máxima de 40 °C y una mínima de 20 °C (datos proporcionados por DB-ity, 2023).



Figura 3.1. Localización del experimento. Fuente: Google Earth.

Metodología

Efecto del clima sobre la fenología

Con respecto al primer objetivo se procedió de la siguiente manera. Se colaron termómetros para medir temperaturas máximas y mínimas dentro de la casa sombra y la temperatura ambiental se midió con la estación meteorológica que se encuentra ubicada en la Facultad de Ciencias agropecuarias.

Genotipo experimental

En lo que se refiere al segundo objetivo se utilizó el híbrido de chile serrano Aquiles F1 Hyb que es una variedad precoz, produce frutos con excelente pungencia y amarre en condiciones de calor. La longitud de los frutos va de los 10 a los 11.5 cm y poseen paredes gruesas que favorece la vida de anaquel. Presenta resistencia a bacterias, lo que permite al cultivo que no se defolie. La planta presenta muy buena cobertura foliar (Figura 3.2).



Figura 3.2. Semilla y fruto de chiles serranos Aquiles F-1 Hyb.

Producción de plántula

Las plántulas se produjeron en el vivero de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en Apatzingán. Se inició con la siembra del almacigo el 03 de septiembre de 2023 en charolas de plástico de 200 cavidades, que previamente fueron desinfectadas con inmersión en una solución con hipoclorito de sodio a la dosis de 5 mL L⁻¹ y posteriormente se lavaron con agua para eliminar el cloro. Despues se llenaron con peat moss previamente humedecido y se depositó una semilla de chile serrano en cada cavidad a una profundidad de 0.5 cm (Figura 3.3).

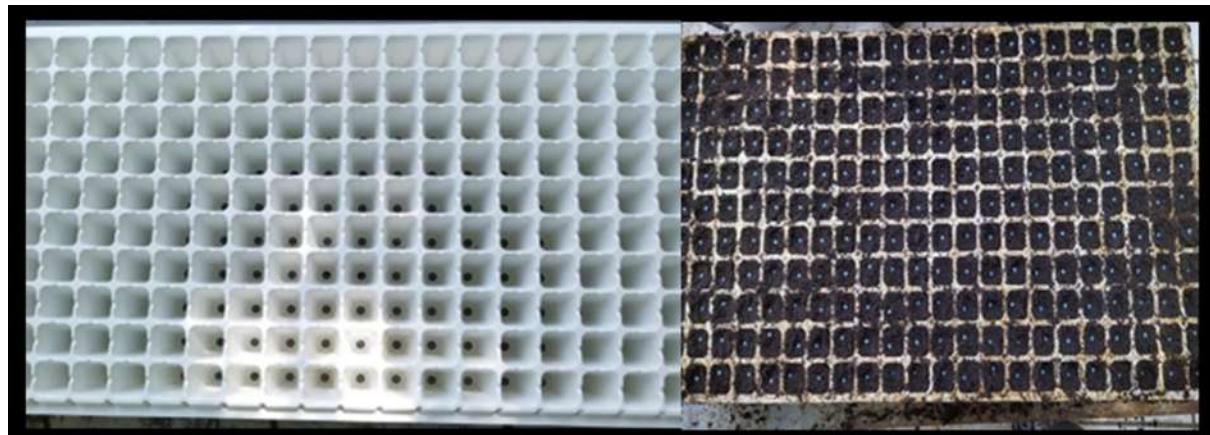


Figura 3.3. Charola utilizada para el almacigo y siembre del chile serrano.

Posteriormente las charolas se metieron por ocho días en bolsas de plástico negras de 60 x 90 cm para que aumentar la temperatura y acelerar el proceso de germinación (Figura 3.4).



Figura 3.4. Colocación de las charolas en bolsas de plástico y plántulas de chile serrano.

Después, las charolas fueron colocadas bajo malla sombra. El riego se suministró todos los días por la mañana de acuerdo con las necesidades hídricas.

Adicionalmente se realizaron aplicaciones periódicas del fungida PREVICUR® (Propamocarb 530 g L⁻¹ + Fosetyl 310 g L⁻¹) y RIDOMIL GOLD® (Metalaxil-M) para prevenir la incidencia del damping off.

Estructura para el establecimiento del cultivo

Se utilizó un sistema de agricultura protegida bajo una estructura tipo túnel de 10 m x 40 m, diseñada para optimizar las condiciones de crecimiento. La estructura fue acondicionada con malla sombra de polietileno negro al 30 %, que proporcionó una reducción controlada de la radiación solar incidente. Para asegurar un ambiente aislado y protegido de vectores, está revestida completamente con malla antiáfidos de 25 x 40 hilos por pulgada cuadrada, y se orientó en dirección este-oeste (Figura 3.5).



Figura 3.5. Características de la malla sombra utilizadas en el estudio.

Debido a las dimensiones de la estructura, se delimitó un área de trabajo de 10 m x 20 m, correspondiente a la mitad de la superficie total. La infraestructura presenta una altura de 7 m en el cenit y 5 m en las canaletas laterales, facilitando la ventilación y el manejo del cultivo.

El sistema de riego, diseñado para una nutrición precisa, se compone de cuatro cisternas Rotoplas de 2500 L, destinadas al almacenamiento de agua, y una cisterna adicional de 450 L, utilizada para la preparación de la solución nutritiva y la dilución de fertilizantes. La distribución del agua se realiza mediante un sistema de riego por goteo, impulsado por una bomba de agua con capacidad de bombeo de 2 pulgadas (Figuras 3.6).



Figura 3.6. Sistema de riego utilizado en el cultivo de chile serrano.

Preparación del terreno y acondicionamiento del sitio experimental

Se realizó una preparación edáfica exhaustiva con un motocultor, con el objetivo de optimizar la aireación y el drenaje del suelo. Posteriormente, se formaron ocho camas de cultivo, sobre las cuales se instaló un sistema de riego localizado mediante cintas de goteo de 5/8". Estas cintas, con emisores dispuestos cada 10 cm, proporcionan un caudal de 1.01 L por hora por emisor, que asegura una distribución uniforme del agua a lo largo de cada cama. Para la gestión de malezas y la conservación de la humedad, se implementó una cobertura de acolchado plástico bicolor (plata/negro) (Figuras 3.7 y 3.8).



Figura 3.7. Preparación del terreno y colocación del acolchado.



Figura 3.8. Instalación del acolchado en las camas de siembra.

Trasplante y manejo del cultivo

A los 15 días después de la emergencia (1° de octubre del 2023), se realizó el trasplante, para lo cual previamente las charolas con plántulas se sumergieron en una solución de PREVICUR® (Propamocarb 530 g L⁻¹ + Fosetyl 310 g L⁻¹) a la dosis de 1.5 mL L⁻¹ de agua para prevenir la incidencia de hongos que provocan el Damping off. Posteriormente se dejaron escurrir y se procedió a colocar una plántula por orificio a distancia entre plantas de 0.4 m y entre líneas de 0.8 m (Figura 3.9).



Figura 3.9. Trasplante de chile serrano en las camas de siembra.

Aplicación del riego y nutrición del cultivo

El régimen hídrico se implementó mediante un sistema de riego por cintas de goteo, La frecuencia y el volumen de riego, se ajustó en función de los requerimientos específicos del cultivo, lo que garantizó el mantenimiento constante de la capacidad de campo del suelo.

Respecto a la nutrición, está se suministró junto con el riego. La primera aplicación de nutrientes se realizó mediante la incorporación de polisulfuro de calcio y amonio, disueltos en una proporción de 5 kg en 450 L de agua. Para la elaboración del programa de nutrición siguiente, se cuantificaron los miliequivalentes aportados por

el suelo (Cuadro 3.1) y por el agua de riego (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.1 Características físicas y químicas del suelo de la casa malla sombra.

P-Olsen	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	B	S	NO ₃ ⁻
----- ppm -----											
34.9	1374	4935	1215	47.6	4.61	3.64	2.79	2.25	1.17	43.7	153

Cuadro 3.2 Resultados del análisis físcos-químicos del agua (Análisis CIDAM, 2020).

NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻³ ₄	SO ₄ ⁻² ₄	CO ₃ ⁻² ₃	CO ³	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
----- mEq L ⁻¹ -----									
0.21	0.01	0.24	0.00	2.63	0.44	0.34	0.03	0.72	2.43

El análisis edáfico del sitio experimental determinó características físicos y químicas que clasifican al suelo como moderadamente alcalino, con un pH de 7.11. La textura del suelo se define como franca, presenta un contenido elevado de materia orgánica, cuantificado en 4.22 %. A pesar de una conductividad hidráulica relativamente baja, de 2.59 cm h⁻¹, el suelo presenta una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 38.5 meq 100 g⁻¹, lo que sugiere un potencial de fertilidad considerable. Adicionalmente, se identificaron niveles óptimos de fósforo, potasio y magnesio disponibles, junto con un aporte significativo de nitrógeno inorgánico (Cuadro 3.1).

