

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA



Bioestimulación con Nanopartículas de ZnO y FeO para Mejorar el Crecimiento y la
Calidad del Cultivo de Jitomate (*Solanum lycopersicum*)

Por:

SALVADOR PINEDA CORDOBA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Mayo 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Bioestimulación con Nanopartículas de ZnO y FeO para Mejorar el Crecimiento y la
Calidad del Cultivo de Jitomate (*Solanum lycopersicum*)

Por:

SALVADOR PINEDA CORDOBA

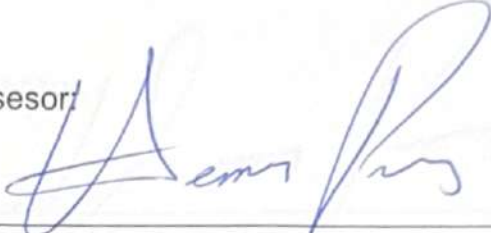
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité Asesor:


DR. ALONSO MENDEZ LOPEZ
Asesor Principal


DR HERMES PEREZ HERNANDEZ
Asesor Principal Externo


DRA ILEANA VERA REYES
Coasesor


DRA. AIDA ISABEL LEAL ROBLES
Coasesor


DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía



Declaración de no plagio

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

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

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

Pasante

Salvador Pineda Córdoba

Firma y nombre

Asesor

Dr. Alonso Méndez López

Firma y nombre

AGRADECIMIENTOS

A ti **SEÑOR DIOS MIO** por darme vida para poder lograr este sueño, por nunca dejarme solo en este viaje, por iluminarme el camino hacia donde hoy en día estoy. Por brindarme

A mi **ALMA TERRA MATER** por darme unos años increíbles de aprendizaje, donde crecí como persona y como profesionalista a futuro, en la cual me formo desde el ámbito académico como el ético para el bien de mi persona.

JOSÉ LÚCIO ALFONSO PINEDA ROJAS †

A ti abuelo por mostrarnos el camino de lo que es el campo, por hacer crecer esta herencia tan bonita que es la agronomía a mi papá y a mí. Gracias por motivarme y ayudarme en vida para poder conseguir este sueño, siempre tu bendición fue la más significativa y la que me impulsaba más. Gracias por tener esta gran familia y por mostrarnos la importancia del amor familiar.

Al **DR. ALONSO MÉNDEZ LÓPEZ**, por la ayuda, paciencia, trabajo y enseñanza que me dio para que yo pudiera realizar este trabajo, enseñarme lo esencial y ayudarme a ser autosuficiente. Por los consejos, manera de trabajar

A la **DRA. JUANA** por su ayuda y enseñanza para las actividades que se realizaron en el laboratorio, por mostrarme con paciencia y paso a paso como ejecutar cada procedimiento.

Al **DR. HERMES PÉREZ HERNÁNDEZ** por su ayuda en la interpretación de los resultados, confiar en mí, y apoyarme en algunos temas que eran incomprensibles.

A MIS PADRES (ALFONSO PINEDA GABRIEL Y CLAUDIA CÓRDOBA MARTÍNEZ)

Gracias a ustedes papás por la crianza, apoyo tanto emocional como económico para poder conseguir algo que cuando ustedes me vieron nacer parecía lejano.

Gracias por nunca dejarme solo y brindarme algo tan preciado que es el estudio, por aguantar y apoyarme durante tantos años de mi vida académica, sé que costó demasiado, pero espero la vida preste muchos años de vida para todos y me deje recompensarlos. Espero nunca decepcionarlos y que estén muy orgullosos de en lo que he logrado y me he convertido.

AMÉRICA PINEDA CÓRDOBA

Gracias, hermana por nunca dejar de estar a mi lado durante 20 años de estudios, por ser parte fundamental de este logro que tú también cumpliste, por también aguantar y ser fuerte durante esta travesía lejana de casa. Gracias por nunca dejarme solo, así como yo procure nunca dejarte solo en todos los aspectos.

LAURA CÓRDOBA MARTÍNEZ Y ELISA SERRANO CÓRDOBA

A ti tía y prima, por emprender este viaje conmigo y estar presentes durante 2 años, ayudarme, cuidar de mí y enseñarme a vivir solo, por todo el cariño que me dieron durante este tiempo. Gracias por creer en mí y nunca rendirse en esta travesía.

ALFONSO PINEDA CÓRDOBA

Gracias, hermano por también ser parte de mi motivación diaria para conseguir esto, por mostrarme también cuando fallaba y ayudarme a corregir.

A MI FAMILIA

A ustedes ya que, al ser de familias numerosas, siempre fue muy cálido el apoyo que recibí de todos, y vi que nunca me soltaron para lograr etapa importante, gracias por siempre estar ahí, tanto desde muy cerca como desde lejos. A mis abuelas Yolanda Martínez Pérez, María Verónica Taide Gabriel Santos, tías, tíos y primos.

AMIGOS

Muchas gracias por estar en estos 5 años a esos amigos que ya son de años como los que fueron saliendo en el camino, aprecio todos los momentos vividos durante nuestro rato en la narro. (Naomi, Gerardo, Emilio, Sampayo, Romo, César, Yohan, Valencia).

COMPAÑEROS

Para todos esos compañeros y compañeros que estuvieron ahí y pudieron ayudarme en cualquier situación escolar, aunque haya sido desde un día o hasta en toda la carrera.

A LOS MAESTROS

A todos esos maestros que llegaban a dar clases con muchas ganas y que me compartieron de su conocimiento que han adquirido por años, por su enseñanza y paciencia que tuvieron hacía mí.

DEDICATORIAS

JOSÉ LÚCIO ALFONSO PINEDA ROJAS †

Esta tesis va dedicada para ti principalmente abuelo, fuiste la persona más indispensable para hacerme querer llegar a ser un “chingón” como dirías tu. Me hubiera gustado que estuvieras presente, pero sé que Dios tenía otros planes para ti, aun sé que sigues ahí apoyándome con todo. TE QUIERO Y EXTRAÑO ABUELO.

JOSÉ ENRIQUE CÓRDOBA MARTÍNEZ †

A ti tío, que a pesar de muchos años de tu partida aún te tengo muy presente en este logro por ser uno de las primeras personas que me motivaron para conseguir lo que yo quiera. FUERTE ABRAZO TÍO

A MIS PADRES (ALFONSO PINEDA GABRIEL Y CLAUDIA CÓRDOBA MARTÍNEZ)

Este reconocimiento va igual para ustedes papás por qué me han enseñado desde muy niño que cuando pierde uno, perdemos todos, aunque también cuando uno gana, triunfa, u obtiene un reconocimiento el logro es de todos y por esta tesis es un momento especial también para ustedes. LOS AMO DEMASIADO PAPÁS.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS.....	4
DEDICATORIAS.....	7
I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.2. HIPÓTESIS.....	15
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
2.1. GENERALIDADES DEL CULTIVO DEL TOMATE.....	16
2.2. BOTÁNICA Y MORFOLOGÍA DEL TOMATE.....	17
2.2.1. TALLOS.....	18
2.2.2. HOJAS.....	18
2.2.3. FLORES.....	18
2.2.4. FRUTOS.....	18
2.2.5. RAÍCES.....	18
2.3. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	19
2.4. VALOR NUTRICIONAL DEL TOMATE	19
2.5. IMPORTANCIA INTERNACIONAL DEL TOMATE	20
2.6. IMPORTANCIA NACIONAL DEL TOMATE	21
2.7. AGRICULTURA SOSTENIBLE Y EFICIENCIA EN EL USO DE NUTRIENTES	21
2.8. NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA AGRICULTURA	22
2.9. INTERACCIÓN DE NANOPARTÍCULAS CON PLANTAS	23
2.10. MODO DE ABSORCIÓN Y TRASLOCACIÓN DE LA NANOPARTÍCULAS.....	24
2.11. NANOFERTILIZANTES-NANOESTIMULANTES	25
2.12. ZINC (ZN)	25
2.13. NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC (NPs-ZNO)	26
2.14. HIERRO (FE)	27
2.15. NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO (NPs-FeO)	27
2.16. SOLUCIÓN NUTRITIVA UNIVERSAL STEINER	28
2.17. APLICACIÓN VÍA FOLIAR	28

2.18.	APLICACIÓN VÍA DRENCH.....	28
-------	----------------------------	----

III. MATERIALES Y MÉTODOS29

3.1.	LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO.....	29
3.2.	CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES A UTILIZAR	29
3.2.2.	PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE NANOPARTÍCULAS	29
3.2.3.	DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS	30
3.2.4.	DÍAS DE APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS	31
3.2.5.	PARÁMETROS QUE EVALUAR.....	32
3.2.6.	PROCEDIMIENTOS DE TOMA DE DATOS	32
3.2.7.	MANEJO NUTRICIONAL.....	36
3.2.8.	MANEJO FITOSANITARIO	37
3.2.9.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	37

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN38

4.1.	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS Y DE RENDIMIENTO	38
4.1.1.	ALTURA DE PLANTA	38
4.1.2.	PESO FRESCO DE LA PLANTA	38
4.1.3.	PESO FRESCO DE LA RAÍZ	39
4.1.4.	PESO SECO DE LA PLANTA	40
4.1.5.	PESO SECO DE LA RAÍZ.....	41
4.1.6.	DIÁMETRO DEL TALLO.....	41
4.1.7.	PESO DEL FRUTO	42
4.1.8.	DIÁMETRO POLAR Y ECUATORIAL	43
4.1.9.	NÚMERO DE FRUTOS TOTALES.....	44
4.2.	ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL FRUTO DE TOMATE	45
4.2.1.	ACIDEZ TITULABLE	45
4.2.2.	POTENCIAL ÓXIDO-REDUCCIÓN (ORP).....	46
4.2.3.	GRADOS BRIX (°BRIX).....	46
4.2.4.	POTENCIAL HIDRÓGENO (PH)	47
4.2.5.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)	47
4.2.6.	FIRMEZA.....	47
4.2.7.	VITAMINA C.....	48

V. CONCLUSIONES50

VI. BIBLIOGRAFÍA.....51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamiento y tipo de aplicación	31
Tabla 2. Solución Steiner	36
Tabla 3. Efecto de las NPs de Fe y Zn en el crecimiento, el rendimiento del tomate cv. El Cid F1.....	45
Tabla 4. Efecto de las NPs de Fe y Zn en la calidad del tomate cv. El Cid F1	49

RESUMEN

La agricultura moderna requiere inversiones significativas, lo que hace indispensable la implementación eficiente de insumos agrícolas que permitan maximizar la productividad y calidad de los cultivos. En este contexto, los bioestimulantes basados en nanopartículas metálicas representan una alternativa innovadora para favorecer el desarrollo vegetativo, incrementar el rendimiento y mejorar los atributos de calidad de los frutos. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes vías de aplicación –foliar y drench– de nanopartículas de óxido de zinc (NPZnO) y óxido de hierro (NP Fe₂O₃), aplicadas de manera individual y combinada, sobre variables de crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad del cultivo de tomate. Se aplicaron soluciones individuales de 200 ppm de cada nanopartícula (NPZnO y NP Fe₂O₃) y combinadas (200 ppm NPZnO + 200 ppm NPFe₂O₃), además un testigo; estos tratamientos se repitieron en las dos vías de aplicación (foliar y drench). Las variables evaluadas incluyeron biomasa fresca y seca, diámetro del tallo, diámetro polar y ecuatorial del fruto, peso promedio de fruto y número de frutos. Asimismo, se analizaron variables de calidad como pH, CE, ORP, vitamina C, acidez titulable, firmeza y sólidos solubles totales (°Brix). Los resultados mostraron que las dos nanopartículas aplicadas vía drench presentó los efectos más favorables sobre el crecimiento vegetativo y el rendimiento, registrando una biomasa fresca de 1785 g, biomasa seca de 240 g y un promedio de 42.83 frutos por planta. En relación a la calidad, el tratamiento con nanopartículas de FeO vía drench presentó los mejores resultados, destacando por sus elevados valores de sólidos solubles totales, mayor firmeza del fruto, así como altos contenidos de vitamina C (11.29) y acidez titulable (0.038%). En conclusión, la aplicación de nanopartículas metálicas mostró efectos positivos y específicos sobre variables fisiológicas, productivas y de calidad del cultivo, evidenciando su potencial como estrategia biotecnológica para optimizar la producción agrícola y enfrentar las limitaciones asociadas con la agricultura moderna.

