



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS
DE HIDALGO**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA
PROTEGIDA**

**APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS SOBRE
EL RENDIMIENTO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*)
DETERMINADO ROMA BAJO MALLA SOMBRA**

TESIS

QUE PRESENTA

ING. JUAN MARTÍN OLIVAREZ RODRÍGUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTEBER EL GRADO DE:

MAESTRO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

DIRECTOR DE TESIS

DR. PATRICIO APÁEZ BARRIOS

APATZINGÁN, MICHOACÁN, MÉXICO NOVIEMBRE DE 2022



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA PROTEGIDA

**APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS SOBRE EL
RENDIMIENTO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) DETERMINADO
ROMA BAJO MALLA SOMBRA**

TESIS QUE PRESENTA

JUAN MARTÍN OLIVAREZ RODRÍGUEZ

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

Codirector



Dr. Juan Carlos Álvarez Hernández

Asesora



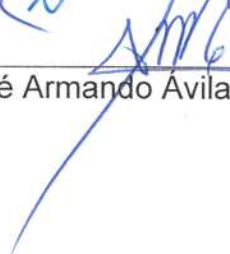
Dra. Maricela Apáez Barrios

Asesor



Dr. José Luis Escamilla García

Asesor



Dr. Noé Armando Ávila Ramírez

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias y CONACYT por el apoyo de la infraestructura requerida y económico, para realizar esta investigación y por la oportunidad de la profesionalización en el rubro de Agricultura Protegida.

A los Doctores Patricio Apáez Barrios y Juan Carlos Álvarez Hernández por ser facilitadores del aprendizaje, sus recomendaciones, apoyo económico, y constructores del conocimiento, para desarrollar las capacidades y habilidades necesarias para la obtención del grado.

A la Doctora Maricela Apáez Barrios y a los Doctores, José Luis Escamilla García y Noé Armando Ávila Ramírez, por el tiempo dedicado, por compartir sus experiencias y conocimientos profesionales en esta valiosa maestría

DEDICATORIA

Al Gran Arquitecto del Universo por permitirme de disponer de todos los medios, a pesar de tiempos tan difíciles de pandemia COVID-19; nos dio salud, solvencia económica y armonía familiar para lograr la obtención de grado.

A mi compañera de vida, mi amada esposa Jennifer Aranzueta Villalobos, que siempre confió en mí, y me dio apoyo incondicional cuando lo ocupaba, me escucho y me dio fortaleza para terminar esta meta en mi vida profesional.

A mi padre Juan Marcelo Olivares y mi madre Carolina Rodríguez quienes me dieron vida, y siempre han estado presentes en todos mis proyectos de vida.

A mi suegro Jorge Aranzueta que en vida compartía mis logros profesionales y personales.

A mi suegra Blanca Estela Villalobos la cual me apoyo con sus herramientas agrícolas y los medios para llevar a cabo esta investigación.

A mis abuelos Miguel Rodríguez y Aurora Zavala, por su cariño incondicional, por los cuales tengo ese cariño a la agricultura.

A toda la familia en general por sus felicitaciones.

A mis compañeros de clase por su mutuo apoyo.

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló con el objetivo de determinar la respuesta en el rendimiento y componentes del rendimiento del tomate (*Solanum lycopersicum*) por la aplicación foliar de nanopartículas metálicas de óxido de zinc (ZnO, 67 nm), óxido de hierro (Fe₂O₃, 27 nm) y óxido de cobre (CuO, 40 nm). El estudio se realizó en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UMSNH, en una estructura casa malla sombra de tecnología media se estableció tomate de crecimiento determinado. Se evaluaron ocho tratamientos: Zn, Cu, Fe, Zn+Cu, Cu+Fe, Zn+Fe, Zn+Cu+Fe y un testigo al que solo se le aplicó agua, se prepararon las soluciones foliares a una concentración de 10 mg L⁻¹ de agua destilada más un coadyuvante. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se registraron variables morfológicas, de rendimiento, componentes del rendimiento y de calidad. A los datos se les aplicó un análisis de varianza y prueba de Tukey al 5 %. Se encontró que la aplicación de nanopartículas mejoraron la producción de tomate, sin embargo, fue mayor el efecto cuando se suministraron en combinación el Zn+Cu+Fe, ya que las plantas presentaron los mayores incrementos en el número de flores (16.23%), número de racimos (14.27%), número de frutos por planta (49.08%), tallos productivos (52.1%), materia seca (28.4%), altura de la planta (6.22%); en el contenido nutrimental de Fe (26%), Zn (22%), Mn (9 %), Cu (44%) y se promovió la absorción de Ni (0.09 mg) y Mo (30 mcg). También aumentó el contenido de clorofila (23.5%), licopeno (51.33%). No hubo diferencias significativas en sólidos solubles, acidez titulable, firmeza y humedad. La relación beneficio-costos utilizando nanopartículas es de 1.28. Por lo que la aplicación de NP's de Zn+Cu+Fe son una alternativa para incrementar la producción y calidad de la producción de tomate bajo condiciones de agricultura protegida.