El agua utilizada para el riego y la preparación de la solución nutritiva se obtuvo de un pozo profundo ubicado en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Agropecuarias. Los análisis físicos y químicos del agua indican un pH ligeramente alcalino de 7.17 y una conductividad eléctrica baja, de 0.31 mS cm⁻¹. La relación de absorción de sodio (RAS) fue de 0.27, que indica un riesgo mínimo de problemas asociados con salinidad o sodicidad. Sin embargo, se detectaron niveles de microelementos como hierro, zinc, calcio, manganeso y boro inferiores a 0.05 mg L⁻¹ (Cuadro 3.2).

Con base en estos datos, se adoptó la solución nutritiva de Steiner como referencia para la fertilización. Posteriormente, se realizó un ajuste en la formulación de la solución, mediante la sustracción de los miliequivalentes aportados por el agua de riego, resultando en una solución Steiner modificada (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Solución Steiner ajustada utilizada en el cultivo.

meq L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻
Requeridos	7	9	4	11	1	8
Aporte del agua	0.03	0.72	2.43	0.21	0.01	0.24
Aplicados	6.97	8.28	1.57	10.79	0.99	7.76

Nota: Al requerimiento se le restó el aporte del agua.

Este ajuste se aplicó de forma particular a cada fase fenológica del cultivo de chile serrano. De tal manera que la solución nutritiva se aplicó al 25 % durante el establecimiento del cultivo, al 50 % durante el desarrollo del cultivo (crecimiento vegetativo, al 100 % en floración y amarre de frutos y al 150 % en la maduración y cosecha.

Los fertilizantes utilizados fueron nitrato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de potasio, urea, sulfato de magnesio y ácido fosfórico. El proceso de preparación consistió en una dilución inicial en un recipiente de 10 L, seguida de la transferencia a un tanque de 450 L, donde se completó la mezcla. La solución nutritiva resultante fue administrada directamente a las plantas a través del sistema de riego por goteo.

Adicionalmente, se aplicó K-HUM, un bioestimulante derivado de leonardita, rico en ácidos húmicos (12.5 %) y fúlvicos (2.5 %), junto con potasio (1 % como K₂O), magnesio (0.15 %), hierro (0.10 %), zinc (0.25 %) y aminoácidos (10 %). Este tratamiento, empleado como estrategia preventiva contra virosis, se aplicó al follaje a una dosis de 20 mL por litro de agua, utilizando una bomba de mochila.

Posteriormente, se complementó la nutrición con un fertilizante inorgánico líquido de fosfato potásico, caracterizado por su alto contenido de fósforo (46.5 % P₂O₅) y

potasio (22.16 % K₂O). Se aplicaron 50 mg por planta, en combinación con 1.5 mL de adherente (Inex-A) por litro de agua, mediante aspersiones foliares con una bomba de mochila de 20 L. Esta aplicación tuvo como objetivo tanto la estimulación del crecimiento vegetal como la profilaxis contra virosis.

Tutorado de las plantas

Para mantener a la planta erguida se realizó el tutorado con rafia y alambre recocido y la colocación de estacas de madera de 1.2 m de longitud, con separación entre estacas de 80 cm.

Control de plagas y enfermedades

Durante el ciclo del cultivo, se implementó un programa de manejo integrado de plagas y enfermedades para asegurar la sanidad del cultivo. A los 20 días después del trasplante, se realizaron aplicaciones foliares preventivas para controlar insectos perjudiciales, tales como el grillo (*Gryllus campestris*), babosas (*Deroceras* spp.) y hormigas (*Formicidae*). Para ello, se aplicaron los insecticidas Imidacloprid (CONFIDOR 350 SC®) y Clorpirifos + permetrina (CARIOCA MAX®) a una concentración de 1 mL L⁻¹. Estas aplicaciones buscaron establecer un control preventivo, favoreciendo el desarrollo saludable del cultivo.

Posteriormente, se estableció un programa de manejo tanto preventivo como curativo, alternando el uso de insecticidas químicos y orgánicos. Los insecticidas químicos Flupyradifurone (SIVANTO PRIME 200 SL®) e Imidacloprid (CONFIDOR 350 SC®) se aplicaron a una dosis de 1.5 mL L⁻¹ con intervalos de 10 días. Entre las aplicaciones de insecticidas químicos, se aplicó miel de abeja a una concentración de 15 mL L⁻¹ cada ocho días, con el fin de tratar plantas afectadas por virosis.

En todas las aplicaciones realizadas, se añadió adherente (Inex-A) a una dosis de 1 mL L⁻¹ de agua para mejorar la eficacia de los productos aplicados. Las aplicaciones se llevaron a cabo utilizando una mochila aspersora con capacidad de 20 L, se

aseguró una distribución uniforme y efectiva de los tratamientos en el cultivo. Este enfoque integral permitió mantener un adecuado control fitosanitario a lo largo del ciclo productivo.

Así mismo, se realizaron aplicaciones preventivas en drench a las plantas de chile para controlar diversas enfermedades. Se utilizó RIDOMIL GOLD 480 SL® (480 g L⁻¹ de Metalaxil M) y PREVICUR ENERGY® (530 g L⁻¹ de Propamocarb + 310 g L⁻¹ de Fosetyl) como fungicidas para prevenir el ataque de *Phytophthora* spp., a la dosis de 20 mL L⁻¹ de agua en una bomba de mochila de 20 L.

Para el control de la mosca blanca, se realizó una aplicación del insecticida biológico EDAY, formulado como polvo humectable y conteniendo *Verticillium lecanii* (con una concentración mínima del 6 % y 2.1×10^7 conidios/kg de ingrediente activo). La dosis empleada fue de 50 g de EDAY, complementada con 1.5 mL de adherente (Inex-A®) por L de agua. La aplicación se efectuó a las 8:00 a.m., utilizando una bomba de mochila de 20 L para asegurar una distribución homogénea del tratamiento.

Polinización

Para que las flores de las plantas fueran polinizadas se metió una caja de abejas después de los 25 días del trasplante, las abejas estuvieron en la nave del cultivo protegido desde el 25 de octubre del 2023 hasta el 15 de diciembre del 2023, esto se hizo para que las abejas pudieran realizar su trabajo de polinización.

Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones para evaluar los tratamientos. El experimento constó de 28 unidades experimentales, cada una conformada por 10 plantas (Cuadro 3.4). Para la obtención de datos se consideró como parcela útil un subconjunto de cuatro plantas ubicadas en la parte central de cada unidad experimental.

Cuadro 3.4. Identificación y distribución de los tratamientos en el sitio experimental.

Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV
D10-A2-R1	D20-A4-R2	D20-A4-R3	D20-A6-R4
D0-A0-R1	D0-A0-R2	D10-A4-R3	D0-A0-R4
D10-A6-R1	D20-A2-R2	D10-A6-R3	D20-A4-R4
D20-A6-R1	D20-A6-R2	D20-A2-R3	D10-A2-R4
D20-A2-R1	D10-A6-R2	D10-A2-R3	D10-A6-R4
D20-A4-R1	D10-A4-R2	D0-A0-R3	D10-A4-R4
D10-A4-R1	D10-A2-R2	D20-A6-R3	D20-A2-R4

Tratamientos. Los tratamientos consistieron en la aplicación foliar conjunta de las nanopartículas de los micronutrientos ZnO, CuO y FeO, cada una a las concentraciones de 10 y 20 ppm (D10 y D20, respectivamente), suministradas en 2, 4 y 6 aplicaciones (A2, A4 y A6, respectivamente) durante el ciclo de cultivo. Las combinaciones de niveles generaron seis tratamientos más el testigo sin aplicación (D10-A2, D10-A4 D10-A6, D20-A2, D20-A4, D20-A6 y D0-A0).

Las nanopartículas se diluyeron en agua destilada, y se adicionó un coadyuvante INEX® a 1 mL L⁻¹, esto con el propósito de aumentar la adherencia. Las aplicaciones se hicieron mediante atomización con equipo industrial Stihl a primera hora de la mañana. El inicio de las aplicaciones de los tratamientos fue a los 15 días posteriores al trasplante (Figura 3.10).



Figuras 3.10. Atomizador usado en las aplicaciones y suministro de los tratamientos.

Las fuentes de nanopartículas usadas en el presente estudio son de la marca SIGMA-ALDRICH®. A continuación, se describen las características más importantes de los productos. El óxido de zinc es en presentación de polvo a la concentración de 79.7 %, de color blanco, con tamaño de nanopartículas de 67 nm, la solubilidad en agua es de 0.0029 g L^{-1} a 20°C (68°F) - Directrices de ensayo 105 del OECD - ligeramente soluble. El óxido de hierro es un polvo rojo-café, a la concentración de 69.3 %, el tamaño de nanopartícula es de 27 nm y la solubilidad en agua es de 0.001 g L^{-1} a 20°C (68°F) - Directrices de ensayo 105 del OECD. Mientras que el óxido de cobre es en polvo negro, a la concentración de 78.8 %, el tamaño de nanopartícula es menor a 50 nm, y la solubilidad en agua es de 0.0001 g L^{-1} a 20°C (68°F) (Figura 3.11).



Figuras 3.11. Balanza utilizada para en el pesaje de las nanopartículas y productos usados como nanopartículas.