Palabras claves: Nanopartículas, Óxido de zinc, Óxido de hierro, Bioestimulantes, Jitomate.

ABSTRACT

Modern agriculture requires significant investments, making the efficient implementation of agricultural inputs essential to maximize crop productivity and quality. In this context, biostimulants based on metallic nanoparticles represent an innovative alternative to promote vegetative development, increase yield, and improve fruit quality attributes. This study aimed to evaluate the effect of different application routes—foliar and drench—of zinc oxide (ZnO) and iron oxide (Fe_2O_3) nanoparticles, applied individually and in combination, on vegetative growth, yield, and quality variables in tomato crops. Individual solutions of 200 ppm of each nanoparticle (ZnO and Fe_2O_3) and combined solutions (200 ppm ZnO + 200 ppm Fe_2O_3) were applied, along with a control. These treatments were repeated for both application routes (foliar and drench). The variables evaluated included fresh and dry biomass, stem diameter, polar and equatorial fruit diameter, average fruit weight, and number of fruits. Quality variables such as pH, EC, ORP, vitamin C, titratable acidity, firmness, and total soluble solids ($^{\circ}\text{Brix}$) were also analyzed. The results showed that the two nanoparticles applied via drench had the most favorable effects on vegetative growth and yield, registering a fresh biomass of 1785 g, a dry biomass of 240 g, and an average of 42.83 fruits per plant. Regarding quality, the Fe_2O_3 nanoparticle treatment via drench showed the best results, standing out for its high total soluble solids values, greater fruit firmness, as well as high vitamin C (11.29%) and titratable acidity (0.038%) content. In conclusion, the application of metallic nanoparticles showed positive and specific effects on physiological, productive, and quality variables of the crop, demonstrating its potential as a biotechnological strategy to optimize agricultural production and address the limitations associated with modern agriculture.

Keywords: Nanoparticles, Zinc oxide, Iron oxide, Biostimulants, Tomato.

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial debido a su amplia distribución, alto consumo y relevancia económica. Actualmente se producen cerca de 200 millones de toneladas anuales en todo el mundo, lo que lo posiciona como uno de los vegetales más cultivados y comercializados a escala global. Su importancia radica no solo en su elevado volumen de producción, sino también en su contribución a la seguridad alimentaria y a la economía agrícola de numerosos países (FAO, 2023; Klee and Tieman, 2024).

En México, el tomate representa una de las hortalizas de mayor relevancia económica dentro del sector agrícola. El país se encuentra entre los principales productores y exportadores mundiales, particularmente hacia el mercado de Estados Unidos. La producción nacional genera importantes ingresos económicos, fomenta el desarrollo regional y constituye una fuente significativa de empleo en zonas rurales dedicadas a la horticultura intensiva (SIAP, 2023; FAO, 2023).

Desde el punto de vista nutricional, el tomate es considerado un alimento funcional debido a su contenido de vitaminas, minerales y compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes. Este fruto es una fuente importante de vitamina C, vitamina A, potasio, fibra dietética y carotenoides, especialmente licopeno, compuesto asociado con la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer. Además, el consumo frecuente de tomate contribuye a mejorar la ingesta de antioxidantes naturales y compuestos nutracéuticos esenciales para la salud humana (Palmitessa et al., 2021; Hanson, 2017).

Sin embargo, el incremento de la población mundial y la creciente demanda de alimentos han generado la necesidad de desarrollar estrategias innovadoras que permitan aumentar la productividad agrícola de manera sostenible. En este contexto, la nanotecnología ha emergido como una herramienta prometedora para la agricultura moderna. Esta disciplina se basa en el uso de materiales a escala nanométrica que poseen propiedades fisicoquímicas particulares, como mayor área

superficial y reactividad, lo que permite mejorar la eficiencia en la liberación y absorción de nutrientes por las plantas (Nair et al., 2010; Kah et al., 2018).

En el ámbito agrícola, los nanomateriales han sido estudiados por su potencial para actuar como nano-fertilizantes, nano-bioestimulantes y sistemas de liberación controlada de nutrientes. Diversos estudios han demostrado que las nanopartículas pueden influir positivamente en procesos fisiológicos de las plantas, tales como la germinación de semillas, el crecimiento vegetativo, la actividad fotosintética, la absorción de nutrientes y la tolerancia a diferentes tipos de estrés ambiental (Rico et al., 2011; Dimkpa and Bindraban, 2016). Se ha demostrado que la aplicación de nanopartículas puede mejorar el crecimiento de las plantas, incrementar la biomasa, favorecer el rendimiento y modificar características de calidad del fruto, incluyendo el contenido de antioxidantes y carotenoides (Rico et al., 2011; Khan et al., 2022). En algunos casos, la aplicación de nano-ZnO ha mostrado efectos en parámetros de calidad del fruto como el contenido de licopeno y β -caroteno (Kowalska et al., 2024).

Entre los nanomateriales más estudiados en agricultura destacan las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y óxidos de hierro (Fe_2O_3 o Fe_3O_4), debido a que el zinc y el hierro son micronutrientes esenciales para el metabolismo vegetal. El zinc participa en la activación enzimática, la síntesis de proteínas y la regulación del crecimiento vegetal, mientras que el hierro es fundamental para procesos como la fotosíntesis, la respiración celular y la síntesis de clorofila. La aplicación de estos elementos en forma de nanopartículas puede mejorar su biodisponibilidad y eficiencia de absorción por las plantas (Dimkpa and Bindraban, 2016; Raliya et al., 2018).

Desde la perspectiva de la agricultura sustentable, el uso de nanopartículas representa una alternativa tecnológica innovadora para optimizar el uso de fertilizantes, reducir pérdidas de nutrientes y disminuir el impacto ambiental asociado a la fertilización convencional. La implementación de nano-fertilizantes y nano-bioestimulantes puede contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes, resilientes y ambientalmente responsables, lo cual es fundamental para

enfrentar los desafíos de la producción de alimentos en el siglo XXI (Kah et al., 2018; Dimkpa and Bindraban, 2016).

Por lo anterior, resulta fundamental evaluar el potencial bioestimulante de las nanopartículas en cultivos de importancia económica como el tomate. En particular, el estudio de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y óxido de hierro (FeO/Fe₂O₃) puede contribuir al desarrollo de estrategias innovadoras para mejorar el crecimiento vegetal y la calidad de los frutos bajo un enfoque de producción agrícola sustentable.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

1. Analizar el efecto bioestimulante de nanopartículas de ZnO y FeO₃ sobre el crecimiento y la calidad del cultivo de jitomate (*Solanum Lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Evaluar el efecto de la aplicación foliar y drench de nanopartículas de ZnO y FeO₃ sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero.
2. Evaluar el efecto de la aplicación foliar y drench de nanopartículas de ZnO y FeO₃ sobre la calidad de frutos jitomate desarrollados bajo condiciones de invernadero.

1.2. Hipótesis

La aplicación de nanopartículas de FeO y ZnO, simples o combinadas por vía drench o foliar mejora el crecimiento de la planta, el rendimiento y la calidad de los frutos de tomate.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del cultivo del tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta herbácea perteneciente a la familia Solanaceae, la cual incluye otras especies de importancia agrícola como la papa (*Solanum tuberosum*), el chile (*Capsicum* spp.) y la berenjena (*Solanum melongena*). El origen del tomate se ubica en la región andina de América del Sur, particularmente en áreas que actualmente corresponden a Perú, Ecuador y el norte de Chile. Posteriormente, el cultivo fue domesticado en Mesoamérica, especialmente en México, desde donde se difundió hacia Europa durante el siglo XVI tras la llegada de los españoles al continente americano (Peralta and Spooner, 2007; Razifard et al., 2020).

Botánicamente, el tomate es una planta dicotiledónea de crecimiento anual o semiperenne que presenta un sistema radical pivotante con abundantes raíces secundarias. El tallo es generalmente herbáceo, de crecimiento indeterminado o determinado dependiendo del genotipo, y puede alcanzar alturas superiores a los 2 metros en sistemas de producción bajo invernadero. Las hojas son compuestas, alternas y pubescentes, mientras que las flores se agrupan en inflorescencias tipo racimo y presentan color amarillo característico (Marschner, 2012; Heuvelink, 2018).

El fruto del tomate es una baya carnosa de forma, tamaño y color variables dependiendo de la variedad cultivada. Existen diferentes tipos comerciales de tomate, entre los que destacan saladette (Roma), bola, cherry, grape y heirloom, cada uno con características particulares de tamaño, sabor y uso culinario. Estas variedades han sido desarrolladas mediante programas de mejoramiento genético orientados a incrementar el rendimiento, la calidad del fruto y la resistencia a enfermedades (Klee and Tieman, 2024).

Desde el punto de vista agronómico, el tomate es un cultivo que se adapta a una amplia gama de condiciones climáticas; sin embargo, su desarrollo óptimo ocurre en climas templados a cálidos, con temperaturas entre 18 y 27 °C. Temperaturas inferiores a 12 °C o superiores a 35 °C pueden afectar negativamente

la floración, el cuajado de frutos y el crecimiento de la planta. Además, el cultivo requiere suelos bien drenados, con buena disponibilidad de nutrientes y un pH ligeramente ácido a neutro (5.5–7.0) (Heuvelink, 2018).

El sistema de producción del tomate puede variar desde cultivos a campo abierto hasta sistemas intensivos de agricultura protegida, como invernaderos o casas sombra. En las últimas décadas, el uso de agricultura protegida ha aumentado considerablemente debido a su capacidad para mejorar el control de factores ambientales, reducir la incidencia de plagas y enfermedades y aumentar la productividad del cultivo. En algunos sistemas intensivos de invernadero, los rendimientos pueden superar las 300 toneladas por hectárea, muy por encima de los rendimientos obtenidos en campo abierto (FAO, 2023; SIAP, 2023).

Además de su importancia económica, el tomate es considerado un cultivo modelo en investigaciones científicas, debido a que posee un genoma relativamente bien caracterizado y a que existen numerosas herramientas biotecnológicas disponibles para su estudio. Esto ha permitido desarrollar investigaciones relacionadas con fisiología vegetal, genética, nutrición mineral y respuesta a diferentes tipos de estrés biótico y abiótico (Klee and Tieman, 2024).