Variables morfológicas

Para conocer el crecimiento de la planta en función del tiempo y de los tratamientos aplicados, de manera periódica durante el ciclo del cultivo se midieron las siguientes variables morfológicas:

Altura de la planta: se midió con un flexómetro desde la base del tallo hasta el ápice.

Diámetro del tallo: con un vernier se midió esta variable a una altura sobre el piso de 5 cm.

Variables de rendimiento

A la madurez de cosecha se realizaron los cortes los frutos, en los cuales se midieron las siguientes variables:

Peso de frutos: en una báscula se pesaron los frutos cosechados en cada corte y de la sumatoria de todos los cortes se determinó el rendimiento de frutos por planta y por hectárea, considerando la densidad de población.

Número de frutos: se realizó la sumatoria del número de frutos cosechados en todos los cortes.

Peso promedio de frutos: con el peso de frutos y el número de frutos se determinó el peso promedio de frutos.

Diámetro polar y ecuatorial: Con un vernier se determinó estas variables, para lo cual, en cada corte se tomó una muestra de cinco frutos por unidad experimental.

Registro de elementos del clima y fenología: durante el ciclo del cultivo se registraron las temperaturas máximas y mínimas y la precipitación pluvial información obtenida de la estación agrometeorología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias. También se registró el tiempo a ocurrencia de las etapas fenológicas como emergencia, floración y fructificación, para determinar el día se consideró que la mitad de las plantas presentaran la fase fenológica. Adicionalmente se registró la fecha de la siembra, del trasplante y el retiro de la planta.

Análisis estadístico

Los datos registrados de las variables de respuesta se analizaron con el paquete estadísticos SAS versión 9.4 y a las medias que resultaron con cambios estadísticos se les aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey al 5 % de probabilidad del error (SAS, 2017).

Para conocer la velocidad de incremento en la altura y diámetro del tallo de la planta de chile serrano a través del tiempo con cada uno de los tratamientos se aplicó un análisis de regresión lineal simple con el programa de EXCEL.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del clima en las etapas fenológicas y temperaturas máximas y mínimas.

Efecto del clima las etapas fenológicas del chile serrano no presentaron cambios por efecto de los tratamientos. En este sentido, la emergencia ocurrió a los seis días después de la siembra, la floración se presentó a los 58 días, la fructificación a los 87 días y el fin de cosecha a los 135 días después de la siembra (Figura 4.1).

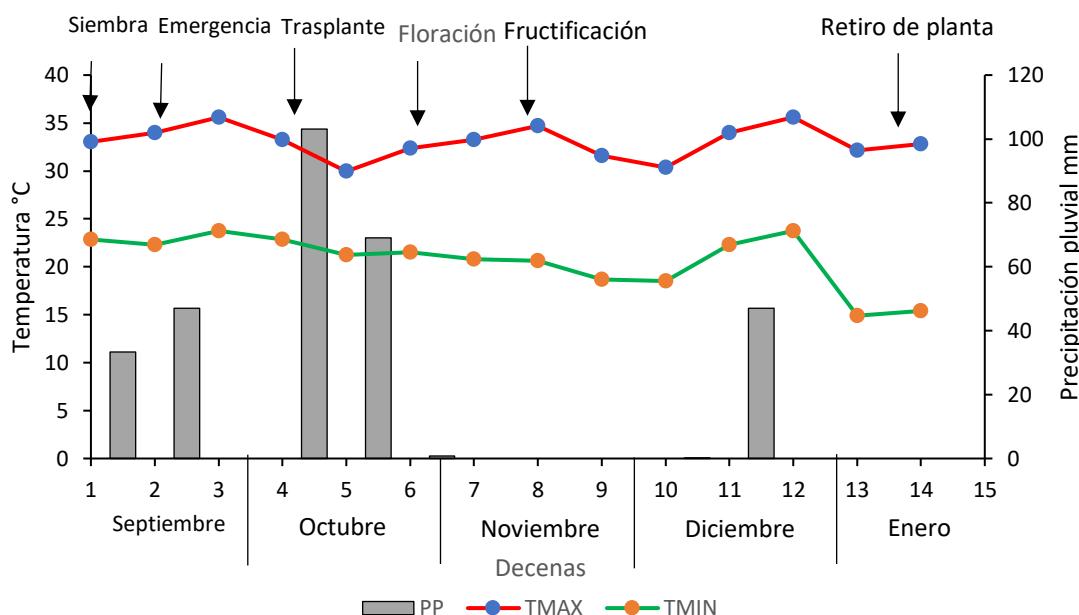


Figura 4.1 Efecto del clima en las etapas fenológicas y temperaturas máximas y mínimas (promedio decenal) y precipitación pluvial (suma decenal) durante el crecimiento del cultivo.

Con relación a la temperatura, durante el ciclo del cultivo de chile serrano, se registró que de la siembra a la emergencia la temperatura máxima fue de 33 a 35.6 °C y la mínima de 23.5 °C. Las cuales superaron ligeramente el rango ideal que es de 20 a 30 °C, lo que podría haber acelerado la germinación (Thompson y Kelly, 1957; SADER, 2024)

La emergencia ocurrió a los seis días después de la siembra donde predominó una temperatura máxima de 33.06 °C y una mínima de 22.9 °C.

El trasplante se realizó el día 1° de octubre del 2023, donde la temperatura máxima promedio decenal que se presentó fue 33.3 °C a 34 °C y la mínima de 22.9 a 22.3 °C, en el periodo de semillero previo al trasplante, las temperaturas máximas alcanzaron 35.6 °C y las mínimas de 22.9 °C. Después del trasplante las plantas de chiles serrano pasaron por un periodo de adaptación, en donde las raíces comienzan a establecerse en suelo, en este periodo las temperaturas tendieron a disminuir, así las máximas fueron de 29.9 °C y las mínimas de 21.2 °C, lo que pudo haber favorecido al cultivo (Thompson y Kelly, 1957).

En la fase de la floración prevaleció una temperatura máxima de 35.5 °C y mínima de 23 °C, las cuales fueron ligeramente superiores al rango óptimo. Cabe destacar que temperaturas superiores a 35 °C pueden afectar la fertilidad de las flores y reducir la producción. Mientras que en el periodo de fructificación y cosecha las temperaturas máximas oscilaron de 30 a 35.6 °C y las mínimas 15.4 a 23.7 °C, que están dentro del rango aceptable, aunque en el límite superior. Las mínimas descendieron hasta 15.4 °C, lo que está cerca del límite inferior recomendado, ya que temperaturas por debajo de 15 °C pueden afectar negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas (SADER, 2024).

La precipitación pluvial que incidió durante el ciclo del cultivo fue de 300.31 mm, de la cual el 84 % se presentó durante la siembra, emergencia, trasplante y primeras etapas del crecimiento vegetativo. La precipitación pluvial incidente en la decena cuatro del cultivo durante el trasplante provocó la reducción de la temperatura máxima y mínima, lo que pudo haber favorecido un menor estrés en las plántulas y mejor adaptación al suelo (Figura 4.1).

Variables morfológicas

Altura de la planta

La altura de la planta del chile serrano en función de los días después del trasplante se ajustó a modelos de regresión lineal simple con todos los tratamientos de nanopartículas y el tratamiento control (Figura 4.2).

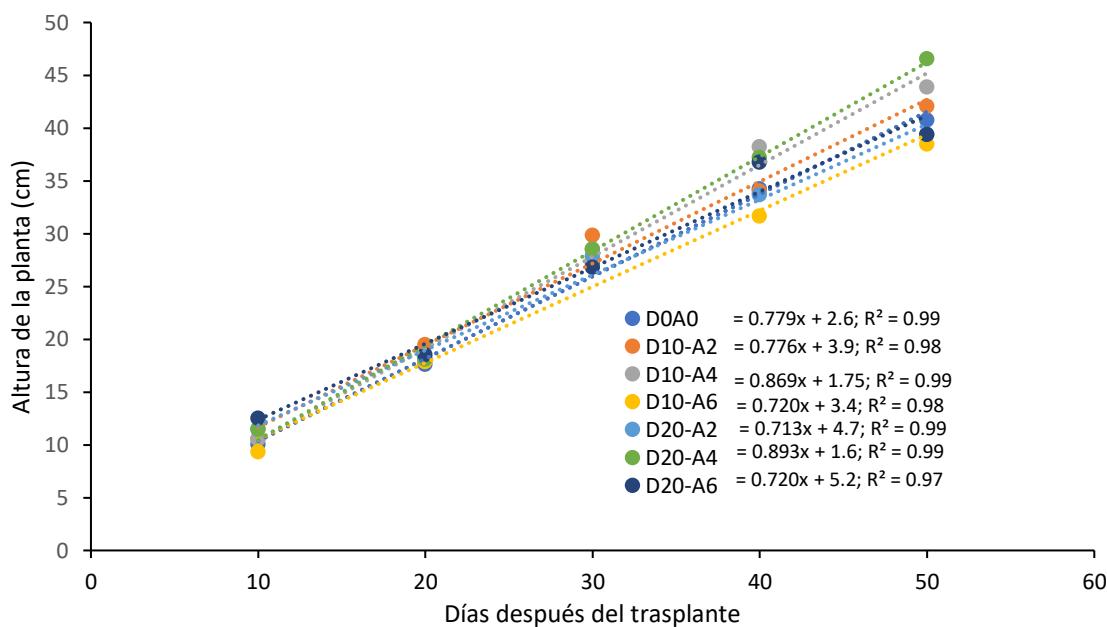


Figura 4.2. Dinámica de la altura de la planta en función de los tratamientos.