En la actualidad, el cultivo de tomate enfrenta diversos desafíos asociados al cambio climático, la degradación del suelo, la disponibilidad de agua y la necesidad de incrementar la productividad agrícola de manera sostenible. En este contexto, el desarrollo de tecnologías innovadoras, como el uso de nanomateriales en la nutrición vegetal, representa una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia de los sistemas de producción agrícola (Dimkpa and Bindraban, 2016).

2.2. Botánica y morfología del tomate

El tomate pertenece a la familia Solanaceae. Es una planta dicotiledónea (Cestoni et al., 2006). Es herbácea perenne, que se cultiva en forma anual para el consumo de sus frutos (Semillaria, 2015). Su crecimiento se puede dejar al punto

de ser una planta rastrera, semierecta o erecta, todo eso dependiendo de la variedad que se llegue a usar.

2.2.1. Tallos.

El tallo es de 2-4 cm de grosor en la base, sobre el que se forman hojas, tallos secundarios en forma de ramificación simpodial. La estructura es desde fuera hacia dentro, que empieza con la epidermis donde están los pelos glandulares, después va la corteza, de ahí va el cilindro vascular y al último va el tejido medular. En la parte superior se localiza lo que es el meristemo apical, en el cual inician los nuevos primordios foliares y florales. (Jean-Marie Polese., 2005).

2.2.2. Hojas.

Las hojas del tomate son compuestas, que tiene entre 7 y 9 folíolos peciolados, lobulados, éstas tiene un borde dentado, alterno y opuesto. De igual forma que el tallo se encuentra cubierta de pelos glandulares. (Díaz Romero, 2018).

2.2.3. Flores.

Son flores pequeñas que están conformadas en una pata de gallo que alberga entre 3 a 8 flores, las cuales son de color amarillo, con una forma de estrella, el ovario de la tomatera es súpero, lo que significa que está encima del cáliz, que esta misma contiene dos carpelos. (Jean-Marie Polese., 2005).

2.2.4. Frutos.

Es una baya, por lo que se entiende que es un fruto el cual envuelve o encierra sus semillas. Las semillas están cubiertas por una capa conocida como mucílago que es el resultado de una gelificación de la membrana. De color rojo, con forma esférica, pueden tener distintas formas, tamaños y colores. (Jean-Marie Polese., 2005).

2.2.5. Raíces.

La raíz del jitomate está conformada por una raíz principal que corta y sensible, está mismo contiene numerosas raíces secundarias adventicias. La epidermis cuenta con pelos absorbentes que son los encargados de recibir agua y nutrientes. (Jean-Marie Polese., 2005).

2.3. Clasificación Taxonómica

A continuación, se describe la clasificación taxonómica del tomate de acuerdo con USDA, 2012.

Reino	Plantae
Subreino	Trachobiota
Subdivision	Spermatophyta
Division	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteride
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	Solanum
Especie	lycopersicum L.

2.4. Valor nutricional del tomate

El tomate es ampliamente reconocido por su elevado valor nutricional y su contribución a una alimentación saludable. Un tomate crudo representa un aporte al cuerpo de nutrientes y antioxidantes que refuerza el sistema inmunitario (FAO, 2022). Este fruto contiene una gran variedad de nutrientes esenciales, entre los que destacan vitamina C, vitamina A, potasio, ácido fólico y fibra dietética, los cuales desempeñan funciones importantes en el metabolismo humano (Palmitessa et al., 2021).

Dentro de los minerales que contiene, los principales en aportar beneficios son el potasio, magnesio y fósforo. Uno de los compuestos más importantes presentes en el tomate es el licopeno, un carotenoide responsable del color rojo característico del fruto y considerado uno de los antioxidantes naturales más potentes. Diversas investigaciones han demostrado que el consumo regular de alimentos ricos en licopeno puede contribuir a reducir el riesgo de enfermedades

cardiovasculares, ciertos tipos de cáncer y procesos inflamatorios (Rao and Rao, 2007).

Además del licopeno, el tomate contiene otros compuestos bioactivos como β -caroteno, luteína, flavonoides y compuestos fenólicos, los cuales poseen propiedades antioxidantes que ayudan a neutralizar radicales libres y prevenir el daño celular. Debido a estas características, el tomate es considerado un alimento funcional con beneficios adicionales para la salud humana (Willcox et al., 2003).

2.5. Importancia internacional del tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas más importantes en la agricultura mundial debido a su elevada producción, amplia distribución geográfica y alto consumo en la dieta humana. De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción mundial de tomate alcanzó aproximadamente 192 millones de toneladas en 2023, cultivadas en cerca de 5.4 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 35.5 t ha⁻¹ (FAO, 2023). Estas cifras posicionan al tomate como uno de los vegetales más producidos en el mundo.

Esta hortaliza ha tenido un crecimiento del 22%, con principales países productores como China, China continental, India, Estados Unidos y Turquía, entre estos países concentraban el 64% de producción mundial, entre 2003 de a 2017 con una producción aproximada de casi 145,000,000 millones toneladas a 245,000,000 millones de toneladas. (FAOSTAT, 2020).

En términos de distribución geográfica, la producción mundial de tomate se concentra principalmente en Asia, que aporta más del 50 % del volumen global, seguida por América, Europa y África. Entre los principales países productores destacan China, India, Turquía, Estados Unidos y Egipto, los cuales concentran una proporción significativa de la producción mundial (FAO, 2023). China lidera ampliamente la producción con más de 60 millones de toneladas anuales, lo que representa aproximadamente un tercio de la producción mundial.

2.6. Importancia nacional del tomate

En México, el tomate es una de las hortalizas de mayor importancia económica dentro del sector agrícola. El país se ubica entre los principales productores y exportadores de tomate a nivel mundial, con una producción superior a 4.4 millones de toneladas anuales, lo que lo coloca entre los diez mayores productores del mundo (FAO, 2023).

Desde hace aproximadamente una década, los principales productores de México han sido Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Baja California, Jalisco y Zacatecas, con una suma promedio de producción total de estos estados de 1,884,275 toneladas, en la que Sinaloa ha mantenido el 20.2% de la población nacional (Bustamante, 2022), donde las condiciones climáticas y la disponibilidad de tecnología agrícola permiten obtener altos rendimientos. Además, el desarrollo de la agricultura protegida mediante el uso de invernaderos y mallas sombra ha contribuido significativamente al incremento de la productividad del cultivo en el país (SIAP, 2023).

Además de su importancia productiva, el tomate representa uno de los principales productos hortícolas de exportación para México. En 2023, el país exportó alrededor de 2.01 millones de toneladas de tomate, con un valor superior a 3 mil millones de dólares, lo que lo convierte en el principal exportador mundial de tomate fresco (FAO, 2023). El principal destino de estas exportaciones es Estados Unidos, mercado que absorbe más del 90 % del tomate mexicano.

2.7. Agricultura sostenible y eficiencia en el uso de nutrientes

El incremento de la población mundial ha generado una creciente demanda de alimentos, lo que plantea importantes desafíos para la producción agrícola. Se estima que la población global podría alcanzar los 9 mil millones de habitantes para el año 2050, lo que requerirá aumentar significativamente la producción de alimentos sin comprometer los recursos naturales (Tilman et al., 2011).

Uno de los principales problemas de la agricultura moderna es la baja eficiencia en el uso de fertilizantes. Se estima que entre el 50 % y el 70 % de los fertilizantes aplicados al suelo no son aprovechados por las plantas, lo que provoca pérdidas económicas para los agricultores y contaminación ambiental debido a procesos como lixiviación, escorrentía y volatilización (Dimkpa and Bindraban, 2016).

En este contexto, la agricultura sostenible busca desarrollar tecnologías innovadoras que permitan mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y reducir el impacto ambiental de la producción agrícola. Entre estas tecnologías emergentes destaca la nanotecnología, la cual ha demostrado un gran potencial para mejorar la eficiencia de los insumos agrícolas y aumentar la productividad de los cultivos (Kah et al., 2018).

2.8. Nanotecnología aplicada a la agricultura

La nanotecnología es ciencia, ingeniería, y tecnología de materiales a nano escala, los cuales presentan dimensiones entre 1 a 100 nanómetros, que estudia su aplicación en todas las ramas de la ciencia. Estos materiales presentan propiedades físicas y químicas diferentes a las observadas en materiales convencionales. Sus propiedades incluyen una mayor área superficial, mayor reactividad química y una mayor capacidad de interacción con sistemas biológicos (Nair et al., 2010).

La nanotecnología puede ser definida como la ciencia e ingeniería involucrada en el diseño, síntesis, caracterización, y aplicación de materiales y dispositivos cuya organización funcional más pequeña, en al menos una dimensión, en la escala de nanómetro (Aesthet Surg, 2010).

En el sector agrícola, la nanotecnología ha abierto nuevas oportunidades para el desarrollo de nano-fertilizantes, nano-pesticidas, nano-sensores y sistemas de liberación controlada de nutrientes, los cuales pueden contribuir a mejorar la

eficiencia en el uso de insumos agrícolas y reducir los impactos ambientales asociados con la agricultura intensiva (Kah et al., 2018).

Los nano-fertilizantes se caracterizan por liberar nutrientes de manera gradual y controlada, lo que permite aumentar la eficiencia de absorción por parte de las plantas y disminuir las pérdidas de nutrientes en el suelo. Además, las nanopartículas pueden penetrar más fácilmente en los tejidos vegetales debido a su pequeño tamaño y alta reactividad superficial (Raliya et al., 2018).

Es importante mencionar que las nanopartículas pueden provocar toxicidad a las plantas, la cual depende del método usado en su producción. Algunos estudios han mostrado que mientras más ecológicas sean, su toxicidad será menor para las plantas en general (Kaningini Amani, 2022).

La nanotecnología tiene el potencial para impulsar la agricultura en términos de nanofertilizantes, como también otros tipos de nanomateriales que pueden usarse en la agricultura. (Liu and Lal, 2015; Mahakham et al., 2016; Rizwan et al., 2017).

2.9. Interacción de nanopartículas con plantas

Las nanopartículas pueden ingresar a las plantas a través de diferentes vías, incluyendo la absorción radicular y la penetración foliar. Una vez dentro del organismo vegetal, estas partículas pueden ser transportadas a diferentes órganos de la planta a través del sistema vascular, principalmente mediante el xilema y el floema (Rico et al., 2011).

La interacción entre nanopartículas y plantas puede generar diversos efectos fisiológicos, como el incremento en la tasa de germinación, la estimulación del crecimiento radicular, el aumento de la actividad fotosintética y la mejora en la absorción de nutrientes. Sin embargo, estos efectos dependen de factores como la concentración de nanopartículas, su tamaño, su composición química y la especie vegetal estudiada (Ma et al., 2010).

Las nanopartículas pueden ayudar a eliminar especies reactivas de oxígeno (ROS) producido bajo varias situaciones de estrés en plants, incluyendo tanto estreses abióticos como bióticos. (Ahmad et al., 2024).