De acuerdo con los modelos resultantes, se encontró que las plantas presentaron diferente velocidad de incremento en su altura de acuerdo con los tratamientos. En este sentido, las plantas con la mayor tasa de incremento en esta variable fueron aquellas que recibieron los tratamientos D10-A4 y D20-A4, al presentar aumentos en su altura de 0.869 y 0.893 cm por día, respectivamente durante el periodo evaluado, mientras que, con los otros tratamientos, las plantas registraron similar velocidad de crecimiento que las plantas del testigo sin aplicación (Figura 4.2).

En la Figura 4.3 que presenta la altura de la planta a los 60 días después del trasplante se observa que existieron cambios estadísticos altamente significativos a

causa del suministro foliar de nanopartículas a diferentes dosis y número de aplicaciones.

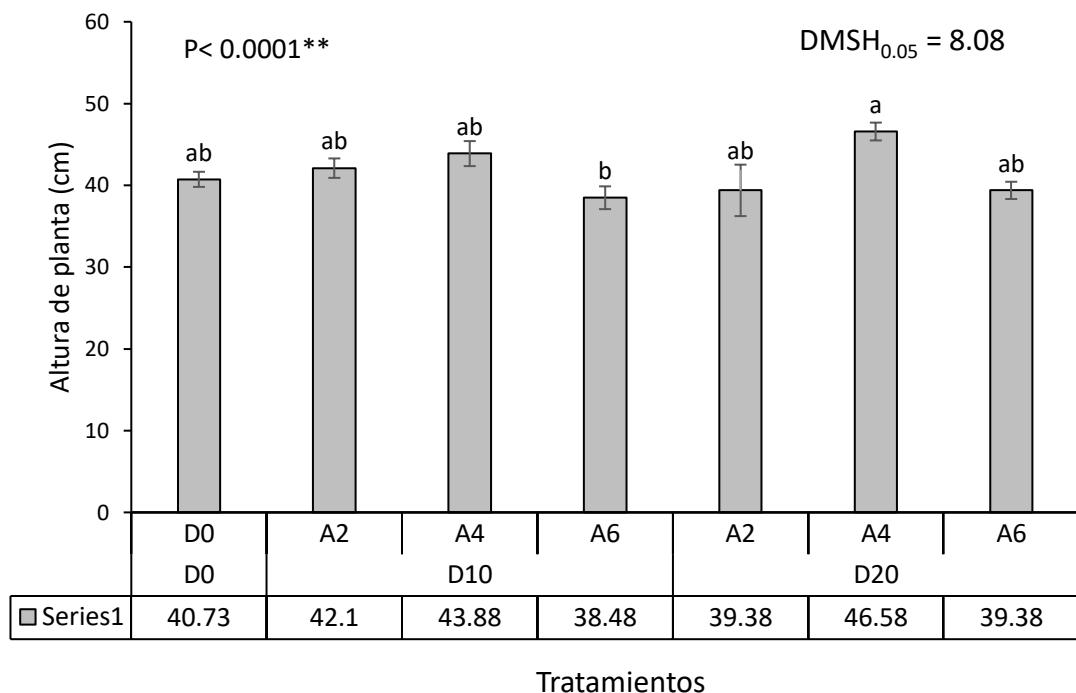


Figura 4.3. Prueba de comparación de medias de la altura de la planta de chile serrano a los 50 días después del trasplante. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

De acuerdo con la prueba complementaria, se encontró que las plantas de chile serrano asperjadas con las nanopartículas a la dosis de 20 ppm en cuatro aplicaciones presentaron la mayor altura con incrementos de 6 al 21 % respecto a las plantas con los otros tratamientos. Estos resultados indican que la dosis de 10 ppm podría haber sido insuficiente para promover el aumento en esta variable. Respecto al número de aplicaciones, el suministro de seis veces a la dosis de 20 ppm podría haber excedido el requerimiento de la planta por estos nutrientes.

El mayor efecto positivo de la aplicación de nanopartícula a 20 ppm en cuatro aplicaciones se puede atribuir a que el Zn, Cu y Fe son elementos esenciales en la nutrición de las plantas, importantes en procesos metabólicos y fisiológicos. Al respecto, el Zn es conocido por su papel en la activación de enzimas y síntesis de

auxinas, las cuales promueven el alargamiento celular y el desarrollo del sistema vascular, así como mejora en la actividad fotosintética, lo que contribuye directamente al crecimiento en altura (Rudani *et al.*, 2018; Faizan y Hayat, 2019).

Así mismo, el cobre (Cu) actúa como cofactor en enzimas relacionadas con la fotosíntesis y la lignificación, lo que podría haber mejorado la estructura de los tejidos de soporte, aumentando así la estabilidad y altura de las plantas (Zewide y Sherefu, 2021). Por su parte, el hierro (Fe) es un componente esencial de las proteínas involucradas en el transporte de electrones durante la fotosíntesis, favoreciendo un desarrollo vegetativo vigoroso (Rout y Sahoo, 2015).

Resultados similares a los del presente estudio se han encontrado en otros cultivos como el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) que con aplicaciones foliar de nanoparticulas de ZnO en tres momentos, a los 40, 50 y 60 días después del trasplante a la dosis de 250 ppm registraron incrementos significativos en la altura de la planta (Ali *et al.*, 2015).

Así mismo, Pérez-Velasco *et al.* (2020) también en *S. lycopersicum* encontraron que el suministro foliar de nanopartículas de ZnO suministradas a la dosis de 1500 ppm aumentó la altura de la planta en 12 %. Similares resultados se han encontrado con la aplicación individual de Cu, en el cultivo de maíz (Tripathi *et al.*, 2017) que a las dosis de 10 a 20 ppm generó incrementos del 12 al 20 % en la altura de las plantas. También en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) que con 100 mg L⁻¹ ZnO NPs and 20 mg L⁻¹ Fe NPs, suministradas vía foliar lograron aumentar la altura de la planta hasta en 37 % (Rizwan *et al.*, 2017), valor que superó el aumento en esta variable en nuestro estudio. La variación en dosis de respuesta en el presente estudio y estudios similares indica diferencias en requerimientos de acuerdo con la especie de cultivo tratado.

La sinergia entre estos tres elementos en tamaño de nanopartícula podría explicar su mayor eficacia en comparación con fuentes convencionales de fertilización. Las nanopartículas tienen una mayor superficie de contacto y mejoran la disponibilidad de los nutrientes al ser absorbidas de manera más eficiente por las raíces y tejidos foliares (Ahmed *et al.*, 2021).

Diámetro del tallo

El diámetro del tallo del chile serrano en los primeros 50 días después del trasplante se ajustó a modelos de regresión lineal simple para todos los tratamientos (Figura 4.4).

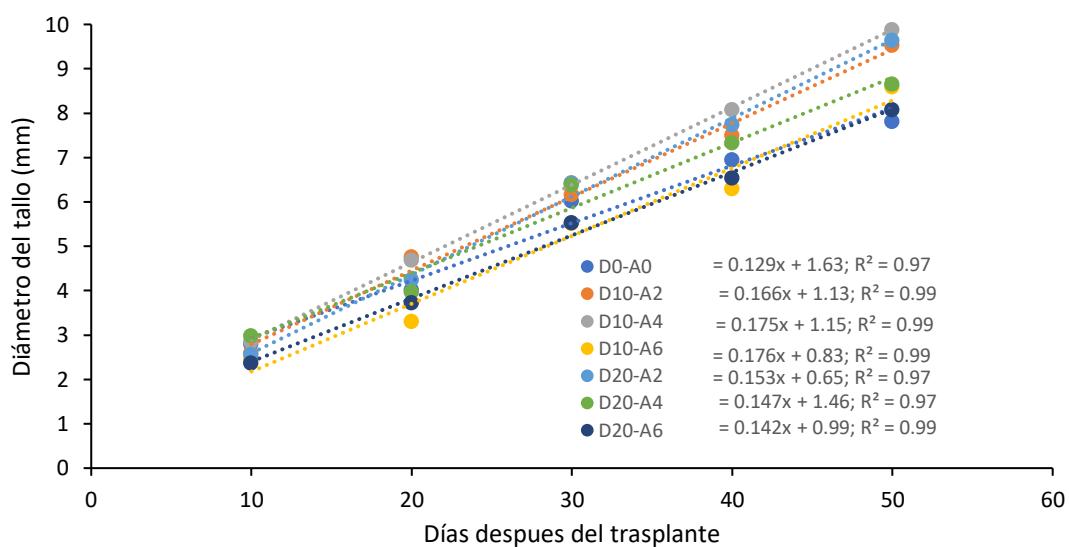


Figura 4.4. Dinámica del diámetro del tallo del chile serrano en función de los tratamientos.

Se encontró que con todos los tratamientos de nanopartículas en cualquier número de aplicaciones presentaron mayores tasas de incremento que las plantas del testigo sin aplicación. Aunque fueron las plantas con D10-A4 y D10-A6, las que registraron la mayor tasa de incremento en el diámetro del tallo con 0.175 y 0.176 mm por día. En este sentido, fueron mayores las velocidades de crecimiento en diámetro del tallo de las plantas con aplicación de 10 ppm en cualquier número de aplicaciones en comparación con el suministro de 20 ppm (Figura 4.4).

A los 60 días después de la siembra, se registraron cambios altamente significativos en el diámetro del tallo del chile serrano (Figura 4.5).

De acuerdo con la prueba complementaria, las plantas que registraron los valores mayores fueron las asperjadas con D10-A4 y D20-A2, seguidas por D10-A2. Que

superaron a las plantas del testigo en 22, 19 y 18 %, respectivamente y fueron estadísticamente diferentes a este. (Figura 4.5).

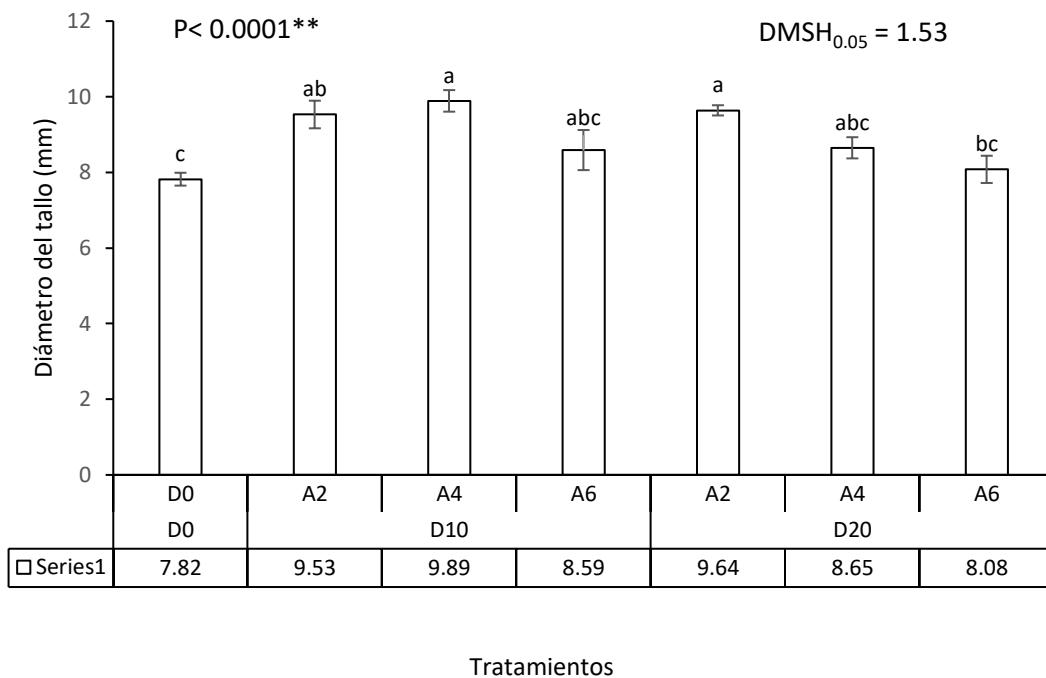


Figura 4.5. Prueba de comparación de medias del diámetro del tallo la planta de chile serrano a los 50 días después del trasplante. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

Los diámetros de tallos mayores registrados a los 60 días después del trasplante en las plantas con 10 ppm de nanopartículas en dos y cuatro aplicaciones, así como con 20 ppm en dos aplicaciones se relaciona con las más altas velocidades de aumento en esta variable a través del tiempo, que se observaron poco tiempo después de haber iniciado con las aplicaciones de los tratamientos.

Así mismo, el diámetro del tallo mostró un comportamiento similar que la altura de la planta con relación a la aplicación de las nanopartículas, al ser favorecidas ambas variables con la mayoría de los tratamientos.

El aumento en el diámetro del tallo con aplicación de nanopartículas se ha también encontrado en otros estudios. En este sentido, Pérez-Velasco *et al.* (2020) en el cultivo de jitomate con aplicación de nanopartículas de ZnO registraron aumentos significativos en el diámetro del tallo, ya que sin aplicación el valor fue de 21.8 mm y con aplicación de esta nanopartícula las plantas presentaron diámetros de 24.5 cm.

Variables de rendimiento

Número de frutos

Esta variable mostró cambios estadísticos altamente significativos a causa de los tratamientos evaluados (Figura 4.6).

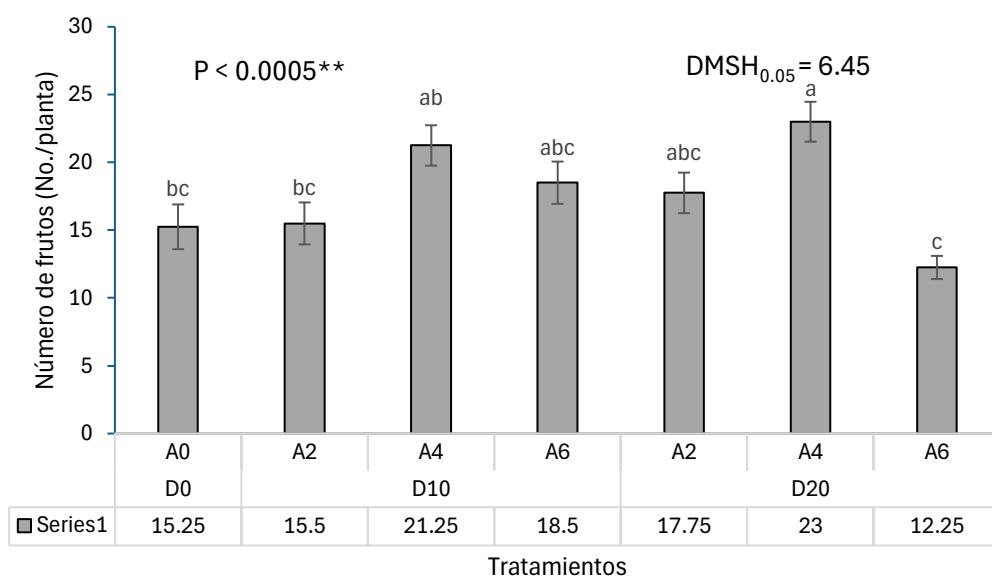


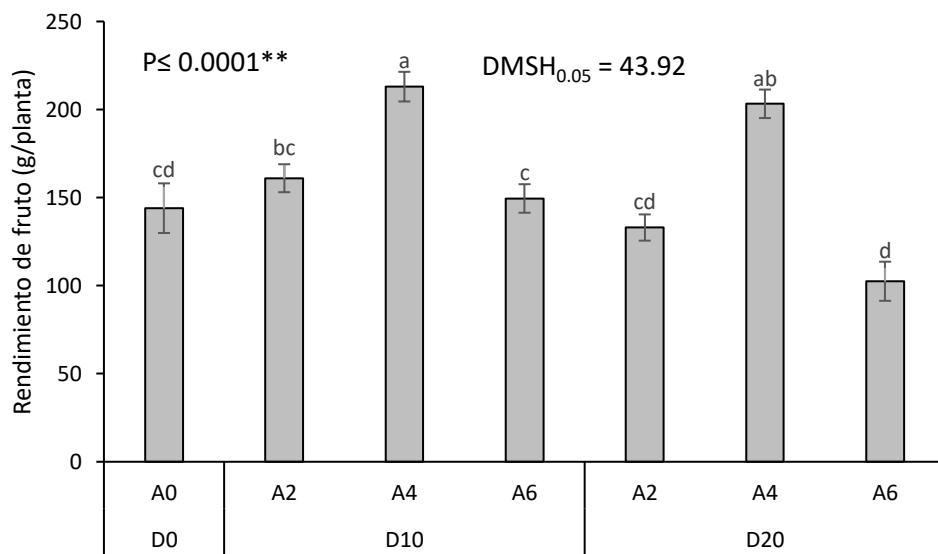
Figura 4.6. Prueba de comparación de medias del número de frutos de chile serrano con aplicación de nanopartículas metálicas.

El número de frutos resultó beneficiado con la aplicación de nanopartículas de Zn+Cu+Fe las dosis de 10 y 20 ppm suministradas cuatro veces. Con un aumento respecto a las plantas del testigo sin aplicación del 51 y 41 % respectivamente. Con los otros tratamientos las plantas registraron similar cantidad de frutos por plantas a excepción de las plantas con seis aplicaciones de nanopartículas a la dosis de 20

ppm, que provocó el decremento de 19.7 % (Figura 4.6).