Diversos estudios han demostrado que, cuando se aplican en concentraciones adecuadas, las nanopartículas pueden actuar como bioestimulantes, promoviendo el crecimiento vegetal y mejorando la productividad de los cultivos (Dimkpa and Bindraban, 2016).

2.10. Modo de Absorción y Traslocación de la nanopartículas

Las nanopartículas pueden actuar/interactuar con las plantas mediante 3 rutas principales consecuentes. Una es por el asentamiento de ellas en la superficie de la planta, (hojas, raíces o tallos). El segundo paso es a través de la penetración de la cutícula y la epidermis. Por último el transporte y transformación dentro de los tejidos de la plantas, que transportan de manera eficiente por las demás partes de la planta a través del sistema vascular. (Ahmad et al., 2024).

(Zaman, W., Ayaz, A., & Park, S. 2025) Describen estas formas en que los nanomateriales se desenvuelven, y es entrando principalmente por captación de raíces o aplicaciones foliares. La captación de NP en raíces ocurre mediante la vía apoplástica y simplástica. En la vía apoplástica los nanomateriales se mueven a través de espacios que hay en la pared celular, mientras que en la vía entran por citoplasma y viajan a través de plasmodesmos. Una vez dentro de los tejidos de la raíz, los nanomateriales alcanzan el sistema vascular y son transportados hacia arriba a en el canal del xilema a las partes aéreas de la planta como las hojas y las flores. El trayecto que lleva a cabo mediante la aplicación foliar, involucra a los nanomateriales penetrando la cutícula y el estoma de la hoja, al superar las barreras que están relacionadas con el suelo y entran al floema para la distribución a los tejidos que no son fotosintéticos como lo son los frutos y las raíces.

2.11. Nanofertilizantes-Nanoestimulantes

Los nanofertilizantes podrían ser la opción ideal para mejorar la eficiencia de la nutrición y superando el problema persistente de la eutrofización. Los nanofertilizantes están destinados a controlar el suministro de nutrientes de acuerdo con las necesidades de los cultivos y también se afirma que los nanofertilizantes son más eficientes que los fertilizantes tradicionales. (Liu et al., 2006; Prasad et al., 2014).

De igual manera, se deben de estudiar los efectos que causan las nanopartículas en las plantas y el ecosistema del suelo. Por lo tanto el comportamiento fitotóxico de las nanopartículas debe abordarse científicamente antes de utilizarlos para las prácticas agrícolas. (Oancea et al. 2009).

Los nanofertilizantes son nanomateriales responsables de proveer uno o más tipos de nutrientes para que la planta pueda ayudar en su etapa de crecimiento y de producción. (Kaningini Amani, 2022).

El uso de nanopartículas que derivadas de metales, demuestran que generan incrementos en la germinación, crecimiento de la planta, resistencia a diferentes tipos de estrés y al aumento de absorción de nutrientes. (Reyna Roxana Guillén, 2022)

2.12. Zinc (Zn)

El zinc es cofactor de varias enzimas, está involucrada en la regulación de auxinas, el metabolismo de proteínas y la biosíntesis de carbohidratos. El zinc juega un rol muy significativo para la resistencia ante alguna enfermedad, fotosíntesis, integración de la membrana celular, síntesis de proteínas, formación de polen, mejora el nivel de enzimas antioxidantes y clorofila dentro de los tejidos vegetales. (Azhar Hussain, 2015).

El zinc es uno de los micronutrientes esenciales requeridos para el crecimiento óptimo de la planta, juega un rol vital en el metabolismo, se requiere en críticas y pequeñas concentraciones para el funcionamiento de varias funciones

fisiológicas de la planta, como la fotosíntesis y la formación de azúcares, fertilidad y producción de semillas, regulación de crecimiento y resistencia a enfermedades. (Rudani Komal, 2018). La deficiencia de zinc puede provocar una reducción significativa en el crecimiento de las plantas y en el rendimiento de los cultivos (Alloway, 2008).

2.13. Nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO)

Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) han sido ampliamente estudiadas como una alternativa para mejorar la disponibilidad de este micronutriente en los sistemas agrícolas. Debido a su tamaño nanométrico, estas partículas pueden ser absorbidas con mayor facilidad por las plantas y mejorar la eficiencia del uso del zinc (Raliya et al., 2018).

Diversos estudios han reportado que la aplicación de nanopartículas de ZnO puede aumentar la producción de biomasa, mejorar la actividad fotosintética y estimular el crecimiento radicular en diferentes cultivos, incluyendo el tomate (Dimkpa et al., 2012). Las nanopartículas de ZnO muestran efectos positivos ante la reacción de las fitohormonas, principalmente en el ácido indolacético (AIA), el cual promueve la división celular por lo que de igual manera acelera la elongación y el crecimiento de las plantas (Zhao et al., 2014).

Estudios muestran, que la aplicación de nanopartículas metálicas como zinc y platas apoyan a procesos como el de la germinación de la semilla y el crecimiento de plantas (Méndez-Arguello, 2016). Aplicaciones foliares de nanopartículas de óxido de zinc, incrementan desde el número de frutos por planta, como la calidad para su venta y el contenido nutracéutico, aumento de biomasa aérea, acumulación de minerales esenciales para potenciar la nutrición humana (Fortis-Hernández, 2024).

2.14. Hierro (Fe)

El hierro es un micronutriente involucrado en la síntesis de la clorofila, ADN, estructura de los cloroplastos, la respiración y varias rutas metabólicas.

El hierro es un micronutriente esencial para el crecimiento para el crecimiento de la planta, también aporta en la regulación de varios procesos celulares, es un co-factor de enzimas, ayuda a la regulación de fotosíntesis de la plnats, respiración mitocondrial, síntesisi y reparación de nucleotidos. (Xinxin Zhang, 2019).

Existe un vinculo positivo entre el N y el Fe, en relación una buena aplicación de nitrógeno, sumado a una aspersión foliar de hierro, aumentan de manera significativa la absorción de los elementos N, P y Fe en los tejidos vegetales. (Preciado, et al., 2022).

2.15. Nanopartículas de óxido de hierro (NPs-FeO)

El hierro es otro micronutriente esencial para el metabolismo vegetal, ya que participa en procesos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración celular y la síntesis de clorofila. La deficiencia de hierro puede provocar clorosis férrica, una condición que afecta negativamente la productividad de los cultivos (Marschner, 2012).

Las nanopartículas de óxidos de hierro (Fe_2O_3 y Fe_3O_4) han sido estudiadas por su potencial para mejorar la disponibilidad de hierro en las plantas. Estas nanopartículas pueden facilitar la absorción del nutriente y mejorar la eficiencia del metabolismo fotosintético (Rico et al., 2011).

Además, se ha observado que las nanopartículas de hierro pueden estimular el crecimiento vegetal, mejorar la producción de clorofila y aumentar el rendimiento en diferentes especies agrícolas (Dimkpa & Bindraban, 2016). Las nanopartículas de Fe_3O_4 y $\text{FeO}(\text{OH})$ tienen el potencial para usarse en la agricultura como nanofertilizantes para aumentar el valor nutricional del hierro de los cultivos (Shakoor et al, 2002).

Las nanopartículas de Fe usadas en concentraciones bajas, aumentaron de manera significativa los niveles y contenido de clorofila en cultivos como la soya. (Espino Reyes, J. D., & Valdez Aguilar, L. A. 2023).

2.16. Solución nutritiva universal Steiner

Esta es una solución nutritiva en la cual se encuentran los nutrientes disueltos esenciales, para un crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas. La solución pudiese referirse como un fertilizante, el cuál se compone de los macronutrientes más importantes como lo es el: Nitrogeno (N), Fósforo, Potasio (K) y en también micronutrientes como: Cloro (Cl), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S), Boro (B), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn) y Molibdeno (Mo). (AGRICULTURA, 2022).

2.17. Aplicación vía foliar

Respecto a la interacción entre las nanopartículas y las células de las hojas, se sugiere que las nanopartículas pueden interactuar directamente con la mayoría de las células a través de los estomas o las vías cuticulares (Honghong Wu, 2022).

Además de los tamaños de los poros, la adhesión es un problema ya que debido a nanopartículas más grande, es más problema que sean lavadas a diferencias de unas más pequeñas. (Avellan et al., 2019; Kah et al., 2019).

2.18. Aplicación vía drench

Cuando se aplica vía drench, estudios sugieren que estas nanopartículas en el suelo, pueden estimular la microbioma, activando la respiración celular e interactuando con partículas, las cuáles promueven favorablemente el pH y el entorno del potencial redox, mejorando la disponibilidad y absorción de nutrientes el hierro. (Sanchez et al., 2025).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del experimento

El presente trabajo se realizó en un invernadero tipo túnel con ventilación cenital localizado en el Área de Agricultura del Departamento de Botánica, dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicado en las coordenadas 25° 23'36" N y 101°00'02" O a una altitud de 1,783 msnm en el municipio de Saltillo, Coahuila. El desarrollo experimental se llevo a cabo durante los meses de agosto a diciembre del 2024.

3.2. Características de materiales a utilizar

3.2.1. Material Genético (Variedad)

Se utilizó semilla de tomate del Híbrido "El Cid F1", del cual destacan sus características como la calidad del fruto, un alto rendimiento, y un excelente vigor de las plantas, tallo fuerte y porte alto. El fruto es tipo Saladette, tamaño y forma uniforme con paredes gruesas y gran firmeza.

Para la siembra de las semillas se utilizó una mezcla de sustrato peat moss y perlita en proporción 1:1 (v/v). La emergencia de las plántulas ocurrió 7 días y el trasplante de las plántulas se hizo 28 días de la emergencia, en bolsas plástico negro de 8 litros de capacidad llenas con la misma mezcla de sustrato.

3.2.2. Preparación de las soluciones de nanopartículas

La fórmula de volumen y concentración se utilizó para determinar la cantidad de ppm a usar para la aplicación. En la cual contábamos con una solución madre de 5000 ppm y nosotros requeríamos una concentración de 200 ppm.

$$C_1 = 5000 \text{ ppm}$$

$$V_1 = ?$$

$$V_2 = 1000 \text{ ml}$$

$$C_2 = 200 \text{ ppm}$$

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{C_2 \times V_2}{C_1}$$

$$V1 = \frac{200 \times 1000}{5000} = 40 \text{ ml}$$

Para la creación de las nanopartículas se realizaron los siguientes pasos

1. Identificar los óxidos a usar (Óxido de hierro y Óxido de zinc), las cuales tienen un tamaño de 20 nanómetros y una pureza del 99.5%.
2. Pesar 500 mg de cada óxido y separarlos.
3. Posteriormente en tres matraces erlenmeyer se colocaron 0.1 L de agua destilada.
4. Una vez con los matraces con agua se pusieron los óxidos (500 mg ZnO, 500 mg FeO y 500 mg ZnO- 500 mg FeO) y se agito manualmente hasta percibir que los óxidos lograron dispersarse lo más posible.
5. Se usó un limpiador ultrasónico durante 10 minutos y una temperatura de 28°C para la reducción máxima posible de partículas, y crear una homogenización para evitar residuos de sólidos.
6. Por último se determino que en un contenedor de 1 litro se pusieron 960 ml de agua destilada y 40 ml de la solución final para comenzar a aplicarse.