Rendimiento de frutos

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas altamente significativas en el rendimiento de fruto de chile serrano a causa de los tratamientos (Figura 4.6). De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró que algunos tratamientos mejoraron el rendimiento de frutos, con otros se mantuvo un rendimiento similar a las plantas del testigo, pero con la dosis alta con el mayor número de aplicaciones, disminuyó el rendimiento del fruto (Figura 4.7).



Figuro 4.7. Prueba de comparación de medias del rendimiento de fruto verde de chile serrano en función de la dosis y numero de aplicaciones de nanopartículas. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error. D = dosis (ppm), A = número de aplicaciones.

Destacaron los tratamientos de 10 ppm de nanopartículas en cuatro aplicaciones y 20 ppm en cuatro aplicaciones como los tratamientos que promovieron un mayor rendimiento de frutos de chile, con valores de 213 y 203.5 g/planta, lo que representó 48 y 41 %, respectivamente más de rendimiento en comparación con las plantas del tratamiento control (D0-A0) que solo produjeron 144 g/planta (Figura 4.7).

Mientras que con 10 y 20 ppm de nanopartículas en dos y seis aplicaciones y con 20 ppm en dos aplicaciones, el rendimiento de chile fue similar a las plantas sin aplicación. Por otra parte, cuando las plantas recibieron en seis ocasiones 20 ppm la producción tendió a reducirse en 29 % en comparación de las plantas sin aplicación (control) (Figura 4.6). Lo que puede indicar un efecto de toxicidad en la planta que es común en dosis elevadas de metales pesados (Liu *et al.*, 2021).

El mayor efecto positivo de la aplicación de las nanopartículas de Zn+Cu+Fe en dosis de 10 y 20 ppm cada una aplicadas cuatro veces se puede atribuir a que en particular en este cultivo y bajo las condiciones de la presente investigación, se cubrieron las necesidad por estos nutrientes, así, un menor número de aplicaciones pudo haber sido insuficiente para promover de forma significativa la producción y un mayor número de aplicaciones podría haber generado una condición de estrés oxidativo o toxicidad, como en este caso pudo ocurrir con el suministro de 20 ppm de las nanopartículas en seis aplicaciones. Por otra parte, el suministro de micronutrientes en tamaño de nanopartícula de acuerdo con Zulfiqar *et al.* (2019) es mayor su eficiencia en la absorción en la planta, debido a su pequeño tamaño y gran área superficial, lo que favorece que pueden penetrar más fácilmente en los tejidos vegetales a nivel celular. Así mismo, el cultivo de chile serrano se estableció en un suelo con niveles bajos de Fe, que de acuerdo con el resultado del análisis físico y químico del suelo es de 4.61 ppm, mientras que de Zn fue de 3.64 y de Cu de 2.25 ppm, por lo que su aplicación pudo haber contribuido a una mayor respuesta.

Además, estos micronutrientes son cofactores esenciales para numerosas enzimas involucradas en procesos fisiológicos importantes, como la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de clorofila. Al aumentar la concentración de Zn, Cu y Fe a nivel celular, se puede estimular la actividad de estas enzimas, mejorando el metabolismo general de la planta (Delfani *et al.*, 2014; Zulfiqar *et al.*, 2019).

Respecto a la función del Fe en la síntesis de clorofila, este participa como cofactor en diversas enzimas clave en este proceso. Es fundamental para la actividad del enzima ácido δ-aminolevulínico deshidratasa, que cataliza una etapa temprana en la formación del anillo porfirínico, estructura central de la clorofila. Además, el hierro

interviene en la biosíntesis de proteínas ferredoxinas, que son necesarias para el transporte de electrones durante la fotosíntesis y al ser aplicado como nanopartícula su liberación es controlada y gradual. Esto además de mejorar la eficiencia del uso del hierro también podría ayudar a superar problemas comunes en su aplicación convencional, como la insolubilidad en suelos alcalinos (Rout y Sahoo, 2015).

Longitud, diámetro de frutos y peso promedio de frutos

En el Cuadro 4.1 se observan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la longitud promedio de los frutos entre los tratamientos. La mayor longitud se obtuvo con la dosis de 10 ppm y 2 aplicaciones (D10-A2), lo que representa un incremento del 47.74 % respecto al testigo (D0-A0).

En contraste, la dosis de 20 ppm con 6 aplicaciones (D20-A6) mostró la menor longitud promedio (53.35 mm), lo que representa un decremento del 22 % en comparación las plantas de chile serrano con el testigo.

Los resultados indican que el tratamiento D10-A2 fue el más efectivo para mejorar en la longitud y el peso promedio de frutos, con los mayores incrementos respecto a las plantas del testigo, mientras que tratamientos con dosis más altas (D20) y mayor número de aplicaciones (A6) tienden a presentar reducciones en los valores de las variables evaluadas, posiblemente debido a efectos adversos asociados con el exceso de dosis o aplicaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la mejor respuesta en el rendimiento de fruto del chile serrano del suministro de las nanopartículas aplicadas de forma conjunta a la dosis de 10 y 20 ppm en cuatro aplicaciones se relaciona con el aumento en el crecimiento de la planta, ya que con estos tratamientos las plantas mostraron los mayores valores, así mismo, las plantas tratadas con estas dosis y número de aplicaciones registraron el mayor número de frutos, peso, longitud y diámetro promedio.

Cuadro 4.1. Nivel de significancia y prueba de comparación de medias del número, longitud, diámetro y peso promedio de frutos de chile serrano con aplicación de nanopartículas metálicas.

Dosis (ppm)	No. Aplicaciones	Longitud de fruto (mm)	Diámetro de fruto (mm)	Peso promedio de frutos (g)
D0	A0	68.65 bcd [†]	18.20 bc	9.48 abc
D10	A2	101.45 a	21.70 bc	10.53 a
D10	A4	89.98 ab	24.56 ab	10.08 ab
D10	A6	78.30 abc	21.65 bc	8.13 cd
D20	A2	58.20 cd	16.33 c	7.56 d
D20	A4	58.62 cd	29.15 a	8.90 bcd
D20	A6	53.35 d	15.70 c	8.30 cd
Media		72.65	21.04	8.99
Prob. F		**	**	**
DMSH _{0.05}		24.22	6.74	1.5
Coeficiente de variación %		14.27	13.71	7.14

[†]Medias con letras iguales dentro de la misma columna son no diferentes estadísticamente (Tukey, P ≤ 0.05).

Respuesta positiva del suministro de nanopartículas en el aumento en la producción agrícola se ha registrado en especies de plantas, como el maíz, la cebolla, el pimiento, el trigo, el melón, entre otros (Esper-Neto *et al.*, 2020; Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021), con variación en la dosis más apropiada. Así mismo, además de las funciones esenciales en la nutrición de las plantas de los micronutrientes suministrados como nanopartículas en el presente estudio, se menciona que mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Nandhini *et al.*, 2019), lo que también pudo haber favorecido la producción en este cultivo.

Respecto al precio de las nanopartículas, 50 g tienen un costo aproximado de \$3,500 pesos (MXN), sin embargo, debido a la baja dosis de utilización 10 y 20 ppm y considerando un gasto de 400 L de solución por ha por aplicación. Para cuatro aplicaciones se requiere 4 y 8 g, respectivamente de cada nanopartícula. Lo que justifica su utilización por el incremento significativo en el rendimiento.

CONCLUSIONES

La aplicación de las nanopartículas en diferentes dosis y número de aplicaciones no modificó el tiempo de las etapas fenológicas del chile serrano.

La aplicación foliar combinada de nanopartículas de Zn, Cu y Fe en el cultivo de chile serrano favoreció un mayor crecimiento en altura de la planta y un incremento en el diámetro del tallo.

Aunque la aplicación de 10 ppm en dos ocasiones promovió la producción de frutos con mayor longitud y peso promedio, el factor más determinante en el rendimiento total fue el número de frutos por planta.

Las aplicaciones de nanopartículas a dosis de 10 y 20 ppm en cuatro aplicaciones resultaron en la mayor producción de chile serrano, debido al aumento en el número de frutos, así como en la altura de la planta y el diámetro del tallo.

En contraste, el suministro de 20 ppm en seis aplicaciones redujo la producción de chile serrano, lo que sugiere un posible efecto negativo por exceso de nanopartículas.

LITERATURA CITADA

- Adhikari, T., Sarkar, D., Mashayekhi, H. and Xing, B. (2016). Growth and enzymatic activity of maize (*Zea mays L.*) plant: solution culture test for copper dioxide nano particles. *J Plant Nutr.* 39(1): 99–115.
- Ahmed, R., Yusoff Abd Samad, M., Uddin, M. K., Quddus, M. A. and Hossain, M. M. (2021). Recent trends in the foliar spraying of zinc nutrient and zinc oxide nanoparticles in tomato production. *Agronomy*, 11(10): 2074.
- Ali, M. R., Mehraj, H. and Jamal-Uddin, A. F. M. (2015). Effects of foliar application of zinc and boron on growth and yield of summer tomato. *Journal of Bioscience and Agriculture Research*, 6(1): 512-517
- Amirnia, R., Bayat, M. and Tajbakhsh, M. (2014). Effects of nano fertilizer application and maternal corm weight on flowering at some saffron (*Crocus sativus L.*) ecotypes. *Turkish Journal of Field Crops*, 19(2): 158.
- Araméndiz-Tatis, H., Cardona-Ayala, C. and Correa-Álvarez, E. (2013). Efecto de diferentes sustratos en la calidad de plántulas de berenjena (*Solanum melongena L.*). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(1): 55-61.
- Azlan, A., Sultana, S., Huei, C. S. and Razman, M. R. (2022). Antioxidant, anti-obesity, nutritional and other beneficial effects of different chili pepper: A review. *Molecules*, 27(3): 898.
- Bañas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D. A. and García-Viguera, C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annuum L.*) derived products: Technological benefits and biological advantages. *Food chemistry*, 274: 872-885.
- Bandyopadhyay, S., Ghosh, K. and Varadachari, C. (2014). Multimicronutrient Slow-Release Fertilizer of Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *International Journal of Chemical Engineering*, 2014(1): 327153.