3.2.3. Descripción de los tratamientos

Se evaluaron dos tipos de NPs, una mezcla de ambas NPs y un tratamiento sin NPs (ZnO-NPs, Fe₂O₃-NPs, ZnO+Fe₂O₃-NPs y 0 NPs], respectivamente) y dos formas de aplicación (foliar y drench) para un total de 8 tratamientos. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial (4x2), con cuatro repeticiones por tratamiento y tres plantas por repetición. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación múltiple de medias utilizando el método de Tukey ($p \leq 0.05$), con el programa estadístico InfoStat 2020.

Para las aplicaciones de tratamientos se usó un vaso de precipitado, y fueron aplicados 10 ml en cada planta vía drench, para la aplicación foliar se usó un atomizador calculando asperjar 20 ml por planta.

Tabla 1. Tratamiento y tipo de aplicación

Tratamientos	Aplicación	Vía
Tratamiento 1	Agua destilada (Testigo)	Foliar
Tratamiento 2	200 ppm de Óxido de Zinc (ZnO)	Foliar
Tratamiento 3	200 ppm de Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	Foliar
Tratamiento 4	200 ppm de Óxido de Zinc (ZnO) + 200 ppm de Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	Foliar
Tratamiento 5	Agua Destilada (Testigo)	Drench
Tratamiento 6	200 ppm de Óxido de Zinc (ZnO)	Drench
Tratamiento 7	200 ppm de Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	Drench
Tratamiento 8	200 ppm de Óxido de Zinc (ZnO) + 200 ppm de Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	Drench

3.2.4. Días de aplicación de tratamientos

La aplicación de los tratamientos tanto foliar como drench se hicieron con intervalos de 15 días iniciando a los 15 días posteriores al trasplante, quedando de la siguiente manera:

PRIMER APLICACIÓN: 21 de agosto del 2024

SEGUNDA APLICACIÓN: 5 de septiembre del 2024

TERCER APLICACIÓN: 18 de septiembre del 2024

CUARTA APLICACIÓN: 4 de octubre del 2024

QUINTA APLICACIÓN: 19 de octubre del 2024

Las aplicaciones fueron realizadas en horarios que rondaban las 16:00 h y 18:00 h, donde las temperaturas y la humedad relativa eran más estables.

3.2.5. Parámetros que evaluar

3.2.5.1. Datos en invernadero

En invernadero se tomaron varios parámetros, que son los siguientes:

1. Mediciones del fruto
2. Número de frutos
3. Peso del fruto
4. Peso Fresco y Seco

De estos resultados, se obtuvo una base de datos de variable vegetativas y de rendimiento y posteriormente se sometieron al análisis estadístico.

3.2.5.2. Datos de laboratorio

Para el laboratorio se consideraron los siguientes datos a tomar.

- Acidez titulable
- Conductividad Eléctrica (CE)
- Firmeza del fruto
- Grados Brix
- Potencial Hidrógeno (pH)
- Potencial Redox (ORP)
- Vitamina C

3.2.6. Procedimientos de toma de datos

Los procedimientos en campo y laboratorio fueron medidos lo más preciso posible y con el equipo que estuvo al alcance.

3.2.6.1. Fruto

3.2.6.1.1. Dimensiones:

Se determinó el diámetro polar y ecuatorial de cada fruto individual por planta con un vernier digital.

3.2.6.1.2. Número de frutos:

Desde el primer corte se fue haciendo el registro de cada fruto cosechado hasta el último para determinar el número de frutos totales por planta y poder obtener el rendimiento en kilogramos de frutos por planta.

3.2.6.1.3. Peso:

Para obtener el peso de cada fruto se utilizó una balanza digital Cobacorp, las dos primeras cosechas se tomó el registro del peso de cada fruto cosechado, para determinar el peso promedio del fruto en cada planta.

Desde el primer corte al tercer corte, todos los frutos que estaban en momento de cosechar fueron seleccionados para tomarle el pesaje que tenían en ese momento en una báscula que manejaba escalas de 5 g.

3.2.6.2. Biomasa fresca y seca de hojas y raíces

3.2.6.2.1. Hojas:

Antes de realizar los cortes del jitomate se hacían poda de hojas estas hojas se pesaban y se metían en una bolsa de papel kraft para que comenzara el proceso de secado. Al final del experimento, la planta se seccionó en partes pequeñas para que se pudieran manipular a la hora de colocarlas en la báscula. Igualmente, se pesó y se guardó en la bolsa.

Después de la poda de hojas durante el ciclo de crecimiento del cultivo se registró el peso fresco del follaje y posteriormente se metieron a una estufa de secado hasta peso seco constante para el registró de peso seco de follaje, de tallo y de raíces. El peso siempre se obtuvo con una balanza digital Cobacorp.

3.2.6.2.2. Raíces:

Las raíces cuando acabo el proyecto se lavaron en agua para eliminar el sustrato, una vez limpias se les registro el peso fresco, para colocarse en papel kraft y llevarlas al proceso de secado para el registro del peso seco de raíz.

3.2.6.3. Acidez titulable:

La acidez titulable se determinó de acuerdo con el método del AOAC (2000) para lo cual, se extrajo el jugo de 4 tomates por cada tratamiento, se diluyeron 10 mL de jugo de tomate en 125 ml de agua destilada en un matraz Erlenmeyer. Se tomó una muestra de 10 mL y en esta se hizo la titulación con NaOH 0.01N a pH 8.3. Se registraron 4 lecturas por cada tratamiento y los datos de estas mediciones se expresaron porcentaje de ácido cítrico por medio de la aplicación de la siguiente formula:

$$\% \text{acidez} = V_{\text{NaOH}} * N_{\text{NaOH}} * \text{meqácido} * 100 / v$$

Donde:

V_{NaOH} = Volumen de NaOH usando para la titulación.

N_{NaOH} = Normalidad del NaOH

Meq ácido = Miliequivalentes de ácido.

El valor equivalente de base a ácido para el ácido cítrico es: 0.064.

V = Peso en gr o volumen de la muestra en mL.

3.2.6.4. Firmeza del fruto:

Lo primero que se hizo fue tomar un fruto y con ayuda de un penetrómetro se penetra el fruto 3 veces en diferentes posiciones con el fin de ver con que fuerza ejercida se penetraba el fruto.

3.2.6.5. Solidos Solubles Totales (°Brix):

El contenido de solidos solubles totales o °Brix se se realizó de acuerdo con la técnica del refractómetro. Se usó el jugo de 4 frutos de tomate por cada tratamiento, una gota de ese jugo se colocó en el prisma del refractómetro y la medición se observó a contra luz para identificar la posición de la escala.

3.2.6.6. Potencial Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica (CE):

Con la misma muestra de jugo se colocó el equipo de potenciómetro, este se introdujo al jugo durante unos segundos hasta que se estabilizará el valor para verificar el nivel de pH y la conductividad eléctrica.

3.2.6.7. Potencial Redox (ORP):

Con un medidor de ORP Redox, se utilizó un medidor de potencial redox, se introdujo en la muestra líquida y se tomó el dato que aparecía en el medidor.

3.2.6.8. Vitamina C:

Se determinó mediante el método del 2,6-dicloroindofenol por titulación. El reactivo de Thielman el cual se preparó de acuerdo con la AOAC 967.21. Se utilizó una muestra de 20 g la cual fue macerada en un mortero de porcelana y se le añadió 10 ml de HCL al 2% y se aforo con 100 ml de agua destilada. Posteriormente el macerado se filtró en un matraz Erlenmeyer, se tomó el volumen total del filtrado, después se tomó una alícuota de 10 mL para proceder a titular con el reactivo de Thielman hasta que adquiriera un color rosado pálido sin desaparecer durante 30 segundos. Para el registro de la lectura se toman los ml gastados del reactivo.

El contenido de ácido ascórbico o concentración de la vitamina C en la muestra, se calcula según la fórmula:

$$\text{Vitamina C} = \text{VRT} * 0.088 * \text{VT} * 100/\text{VA} * \text{P}$$

Donde:

Vitamina C= En la muestra expresada en mg en 100g.

VRT= Volumen gastado en ml de reactivo de Thielman.

0.088= mg de ácido ascórbico equivalente a un ml del reactivo de Thielman.

VT=Volumen total en ml del filtrado total de vitamina C en HCl.

VA=Volumen en ml de la alícuota valorada.

P=Peso de muestra en gramos

3.2.7. Manejo nutricional

Para la nutrición que se aplicó al cultivo se utilizó la solución Steiner. Esta misma se utilizó en dos porcentajes, en dos etapas diferentes del cultivo. Se utilizó al 50% desde que la planta tenía entre 3 semanas después del trasplante y 1 mes con una semana después del trasplante. Posteriormente a ese tiempo se aplicó la solución Steiner al 100%, hasta el final del ciclo.

Tabla 2. Solución Steiner

Fertilizantes	Gramos aplicados por 1100 L. (50%) (Solución Steiner)	Gramos aplicados por 1100 L. (100%) (Solución Steiner)
Nitrato de calcio (CaNO ₃)	275.94	551.88
Nitrato de potasio (KNO ₃)	195.73	391.45
Ácido Nítrico (HNO ₃)	171.397	342.793
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)	166.29	332.57

Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	108.405	216.81
Ácido fosfórico (H ₃ PO ₄)	45.65	91.3
Micros	44	88

Durante el experimento se realizó una aplicación de Ca+B, (Nubiotek) esto debido a que hubo días donde se presentó un clima nublado y frío, por lo que las plantas se enchinaron, por la falta de movilidad del calcio.

3.2.8. Manejo fitosanitario

A lo largo del experimento se presentaron diversas plagas y enfermedades de gran importancia, por lo cual se tuvieron que hacer aplicaciones de insecticidas para contrarrestar o disminuir el daño que estos podrían hacer al cultivo, es indispensable conocer de qué forma estas ocasionadores de problemas actúan para poder determinar el modo de atacarlos.

3.2.9. Análisis Estadístico

Se aplicó un análisis de varianza con un nivel de significancia del 95%. Cuando se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, se realizó una prueba de comparación de medias mediante el método LSD de Fisher ($p \leq 0.05$). En el análisis se utilizaron 4 repeticiones por tratamiento para los parámetros morfológicos de la planta y los parámetros de calidad, mientras que para las variables de rendimiento se utilizaron 6 repeticiones por tratamiento.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de parámetros morfológicos y de rendimiento

4.1.1. Altura de planta

De acuerdo con el ANOVA, el tratamiento con mayor altura correspondió a la aplicación foliar de NPs de Zn con un valor de 246.75 cm, sin diferenciarse estadísticamente de los tratamientos Fe+Zn vía drench (241.50 cm), Fe+Zn vía foliar (241.25 cm) y NPs de Fe vía drench (241.00 cm). En seguida, el tratamiento de NPs de Fe vía foliar y NPs de Zn vía drench presentaron valores intermedios con 234.00 cm y 229.50 cm, respectivamente. En contraste, los tratamientos testigo, tanto foliar como por vía drench, registraron los valores más bajos: 224.0 cm y 219.50 cm, respectivamente. En general, en términos relativos, el tratamiento de NPs de Zn vía foliar superó al testigo foliar en aproximadamente 9.2% y al testigo vía drench en 11.6%, evidenciando una respuesta positiva asociada a la aplicación foliar de ZnO. En estudios previos, se ha demostrado que el incremento observado en la altura bajo tratamientos con NPs de Zn sugiere que las nanopartículas favorecen el crecimiento vegetativo mediante la activación de procesos fisiológicos, como la fotosíntesis y la síntesis de fitohormonas (Ahmed et al., 2023). Además, se ha documentado que la aplicación foliar de NPs de Zn puede incrementar la tasa de fotosíntesis y el crecimiento de la planta de tomate en condiciones de invernadero (Azim et al., 2022; Rehman et al., 2023).