Bobadilla-Larios, V., Esparza-Ibarra, E., Delgadillo-Ruiz, L., Gallegos-Flores, P. y AyalaLujan, J. L. (2017). Variedades de chile (*Capsicum annuum* L.) identificadas mediante marcadores RAPD. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20: 465– 473.

Bosland, P. W. (1994). Chiles. History, cultivation and uses. En: Spices, herbs, and edible fungi. Charambous, G. (edit.). Elsevier Publication, New ork, pp. 347-366.

Castillo-González, J., Ojeda-Barrios, D., Hernández-Rodríguez, A., González-Franco, A. C., Robles-Hernández, L. and López-Ochoa, G. R. (2018). Zinc metalloenzymes in plants. *Interciencia*, 43(4): 242-248.

Chakraborty, M., Chakraborty, D., Mondal, P. and Paul, R. (2021). Micronutrient Deficiency Stress in Soils of India: Tackling it to Alleviate Hidden Hunger. In: Rakshit, A., Singh, S., Abhilash, P., Biswas, A. (eds) Soil Science: Fundamentals to Recent Advances. Springer, Singapore.

Chaoui, A., Jarrar, B. and Ferjani, E. E. (2004). Effects of cadmium and copper on peroxidase, NADH oxidase and IAA oxidase activities in cell wall, soluble and microsomal membrane fractions of pea roots. *Journal of Plant Physiology*, 161(11): 1225-1234.

Chen, P. Y., Lee, K. T., Chi, W. C., Hirt, H., Chang, C. C. and Huang, H. J. (2008). Possible involvement of MAP kinase pathways in acquired metal-tolerance induced by heat in plants. *Planta*, 228: 499-509.

Cuypers, A., Vangronsveld, J. and Clijsters, H. (2000). Biphasic effect of copper on the ascorbateglutathione pathway in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* seedlings during the early stages of metal assimilation. *Physiol. Plant.* 110: 512-517.

Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi, N. and Makarian, H. 2014. Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 45(4): 530-540.

Ditta, A., Arshad, M., and Ibrahim, M. (2015). Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: Applications and Perspectives. In *Nanotechnology and Plant Sciences* (pp. 55-75). Springer International Publishing.

Dimkpa, C.O., McLean, J. E., Britt, D. W. and Anderson, A. J. (2015a) El nano-CuO y la interacción con el nano-ZnO o las bacterias del suelo proporcionan evidencia de la interferencia de las nanopartículas en la nutrición de las plantas por metales. *Ecotoxicol.* 24:119–129.

Dubey, A. and Mailapalli, D. R. (2016). Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 307-330). Springer International Publishing.

Duran, N. and Marcato, P. D. (2013). Nanobiotechnology perspectives. Role of nanotechnology in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 48: 1127-1134.

Esper-Neto, M., Britt, D. W., Lara, L. M., Cartwright, A., dos Santos, R. F., Inoue, T. T., and Batista, M. A. (2020). Initial development of corn seedlings after seed priming with nanoscale synthetic zinc oxide. *Agronomy*, 10(2): 307.

Faizan, M., and Hayat, S. (2019). Effect of foliar spray of ZnO-NPs on the physiological parameters and antioxidant systems of *Lycopersicon esculentum*. *Pol. J. Nat. Sci.* 34(6): 87-105.

FAOSTAT [Food and Agriculture Organization of the United Nations]. 2023. Estadísticas de chile serrano Databases. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. (Consultado el 27 de enero de 2025).

He, L., Liu, Y., Mustapha, A. and Lin, M. (2011). Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. *Microbiological research*, 166(3): 207-215.

Juárez, M., Cerdán, M. and Sánchez-Sánchez, A. (2024). Hierro en el sistema Suelo-Planta. Depto. Agroquímica y Bioquímica. Facultad de Ciencias. Universidad

de Alicante. 32 p. En línea:
<https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/HIERRO.pdf> (Consultado el 28 de enero de 2025).

- Khan, F. A., Mahmood, T., Ali, M., Saeed, A. and Malik, A. 2014. Pharmacological importance of an ethnobotanical plant: *Capsicum annuum* L. *Natural Product Research*, 28(16): 1267-1274.
- Kantar, M. B., Anderson, J. E., Lucht, S. A., Mercer, K., Bernau, V., Case, K. A., ... and Baumler, D. J. (2016). Vitamin variation in *Capsicum spp.* provides opportunities to improve nutritional value of human diets. *PLoS One*, 11(8), e0161464.
- Kasana, R. C., Panwar, N. R., Kaul, R. K. and Kumar, P. (2017). Biosynthesis and effects of copper nanoparticles on plants. *Environmental Chemistry Letters*, 15: 233-240.
- Kasim, W. A. (2006). Changes induced by copper and cadmium stress in the anatomy and grain yield of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *International Journal of Agricultural and Biology*, 8: 123-128.
- Lee, G. R., Shin, M. K., Yoon, D. J., Kim, A. R., Yu, R., Park, N. H., and Han, I. S. (2013). Topical application of capsaicin reduces visceral adipose fat by affecting adipokine levels in high-fat diet-induced obese mice. *Obesity*, 21(1): 115-122.
- Lequeux, H., Hermans, C., Lutts, S. and Verbruggen, N. (2010). Response to copper excess in *Arabidopsis thaliana*: impact on the root system architecture, hormone distribution, lignin accumulation and mineral profile. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(8): 673-682.
- Lindsay, W. L. (1979). Chemical equilibria in soils Ed. John Wiley and Sons, N. Y. ISBN: 0-471-02704-9.
- Liu, D, Jiang, W, Meng, Q, Zou, J., Gu J. and Zeng, M. (2009) Cytogenetical and ultrastructural effects of copper on root meristem cells of *Allium sativum* L.

Biocell, 33: 25-32.

- Liu, R. and Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports*, 4: 686–5691.
- Liu, R., and Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the total environment*, 514: 131-139.
- Liu, S., Li, W., Wu, Y., Chen, C. and Lei, J. (2013). De novo transcriptome assembly in chili pepper (*Capsicum frutescens*) to identify genes involved in the biosynthesis of capsaicinoids. *PloS one*, 8(1): e48156.
- Liu, Z., Bai, Y., Luo, L., Wan, J., Wang, W., and Zhao, G. (2021). Effects of high dose copper on plant growth and mineral nutrient (Zn, Fe, Mg, K, Ca) uptake in spinach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(28): 37471-37481.
- López, P. (2016). Impacto económico del chile huacle (*Capsicum annuum* L) en el estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 38(2016): 317-327.
- López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., de Alba Romenus, K., Cabrera de la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A. and Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences*, 8(7): 1020.
- Lucena, J. J. (2000). Effects of bicarbonate, nitrate and other environmental factors on iron deficiency chlorosis. A review. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11-12): 1591-1606.
- Magdaleno-García, G., Juárez-Maldonado, A., Betancourt-Galindo, R., González-Morales, S., Sánchez-Vega, M., Cabrera-De la Fuente, M. and Méndez-López, A. (2023). Aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y cloruro de sodio en chile pimiento. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(NEIII). e3679.

Maksymiec, W. (1997) Effect of copper on cellular processes in higher plants. *Photosynthetica*, 34: 321-342.

MEFCCA [Ministro de Economía Familiar Comunitaria, Cooperativa y Asociativa]. (2024). Cartilla Cultivo de chile. Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional. En línea: <https://www.economiafamiliar.gob.ni/backend/vistas/doc/cartilla/documento748533.pdf> (Consultado el 27 de enero de 2025).

Mydy, L. S., Chigumba, D. N. and Kersten, R. D. (2021). Plant copper metalloenzymes as prospects for new metabolism involving aromatic compounds. *Frontiers in Plant Science*, 12: 692108.

Naderi, M. and Danesh-Shahraki, A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19): 2229-2232.

Nandhini, M., Rajini, S. B., Udayashankar, A. C., Niranjana, S. R., Lund, O. S., Shetty, H. S. and Prakash, H. S. (2019). Biofabricated zinc oxide nanoparticles as an eco-friendly alternative for growth promotion and management of downy mildew of pearl millet. *Crop Protection*, 121: 103-112.

Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z. and Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1190768.