4.1.2. Peso fresco de la planta

De acuerdo con el ANOVA, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en el peso fresco de la planta ($p \leq 0.05$). El mayor peso fresco se registró en el tratamiento combinado de NPs de Fe+Zn vía drench, con 1785.00 g, seguido de los tratamientos NPs de Fe vía drench, NPs de Fe vía foliar y la combinación de NPs de Fe+Zn vía foliar, con 1515.00 g, 1460.00 g y 1441.25 g, respectivamente, con valores intermedios. Por su parte, los tratamientos testigo foliar vía drench presentaron los valores más bajos con 1213.75 g. 1170.00 g, respectivamente.

En general, la diferencia entre el tratamiento NPs de Fe+Zn vía drench y el testigo foliar fue de aproximadamente 34% y entre el tratamiento NPs de Fe+Zn vía drench y el testigo vía foliar de 32%, evidenciando un efecto positivo de la combinación de nanopartículas aplicada vía drench sobre la acumulación de biomasa fresca total en la planta.

El incremento en la biomasa fresca total sugiere un posible efecto sinérgico entre Zn y Fe. Por un lado, el zinc participa en la activación enzimática y el hierro en procesos fotosintéticos, particularmente en la síntesis de clorofila. Estudios han reportado que las Nps de ZnO incrementan significativamente la fotosíntesis y el rendimiento del tomate en comparación con el control (Ahmed et al., 2023; Farooq et al., 2023).

4.1.3. Peso fresco de la raíz

Respecto al peso fresco de la raíz, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores más altos se registraron en los tratamientos con NPs de Zn, tanto en aplicación foliar como por vía drench con pesos de 51.25 g y 50.00 g, respectivamente. Enseguida, el tratamiento combinado de NPs de Fe+Zn vía drench el peso fresco fue de 40.00 g, seguido de los tratamientos NPS de Fe + Zn vía foliar, NPs de Fe vía drench y NPs de Fe vía foliar con promedios de 33.75 g, 32.50 g y 32.50 g, respectivamente.

En contraste, los tratamientos testigo, tanto foliar (30.00 g) como por vía drench (26.25 g), registraron los valores más bajos. Así que la diferencia porcentual entre el tratamiento con NPs de Zn vía foliar y drench superó al testigo foliar y drench más allá del 40%.

El aumento en la biomasa radical asociado a Zn, en ambas formas de aplicación, puede atribuirse a una mayor disponibilidad del nutriente tanto vía radicular como vía estomática, por lo que se sugiere que las NPs de Zn promueven la división celular y la elongación de las raíces. En efecto, en una investigación se demostró que las NPs de Zn incrementaron significativamente la longitud y la biomasa radiculares en tomate, con aumentos de hasta un 33% en las raíces (Rehman et al., 2023). Además, las nanopartículas mejoran la absorción de nutrientes y la actividad

enzimática en la rizosfera (Sun et al., 2023). En general, en tomate, se ha reportado que las nanopartículas de Zn mejoran significativamente la arquitectura radical, incluyendo longitud, volumen y área superficial de la raíz, favoreciendo la absorción de agua y nutrientes (Rehman et al., 2023).

4.1.4. Peso seco de la planta

No se detectaron diferencias significativas en la variable de peso seco de la planta ($p > 0.05$). Sin embargo, se observaron algunas tendencias relacionadas con el efecto de las NPs, tanto simples como combinadas. El tratamiento NPs de Fe+Zn vía drench presentó el mayor peso seco, con 240.00 g, seguido del tratamiento NPs de Fe vía drench, con 230.00 g, y del testigo vía drench, con 215.00 g. Los tratamientos NPs de Zn vía drench, NPs de Fe+Zn vía foliar y NPs de Fe vía foliar presentaron valores intermedios de 211.25 g, 207.50 g y 202.50 g, respectivamente, mientras que las NPs de Zn vía foliar y el testigo foliar registraron los valores más bajos con 192.50 g y 186.25 g, respectivamente.

En general, el tratamiento con mayor peso seco que fue el de NPs de Fe+Zn vía drench superó al testigo foliar en aproximadamente 22.40% y al testigo vía drench en 10.42%, lo que sugiere una tendencia positiva de la combinación de nanopartículas aplicada al suelo sobre la acumulación de biomasa estructural.

Aunque no existe diferencias significativas que sustente los pesos secos altos con el tratamiento combinado de NPs de Fe+Zn vía drench, posiblemente el aumento del peso seco puede estar relacionado con la acumulación de materia orgánica bajo la influencia combinada de NPs de Fe y Zn; es decir, las NPs están implicadas en la mejora de la asimilación de carbono y de la eficiencia fotosintética inducida por las NPs (Pejam et al., 2021). Estudios han demostrado que las NPs de ZnO mejoran la biomasa total y el rendimiento en tomate mediante la regulación de rutas metabólicas y la expresión génica relacionada con el crecimiento. Sin embargo, también se ha reportado que los efectos de las nanopartículas pueden ser variables y dependientes de la dosis y condiciones de cultivo (Cantu et al., 2022).

4.1.5. Peso seco de la raíz

Aunque no se observaron diferencias significativas, si se observó una tendencia marcada. Los tratamientos con NPs de Zn vía drench y foliar presentaron los valores más altos, con 15.00 g, lo que representa un incremento del 25% respecto al testigo foliar, que presentó un peso seco de 11.25 g. Sin embargo, en comparación con el testigo drench (12.50 g), la diferencia fue menor (17%). . El resto de los tratamientos, incluidos los combinados de NPs de Fe+Zn por vía drench y foliar, mostraron valores cercanos a los de los testigos.

Posiblemente el comportamiento del peso seco de la raíz estuvo influido por el efecto de las nanopartículas, que también pueden incrementar la acumulación de biomasa estructural, aunque de manera menos consistente que en el peso fresco. Esto sugiere que el efecto del Zn puede estar más relacionado con la expansión celular que con la lignificación o acumulación de materia seca (Pejam et al., 2021).

4.1.6. Diámetro del tallo

En cuanto al diámetro del tallo, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). El mayor diámetro de tallo se registró en los tratamientos testigo vía drench y NPs de Fe vía drench con 16.37 mm y 15.55 mm, respectivamente. En contraste, los tratamientos testigo foliar y NPs de Zn vía foliar registraron los valores más bajos, de 12.77 mm y 11.75 mm, respectivamente.

En términos relativos, el control drench superó al testigo foliar en aproximadamente 22% y al tratamiento NPs de Zn vía foliar en 28.22%, evidenciando que al menos para este trabajo de investigación, el uso de nanopartículas no incrementó esta variable bajo las condiciones evaluadas.

La ausencia de respuesta en el diámetro del tallo sugiere que esta variable es menos sensible a la aplicación de nanopartículas. En tomate, el grosor del tallo está más influido por factores genéticos y ambientales que por los micronutrientes a niveles no limitantes. Sin embargo, las investigaciones sugieren que el efecto de las NPs de Zn puede ser más evidente en variables fisiológicas y de biomasa que en características estructurales como el diámetro del tallo (Włodarczyk et al., 2024).

4.1.7. Peso del fruto

Para el peso de frutos, se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). El tratamiento con mayor peso de fruto correspondió a la aplicación de Fe vía foliar con 134.17 g, sin diferencias estadísticas respecto a la aplicación foliar de NPs de Zn (133.3 g). Enseguida, con los tratamientos de NPs de Fe drench, NPs de Fe + Zn drench y NPs de Zn drench, también se obtuvieron pesos de fruto de 128.33 g, 125.83 g y 123.33 g, respectivamente. En contraste, los tratamientos testigo, tanto vía foliar como drench, presentaron los valores más bajos con 87.5 y 98.3, respectivamente, siendo significativamente inferiores al resto de los tratamientos con nanopartículas.

En términos relativos, el tratamiento de NPs de Fe vía foliar superó al testigo foliar en aproximadamente 34.79% y al testigo vía drench en 26.73%. De manera similar, el tratamiento NPs de Zn vía foliar presentó incrementos de 34.37% y 26.25%, respectivamente, mientras que los tratamientos Fe-D, Fe+Zn-D y Zn-D también mostraron aumentos importantes respecto a ambos controles.

El mayor peso de fruto observado en el tratamiento con NPs de Fe vía foliar sugiere un efecto positivo del hierro en procesos fisiológicos clave, como la fotosíntesis y el metabolismo energético, que favorecen la producción y la acumulación de fotoasimilados en los frutos. Por su parte, la respuesta similar observada en el tratamiento con Zn foliar indica que el zinc desempeña un papel fundamental en la síntesis de proteínas, la regulación hormonal y el desarrollo del fruto.

Diversos estudios han reportado que la aplicación de nanopartículas de Zn incrementa significativamente el peso de fruto del tomate, lo que se asocia con mejoras en la fotosíntesis, la actividad enzimática y la eficiencia en el uso de nutrientes (Faizan et al., 2018; Li et al., 2018). Asimismo, se ha documentado que el uso de NPs de ZnO puede aumentar el rendimiento y peso individual de fruto en comparación con tratamientos testigo, debido a una mayor acumulación de biomasa y fotoasimilados (Faizan et al., 2018; Ahmed et al., 2023).

4.1.8. Diámetro polar y ecuatorial

Según el ANOVA, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). En el diámetro ecuatorial, todos los tratamientos con nanopartículas, incluyendo Fe-D (53.12 mm), Fe + Zn-D (53.01 mm), Fe-F (52.96 mm), Zn-F (52.77 mm), Zn-D (52.06 mm) y Fe + Zn-F (51.51 mm), presentaron los mayores valores, sin diferencias estadísticamente significativas entre sí. En contraste, los tratamientos testigo, tanto foliar como por vía drench, registraron los valores más bajos con promedios de 49.3 mm y 49,16 mm, respectivamente. De manera similar, en el diámetro polar, los tratamientos con nanopartículas mostraron los valores más altos, destacándose que los tratamientos NPs de Fe vía drench (69.67 mm), NPs de Fe vía foliar (69.39 mm) y NPs de Zn vía foliar (68.49 mm) presentaron los mayores valores. En contraste, los tratamientos testigo foliar y testigo drench registraron los valores más bajos, de 64.12 mm y 63.37 mm, respectivamente.

En términos relativos, para el diámetro ecuatorial, el tratamiento de NPs de Fe vía drench superó al testigo foliar en aproximadamente 4% y al testigo vía drench en 7.0%. Para el diámetro polar, las NPs de Fe vía drench superaron al testigo foliar en un 4% y al testigo vía drench en un 9%.

El incremento en el diámetro ecuatorial y polar del fruto asociado a tratamientos con nanopartículas sugiere un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo del fruto, posiblemente relacionado con una mayor disponibilidad de nutrientes y una mejora en la actividad fisiológica de la planta. Como se mencionó anteriormente, el hierro participa en la fotosíntesis y en el metabolismo energético, mientras que el zinc interviene en la síntesis de proteínas y en la regulación del crecimiento, lo que en conjunto puede favorecer la expansión celular del fruto.

Estos resultados coinciden con estudios que reportan incrementos en el tamaño del fruto de tomate bajo la aplicación de nanopartículas, atribuibles a mejoras en la eficiencia fotosintética y en la movilización de asimilados hacia los órganos reproductivos (Faizan et al., 2021; Hernández-Hernández et al., 2018). Asimismo, la similitud entre tratamientos con nanopartículas indica que tanto Fe como Zn

fueron efectivos para promover el crecimiento del fruto, independientemente de la vía de aplicación.

4.1.9. Número de frutos totales

Finalmente, en la variable número de frutos, el ANOVA mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). Los tratamientos NPs Fe+Zn vía drench, NPs Zn vía drench, NPs Zn vía foliar y NPs Fe vía foliar promovieron el mayor número de frutos con: 42.83, 40.83, 40.50 y 38.66 frutos por planta, respectivamente. Los incrementos de estos tratamientos respecto al control foliar fueron de 37.73%, 34.69%, 34.16% y 31.03%, respectivamente, mientras que respecto al control drench fueron de 38.91%, 35.9%, 35.37% y 32.33%, respectivamente.

La mayor producción de frutos observada en el tratamiento con NPs de Zn drench sugiere un efecto positivo del zinc en procesos reproductivos como la floración, el cuajado y la retención de frutos. El zinc desempeña un papel fundamental en la síntesis de auxinas y en la regulación del crecimiento, lo que puede favorecer el desarrollo de estructuras reproductivas (Faizan et al., 2018; Li et al., 2018).

La similitud entre los tratamientos con Zn vía drench y Zn foliar indica que ambas vías de aplicación resultaron eficientes para el suministro del nutriente, lo que permitió una adecuada absorción y translocación del nutriente dentro de la planta. Por otro lado, la menor respuesta a los tratamientos con NPs de Fe, especialmente en Fe vía drench, sugiere que el hierro por sí solo no fue un factor limitante en el sistema evaluado o que su disponibilidad fue menor que la del zinc (Faizan et al., 2018; Li et al., 2018).

En conjunto, los resultados evidencian que el uso de nanopartículas de Zn, particularmente en el tratamiento de Zn drench, favorece significativamente el número de frutos en tomate, mientras que los tratamientos sin nanopartículas presentan el menor desempeño.

Tabla 3. Efecto de las NPs de Fe y Zn en el crecimiento, el rendimiento del tomate cv. El Cid F1

Tratamientos (mg L ⁻¹)	Altura de planta (cm)	Peso fresco de la planta (g)	Peso seco de la planta (g)	Diámetro del tallo (cm)	Peso fresco de la raíz (g)	Peso seco de la raíz (g)	Peso del fruto (g)	Diámetro ecuatorial (cm)	Diámetro polar (cm)	Número de frutos totales
TF	224.0 c	1213.75 b	186.25 a	12.7650 c	30.00 c	11.25 a	87.500 c	49.3217 b	64.1271 bc	26.6667 c
NPs ZnO-F	246.75 a	1315.75 ab	192.50 a	11.7500 c	51.25 a	13.75 a	133.333 a	52.7733 a	68.4917 a	40.5000 a
NPs FeO-F	234.0 abc	1460.0 ab	202.50 a	14.4175 abc	32.5 bc	15.00 a	134.167 a	52.9592 a	69.3850 a	38.6667 ab
NPs FeO+ZnO -F	241.25 ab	1441.25 b	207.50 a	14.0325 abc	33.75 bc	12.50 a	116.667 b	51.5100 a	67.2900 ab	31.1667 bc
TD	219.50 c	1170.0 b	215.0 a	16.3675 a	26.25 c	12.50 a	98.333 c	49.1650 b	63.3683 c	26.1667 c
NPs ZnO-D	229.50 bc	1395.0 b	211.25 a	13.120 bc	50.00 a	15.00 a	123.333 ab	52.0600 a	66.9683 abc	40.8333 a
NPs FeO-D	241.0 ab	1515.0 ab	230.00 a	15.5450 ab	32.50 bc	12.5 a	128.333 ab	53.1167 a	69.6700 a	30.6667 c
NPs FeO+ZnO -D	241.50 ab	1785.0 a	240.00 a	14.3625 abc	40.00 b	13.75 a	125.833 ab	53.0083 a	67.7450 ab	42.8333 a

* Valores seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (Fisher, $p \leq 0.05$).

4.2. Análisis de parámetros de calidad del fruto de tomate

4.2.1. Acidez titulable

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). El tratamiento con NPs de Fe vía foliar presentó el mayor valor con 0.045, superando al testigo foliar (0.022) en aproximadamente un 50%. También los tratamientos con NPs de Fe vía drench y la combinación Fe + Zn foliar mostraron valores elevados.

En contraste, el testigo foliar presentó el valor más bajo, significativamente inferior al de los demás tratamientos.

El incremento de la acidez titulable en tratamientos con NPs de Fe sugiere un efecto del hierro sobre el metabolismo de ácidos orgánicos, determinantes de la calidad organoléptica del fruto. El hierro participa en rutas metabólicas relacionadas con la respiración y el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, lo que podría explicar una mayor acumulación de ácidos. En contraste, el bajo valor en el testigo foliar indica una menor actividad metabólica o una menor acumulación de estos compuestos. En tomate, la acidez es un atributo clave de calidad, y su modificación mediante nutrición mineral ha sido ampliamente documentada (Fanasca et al., 2006).

4.2.2. Potencial óxido-reducción (ORP)

En el resto de las variables, como potencial óxido-reducción (ORP), pH y CE, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$); sin embargo, se identificaron algunas tendencias. Por ejemplo, en ORP, el tratamiento con NPs de Zn foliar presentó el valor más alto (123.5), superando al testigo foliar (64.3) en aproximadamente un 92.1% y mostrando valores superiores también respecto al testigo vía drench (114.75). Asimismo, los tratamientos Fe+Zn-D (113.75) y testigo drench (114.75) mostraron valores elevados, mientras que NPs de Fe vía foliar presentó uno de los valores más bajos (88.3). En general, los tratamientos con nanopartículas tendieron a presentar valores superiores a los del testigo foliar.

4.2.3. Grados Brix (°Brix)

En la variable de grados Brix se encontró diferencia significativa entre tratamientos ($p \leq 0.05$), destacando que el tratamiento NPs de Fe vía drench presentó una diferencia relativa de 22.22% respecto al control CD y 11.11% respecto al control foliar; sin embargo, el control foliar no fue diferente al tratamiento de NPs de Fe vía foliar. Los resultados sugieren un efecto positivo del hierro sobre la acumulación de azúcares y compuestos solubles en el fruto. El hierro es un micronutriente esencial involucrado en procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis, respiración y síntesis de clorofila, por lo que una mayor disponibilidad de este elemento puede favorecer la producción y translocación de foto asimilados hacia los frutos (Fanasca

et al., 2006). Esto podría explicar el incremento en los °Brix observado en el tratamiento Fe-D.

4.2.4. Potencial Hidrógeno (pH)

En cuanto al pH, los valores fueron altamente homogéneos entre los tratamientos, con una diferencia mínima, oscilando entre 4.63 y 4.69.

4.2.5. Conductividad Eléctrica (CE)

Respecto a la conductividad eléctrica (CE), los valores también fueron similares entre los tratamientos.

La ausencia de diferencias significativas en ORP, pH y CE sugiere que estas variables fisicoquímicas son relativamente estables y menos sensibles a la aplicación de nanopartículas en las condiciones evaluadas. No obstante, las tendencias observadas en ORP podrían indicar una ligera modificación del estado redox del fruto asociada a la presencia de nanopartículas, lo cual podría estar relacionado con cambios en el metabolismo antioxidante.

4.2.6. Firmeza

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). Los mayores valores de firmeza se registraron en el tratamiento con NPs de Fe vía drench (2.65); sin embargo, también incluye al testigo vía drench (2.57), sin diferencias entre ellos. Estos tratamientos también fueron estadísticamente similares a la aplicación foliar de NPs de Fe (2.42) y al testigo foliar (2.30), que presentaron valores intermedios.

En contraste, los tratamientos con nanopartículas de Zn, tanto individuales como combinados, presentaron los valores más bajos de firmeza (1.99–2.06). En términos porcentuales, el tratamiento de NPs de Fe vía drench superó al testigo foliar en aproximadamente 13.0%.

La mayor firmeza observada en los tratamientos con Fe sugiere un posible efecto del hierro sobre la estabilidad estructural de los tejidos del fruto, posiblemente relacionado con la integridad de la pared celular y con los procesos oxidativos. Por otro lado, la menor firmeza en los tratamientos con Zn podría estar asociada a un

incremento de la actividad metabólica y de la maduración del fruto, lo que tiende a reducir la rigidez del tejido. Los estudios sobre tomate indican que los micronutrientes pueden influir en la firmeza al modificar la composición de la pared celular y la actividad enzimática durante la maduración (Almeida et al., 2025). Incluso Buthelezi et al. (2025) demostraron que recubrimientos de quitosano con nanopartículas de ZnO mejoran la calidad postcosecha al mantener la firmeza del fruto. Este efecto se atribuye a la formación de una barrera que reduce la pérdida de agua, la respiración y la actividad microbiana, además de retrasar la senescencia gracias a propiedades antioxidantes y antimicrobianas mejoradas.

4.2.7. Vitamina C

Para esta variable, el testigo vía drench presentó el mayor contenido de vitamina C (11.69), sin diferenciarse de los tratamientos con NPs de Fe y Zn, tanto individuales como combinados, que mostraron valores similares, en el rango de 10.08-11.29. En contraste, el testigo foliar presentó el valor más bajo (8.06), inferior al de los demás tratamientos.

En esta variable específica, aunque se observaron valores altos en el control drench, se sugiere que, para los tratamientos con NPs, el contenido de vitamina C en frutos de tomate está estrechamente relacionado con el metabolismo antioxidante y la síntesis de ácido ascórbico. Además, se sugiere que la disponibilidad de micronutrientes puede favorecer la acumulación de compuestos antioxidantes. Estudios han reportado que nanopartículas como las de Zn pueden estimular la producción de antioxidantes al inducir respuestas fisiológicas relacionadas con el estrés controlado y la activación metabólica (Ahmed et al., 2023).

Tabla 4. Efecto de las NPs de Fe y Zn en la calidad del tomate cv. El Cid F1

Tratamientos (mg L ⁻¹)	Grados Brix	ORP	pH	CE	Firmeza	Vitamina C	Acidez titulable
TF	4.00 ab	64.3 a	4.67 a	4.29 a	2.30 ab	8.06 b	0.022 c
NPs ZnO-F	3.25 b	123.5 a	4.69 a	4.14 a	1.99 b	9.79 ab	0.032 b
NPs FeO-F	4.00 ab	88.3 a	4.64 a	4.62 a	2.42 ab	10.37 a	0.037 a
NPs FeO+ZnO - F	3.25 b	104.5 a	4.67 a	4.04 a	2.06 b	10.23 a	0.037 b
TD	3.50 b	114.7 a	4.65 a	4.17 a	2.57 a	11.69 a	0.037 b
NPs ZnO-D	3.25 b	105.7a	4.63 a	4.11 a	2.00 b	10.30 a	0.032 b
NPs FeO-D	4.50 a	105.7 a	4.65 a	4.06 a	2.65 a	11.29 a	0.038 ab
NPs FeO+ZnO - D	3.50 b	113.7 a	4.66 a	4.27 a	1.99 b	10.08 a	0.035 b

* Valores seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (Fisher, $p \leq 0.05$).