Patel, N., Desai, P., Patel, N., Jha, A. and Gautam, H. K. (2014). Agronanotechnology for plant fungal disease management: a review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 3(10): 71-84.

Pellinen, R. I., Korhonen, M. S., Tauriainen, A. A., Palva, E. T. and Kangasjärvi, J. (2002). Hydrogen peroxide activates cell death and defense gene expression in birch. *Plant Physiology*, 130(2): 549-560.

Peréz-Castañeda, L. M. Castañón-Nájera, G., Ramírez-Meraz, M. y Mayek-Pérez, N. (2015). Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad

- genética de *Capsicum* spp. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(4): 117-128. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000100009.
- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A. and Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants*, 8(6): 151.
- Pérez-Velasco, E. A., Betancourt-Galindo, R., Valdez-Aguilar, L. A., Gonzalez-Fuentes, J. A., Puente-Urbina, B. A., Lozano-Morales, S. A. and Sánchez-Valdés, S. (2020). Effects of the morphology, surface modification and application methods of ZnO-NPs on the growth and biomass of tomato plants. *Molecules*, 25(6): 1282.
- Perry, L. and Flannery, K. V. (2007). Precolumbian use of chili peppers in the Valley of Oaxaca, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(29), 11905-11909.
- Pradhan, S., Patra, P., Mitra, S., Dey, K. K., Basu, S., Chandra, S., ... and Goswami, A. (2015). Copper nanoparticle (CuNP) nanochain arrays with a reduced toxicity response: a biophysical and biochemical outlook on *Vigna radiata*. *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(10): 2606-2617.
- Quartacci, M. F., Pinzino, C., Sgherri, C. L. M., Vecchia, F. D. and Navari-Izzo, F. (2000). Growth in excess copper induces changes in the lipid composition and fluidity of PSII-enriched membranes in wheat. *Physiol. Plant.* 108: 87-93.
- Rajiv, P., Rajeshwari, S. and Venkatesh, R. (2013). Bio-Fabrication of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of *Parthenium hysterophorus* L. and its size-dependent antifungal activity against plant fungal pathogens. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 112: 384-387.
- Ramírez-Novoa, U. I., Cervantes-Ortiz, F., Montes-Hernández, S., Raya-Pérez, J. C., Cibrián-Jaramillo, A. y Andrio-Enriquez, E. (2018). Diversidad morfológica del

chile (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) de Querétaro y Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6): 1159-1170.

Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P. and Orozco-Vidal, J. A. (2021). Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5): 791-803.

Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Adrees, M., Ibrahim, M. and Abbas, F. (2017). Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *Journal of hazardous materials*, 322: 2-16.

Rout, G. R., and Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*, 3: 1-24.

Rudani, K., Vishal, P and Kalavati, P. (2018). The importance of zinc in plant growth- A review. *Int. Res. J. Nat. Appl. Sci*, 5(2): 38-48.

Salusso, F., Plevich, J. O., Delgado, A. R. S., Grosso, L. and Ramos, D. (2015). Calidad de plántulas de lechuga en diferentes volúmenes de celdas y su influencia en el rendimiento. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 23(6), 575-583.

Sarduy-Díaz, M., Díaz-Aguila, I., Castellanos-González, L., Soto-Ortiz, R. and Pérez-Rodríguez, Y. (2016). Sustratos y soluciones nutritivas para la obtención de plántulas de pimiento y su influencia en la producción en cultivos protegido. *Centro Agrícola*, 43(4): 42-48.

SADER, 2024. Cultivemos chile, pero de cuál va a querer ... ¿ del que pica o del que no pica? [en línea]. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivemos-chile-pero-de-cual-va-a-querer-del-que-pica-o-del-que-no-pica?idiom=es>. (Consultado el 12 de febrero de 2025).

SAS. Statistical Analysis Systems. 2017. SAS/STAT User's guide, version 9.4. SAS Institute Inc. North Caroline, USA.

- Shahid, M., Khan, M. S. and Musarrat, J. (2018). Chromosomal aberrations, cell suppression and oxidative stress generation induced by metal oxide nanoparticles in onion (*Allium cepa*) bulb. *Metalomics*, 10(9): 1315– 1327.
- Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J.C. and Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17: 1-21.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Producción de chile serrano. [En línea]. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. (Consultado el 26 de mayo de 2024).
- Siskani, A., Seghatoleslami, M. and Moosavi, G. (2015). Effect of deficit irrigation and nano fertilizers on yield and some morphological traits of cotton. *Biological Forum*, 7(1): 1710-1715.
- Sudo, E., Itouga, M., Yoshida-Hatanaka, K., Ono, Y. and Sakakibara, H. (2008). Gene expression and sensitivity in response to copper stress in rice leaves. *Journal of Experimental Botany*, 59(12): 3465-3474.
- Szallasi, A. (2023). Capsaicin and cancer: Guilty as charged or innocent until proven guilty?. *Temperature*, 10(1): 35-49
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2010). Mineral nutrition. En Plant Physiology. 5a ed. Sinauer. Sunderland, MA, EEUU. pp 74-82.
- Tewari, R. K, Kumar, P. and Sharma PN (2006). Antioxidant responses to enhanced generation of superoxide anion radical and hydrogen peroxide in the copper-stressed mulberry plants. *Planta*, 223: 1145-1153.
- Thompson, H. C. and Kelly, W. C. 1957. Vegetable Crops. Editorial Mc Graw Hill BooK, New York-Toronto-London.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., ... and Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants:

uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant physiology and biochemistry*, 110: 2-12.

Valadez, L. A. (2001). Producción de hortalizas. Solanaceas. 9a Edición. Pp. 186. Limusa. México.

Vidigal, D. S., Dias, D. C. F. S., Dias, L. A. S. and Finger, F. L. (2011). Changes in seed quality during fruit maturation of sweet pepper. *Scientia Agricola*, 68(5): 535-539

Xiong, T., Dumat, C., Dappe, V., Vezin, H., Schreck, E., Shahid, M., ... and Sobanska, S. (2017). Copper oxide nanoparticle foliar uptake, phytotoxicity, and consequences for sustainable urban agriculture. *Environmental Science & Technology*, 51(9): 5242-5251.

Wang, X., Wang, Y., Tian, X., and Ma, G. (2011). Effects of NMUrea on nitrogen runoff losses of surface water and nitrogen fertilizer efficiency in paddy feild. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(1): 106-111.

Wang, X., Xie, H., Wang, P., and Yin, H. (2023). Nanoparticles in plants: uptake, transport and physiological activity in leaf and root. *Materials*, 16(8): 3097.

Yruela, I. (2005). Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17: 145-146.

Zewide, I. and Sherefu, A. (2021). Review paper on effect of micronutrients for crop production. *J. Nutr. Food Process*, 4(7): 1-8.

Zhang, H., Zhang, F., Xia, Y., Wang, G. and Shen, Z. (2010) Excess copper induces production of hydrogen peroxide in the leaf of Elsholtzia haichowensis through apoplastic and symplastic CuZn-superoxide dismutase. *J. Haz. Mat.* 178: 834-843.

Zhao, L., Sun, Y., Hernandez-Viezcas, J. A., Servin, A. D., Hong, J., Niu, G., ... and Gardea-Torresdey, J. L. (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.
- Zhao, S., Liu, Q., Qi, Y. and Duo, L. (2010) Responses of root growth and protective enzymes to copper stress in turfgrass. *Acta Biol. Crac. Ser. Bot.* 52: 7-11.
- Zhao, L. , Sun, Y., Hernandez, V.J., Servin, A.D. Hong, J., Niu, G., Peralta, V.J., Duarte, G.M. y Gardea, T.J. (2014). 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: 11945-11951.
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. A. and Munné-Bosch, S. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: *Advantages and limitations*. *Plant Science*, 289: 110270.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría Interinstitucional en Agricultura Protegida	
Título del trabajo	PRODUCCIÓN DE CHILE SERRANO (<i>Capsicum annuum</i> L. VAR. AQUILES F1) CON APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS BAJO CONDICIONES DE AGRICULTURA PROTEGIDA	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Samuel Valle Pantoja	0671413c@umich.mx
Director	Patricio Apáez Barrios	patricio.apaez@umich.mx
Codirector	-	
Coordinador del programa	Patricio Apáez Barrios	mae.agricultura.protegida@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	no	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante

Nombre y firma	Samuel Valle Pantoja
Lugar y fecha	Apatzingán, Michoacán, México a 18 de Junio de 2025

Samuel Valle Pantoja

PRODUCCIÓN DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum L.* VAR. AQUILES F1) CON APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS ME

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:468254506

75 Páginas

Fecha de entrega

19 jun 2025, 8:06 a.m. GMT-6

17.820 Palabras

Fecha de descarga

19 jun 2025, 8:10 a.m. GMT-6

94.208 Caracteres

Nombre de archivo

PRODUCCIÓN DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum L.* VAR. AQUILES F1) CON APLICACIÓN DEpdf

Tamaño de archivo

1.4 MB

38% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 37% Fuentes de Internet
- 21% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

- Carácteres reemplazados**
82 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
- Texto oculto**
99 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.