V. CONCLUSIONES

Consecuentemente a los resultados arrojados, se puede deducir que el uso de las NPs de ZnO y FeO, tanto individuales como en combinación, demuestra que en la clasificación de biomasa tanto fresca como seca, los tratamientos que resultaron más convincentes y con resultados más positivos fueron las NPs de FeO+ZnO vía englobando excelentes resultados en follaje, raíz y tallo. Destacando de igual manera el FeO en ambas formas de aplicación teniendo desenlaces un poco igual pero menor. Remarcando que los tratamientos restantes no significan que sean inservibles, sino que son menos eficientes que los ya comentados, pero siguen siendo una buena opción en comparación con una nula aplicación de estos.

Los parámetros de rendimientos constatan que individualmente trabajaron mejor los tratamientos, siendo que el ZnO influyó mejor en el número de frutos tanto en vía foliar con drench, pero el FeO actuó más positivo en el pesaje de los frutos, objetando que la función de los micronutrientes en este parámetro se desempeña mejor de forma individual que combinada a pesar de que los resultados de los tratamientos que trabajan combinadas no se distancian por mucho.

De las variables a evaluar en la calidad del fruto, se puede resaltar que la variación de resultados no fue tan desigual, ya que en algunos criterios los datos se mantuvieron en rangos similares, condicionando que los micronutrientes repercutieron poco en el proyecto, pensando que una posible modificación en las concentraciones utilizadas pudiera cambiar un poco más los datos. Algo a sumar es que en un promedio los tratamientos vía drench fueron más efectivos por poco que los foliares, en un margen de los mejores 4 tratamientos.

Con esto podemos corroborar que la hipótesis estipulada en el trabajo es acertada, ya que en una comparación global y lógica ante los resultados se notaron bastantes mejorías en la mayoría de las variables a evaluar, mostrando que hay apartados donde los micronutrientes logran evidenciar que son destacados unos que son considerablemente eficientes y pocos que no interfieren o influyen al cultivo, abriendo la oportunidad de una nueva forma de poder trabajar con los cultivos y tratar de contrarrestar diferentes dificultades que se viven en el día a día.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, I.; Sandoval, C.; Sepúlveda, C. 2021. Enfermedades de la papa: Plataforma de evaluación de riesgo sanitario. INIA, Chile. <http://enfermedadespapa.inia.cl>.
- Ahmad, A., Javad, S., Iqbal, S. et al. Efficacy of soil drench and foliar application of iron nanoparticles on the growth and physiology of *Solanum lycopersicum* L. exposed to cadmium stress. *Sci Rep* 14. 27920 (2024).
- Ahmed, R., Uddin, Md. K., Quddus, Md. A., Samad, M. Y. A., Hossain, M. A. M., & Haque, A. N. A. (2023). Impact of Foliar Application of Zinc and Zinc Oxide Nanoparticles on Growth, Yield, Nutrient Uptake and Quality of Tomato. *Horticulturae*, 9(2), 162. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020162>
- Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition. International Zinc Association.
- Almeida, E. C., Pereira, F. H. F., Ferreira, K. N., De Sena Rodrigues, A. C., Araújo, R. H. C. R., De Souza, J. E. J., Ramos, C. S. G., Lopes, G., Dos Santos, L. C., Neto, F. B., Sá, F. V. D. S., Santos, J. Z. L., Nascimento, R. D., & Rocha, J. L. A. (2025). Physiological, Productive, and Nutritional Performance of Tomato Plants Treated with Iron and Zinc Nanoparticles via Foliar Application Under Deficit Irrigation. *Horticulturae*, 11(10), 1228. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11101228>
- Azim, Z., Singh, N. B., Khare, S., Singh, A., Amist, N., Niharika, & Yadav, R. K. (2022). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Vernonia cinerea* leaf extract and evaluation as nano-nutrient on the growth and development of tomato seedling. *Plant Nano Biology*, 2, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2022.100011>
- Buthelezi, N. M. D. (2025). Chitosan–Zinc Oxide Nanoparticle Composite Coatings Preserve Postharvest Quality of ‘Rosada’ Cherry Tomato. *HortScience*, 60(4), 613-623. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI18426-24>
- Cantu, J. M., Ye, Y., Hernandez-Viezcas, J. A., Zuverza-Mena, N., White, J. C., & Gardea-Torresdey, J. L. (2022). Tomato Fruit Nutritional Quality Is Altered by the Foliar Application of Various Metal Oxide Nanomaterials. *Nanomaterials*, 12(14), 2349. <https://doi.org/10.3390/nano12142349>
- Cervantes Juan, María Magdalena, Olalde Portugal, Víctor, Martínez Franco, Mónica Berenice, Notario Zacarías, María Isabel, & Valdés Rodríguez, Silvia

- Edith. (2020). La cistatina de amaranto previene y controla el tizón temprano en tomate.
- Delgado-Ortiz, Juan Carlos, Beltrán-Beache, Mariana, Cerna-Chávez, Ernesto, Aguirre-Urbe, Luis Alberto, Landero-Flores, Jerónimo, Rodríguez-Pagaza, Yolanda, & Ochoa-Fuentes, Yisa María. (2019). *Candidatus Liberibacter solanacearum* patógeno vascular de solanáceas: Diagnóstico y control.
- Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2016). Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(7). <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0346-6>
- Faizan, M., Faraz, A., Yusuf, M., Khan, S. T., & Hayat, S. (2018). Zinc oxide nanoparticle-mediated changes in photosynthetic efficiency and antioxidant system of tomato plants. *Photosynthetica*, 56(2), 678-686. <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0717-0>
- Fanasca, S., Colla, G., Maiani, G., Venneria, E., Rouphael, Y., Azzini, E., & Saccardo, F. (2006). Changes in Antioxidant Content of Tomato Fruits in Response to Cultivar and Nutrient Solution Composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(12), 4319-4325. <https://doi.org/10.1021/jf0602572>
- FAO. (2023). FAOSTAT statistical database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2023). FAOSTAT statistical database: Tomato production worldwide. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/>
- Farooq, A., Javad, S., Jabeen, K., Ali Shah, A., Ahmad, A., Noor Shah, A., Nasser Alyemeni, M., F.A Mosa, W., & Abbas, A. (2023). Effect of calcium oxide, zinc oxide nanoparticles and their combined treatments on growth and yield attributes of *Solanum lycopersicum* L. *Journal of King Saud University - Science*, 35(5), 102647. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102647>
- Hanson, P. (2017). Genetic improvement of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) for phytonutrient content. AVRDC – The World Vegetable Center.
- Heuvelink, E. (2018). *Tomatoes* (2nd ed.). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0000>

- Kah, M., Kookana, R. S., Gogos, A., & Bucheli, T. D. (2018). A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotechnology*, 13, 677–684.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2022). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 15, 103611.
- Klee, H. J., & Tieman, D. M. (2024). The genetics of flavor and nutritional quality in tomato. *Plant Physiology*.
- Kowalska, G., et al. (2024). How nano-ZnO affects tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.): analysis of selected fruit parameters. *Plants*.
- Li, Q., Li, X., Tang, B., & Gu, M. (2018). Growth Responses and Root Characteristics of Lettuce Grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. *Horticulturae*, 4(4), 35. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4040035>
- Ma, X., et al. (2010). Interaction between engineered nanoparticles and plants. *Environmental Science & Technology*.
- Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.
- Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B., et al. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179, 154–163.
- Palmitessa, O. D., Signore, A., Caretto, S., Durante, M., Mita, G., Paradiso, A., Serio, F., & Santamaria, P. (2021). Nutritional value of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) hybrids in greenhouse production. *Acta Horticulturae*, 1321, 283–290.
- Pejam, F., Ardebili, Z. O., Ladan-Moghadam, A., & Danaee, E. (2021). Zinc oxide nanoparticles mediated substantial physiological and molecular changes in tomato. *PLOS ONE*, 16(3), e0248778. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248778>
- Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (*Solanum lycopersicum*). In *Genetic improvement of solanaceous crops* (Vol. 2, pp. 1–27). Science Publishers.

- PRECIADO-RANGEL, Pablo et al. La biofortificación foliar con hierro mejora la calidad nutracéutica y la capacidad antioxidante en lechuga. *Terra Latinoam* [online]. 2022, vol.40
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2018). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66, 6487–6503.
- Rehman, F. U., Paker, N. P., Khan, M., Zainab, N., Ali, N., Munis, M. F. H., Iftikhar, M., & Chaudhary, H. J. (2023). Assessment of application of ZnO nanoparticles on physiological profile, root architecture and antioxidant potential of *Solanum lycopersicum*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102874. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102874>
- Rao, A. V., & Rao, L. G. (2007). Carotenoids and human health. *Pharmacological Research*.
- Razifard, H., Ramos, A., Della Valle, A. L., Bodary, C., Goetz, E., Manser, E. J., Li, X., Zhang, L., Visa, S., Tieman, D., van der Knaap, E., Caicedo, A. L., & Blanca, J. (2020). Genomic evidence for complex domestication history of the cultivated tomato in Latin America. *Molecular Biology and Evolution*, 37(4), 1118–1132. <https://doi.org/10.1093/molbev/msz297>
- Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 3485–3498.
- Sánchez-Portillo, S., Juárez-Maldonado, A., Benavides-Mendoza, A., Rodríguez-Herrera, R., Martínez-Hernández, G.B., Pérez-Labrada, F. 2025. Supplementation with Fe₃O₄ and ZnO nanoparticles as a strategy for agronomic bioenrichment of lettuce and cucumber. *Plant Nano Biology* 100232.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). Anuario estadístico de la producción agrícola en México. Gobierno de México.

- SIAP. (2023). Anuario estadístico de la producción agrícola en México. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- Sun, L., Wang, R., Ju, Q., Xing, M., Li, R., Li, W., Li, W., Wang, W., Deng, Y., & Xu, J. (2023). Mitigation mechanism of zinc oxide nanoparticles on cadmium toxicity in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1162372. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1162372>
- Tilman, D., et al. (2011). Global food demand and sustainable agriculture intensification. *PNAS*.
- Willcox, J. K., et al. (2003). Tomatoes and cardiovascular health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.
- Włodarczyk, K., Smolińska, B., & Majak, I. (2024). How Nano-ZnO Affect Tomato Fruits (*Solanum lycopersicum* L.)? Analysis of Selected Fruit Parameters. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(15), 8522. <https://doi.org/10.3390/ijms25158522>
- Zaman, W., Ayaz, A., & Park, S. (2025). Nanomaterials in Agriculture: A Pathway to Enhanced Plant Growth and Abiotic Stress Resistance. *Plants*, 14(5), 716.