Palabras clave: agricultura protegida, contenido nutrimental, componentes de rendimiento, beneficio-costos

ABSTRACT

The present investigation was developed with the objective of determining the yield response and yield components of tomato (*Solanum lycopersicum*) by foliar application of metallic nanoparticles of zinc oxide (ZnO, 67 nm), iron oxide (Fe₂O₃, 27 nm) and copper oxide (CuO, 40 nm). The study was carried out at the Faculty of Agricultural Sciences of the UMSNH, in a shade mesh house structure of medium technology, determined growth tomato was determined. Eight treatments were evaluated: Zn, Cu, Fe, Zn+Cu, Cu+Fe, Zn+Fe, Zn+Cu+Fe and a control to which only water was applied, foliar solutions were prepared at a concentration of 10 mg L⁻¹ of distilled water plus an adjuvant. A randomized complete block experimental design with four replications was drawn. Morphological variables, fruit yield, yield components, as well as quality variables were recorded. An analysis of variance and Tukey's test at 5% were applied to the data. It was found that the application of nanoparticles improved tomato production, however, the effect was greater when Zn+Cu+Fe were supplied in combination, since the plants presented the greatest increases in the number of flowers (16.23%), number of clusters (14.27%), number of fruits per plant (49.08%), productive stems (52.11%), dry matter (28.42%), plant height (6.22%); in the nutritional content of Fe (26 %), Zn (22 %), Mn (9%), Cu (44%) and the absorption of Ni (0.09 mg) and Mo (30 mcg) was promoted. It also increased the content of chlorophyll (23.49%), lycopene (51.33%). There were no significant differences in soluble solids, titratable acids, firmness and moisture. The benefit-cost ratio using nanoparticles is 1.28. Therefore, the application of NPs of Zn+Cu+Fe are an alternative to increase the production and quality of tomato production under protected agriculture conditions.

Key words: protected agriculture, nutritional content, yield components.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE CUADROS	XII
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos.....	3
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Generalidades del cultivo del tomate.....	4
Situación actual del tomate en México	4
Origen y taxonomía.....	6
Análisis nutricional del tomate.....	7
Requerimientos edafoclimáticos para el cultivo.....	7
Requerimientos nutrionales del tomate	9
Nanopartículas de ZnO, CuO y Fe ₂ O ₃	10
MATERIALES Y MÉTODOS	36
Descripción del área de estudio.....	36
Localización.....	36
Clima.....	36
Metodología.....	37
Genotipo experimental.....	37
Establecimiento del experimento.....	38
Manejo de cultivo.....	43
Tratamientos en estudio	48
Diseño experimental	50
Variables de respuesta	52
Análisis estadístico.....	64

Análisis económico.....	64
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
Variables morfológicas.....	67
Variables de rendimiento y componentes.....	75
Variables de calidad.....	82
Análisis económico.....	100
CONCLUSIONES.....	103
LITERATURA CITADA	104
ANEXOS.....	124
Memoria de cálculo para determinar la utilidad y Beneficio-Costo	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
2.1	Tomate Bola (a), tomate Cherry (b) y tomate roma (c).....	6
2.2	Esquema de síntesis top-down y botton-up de nanopartículas.....	13
2.3	Insecto adulto de <i>Tribolium castaneum</i>	17
2.4	Deficiencias de hierro en plantas de tomate.....	23
2.5	Deficiencias de cobre en plantas de tomate.....	23
2.6	Deficiencias de zinc en plantas de tomate.....	24
2.7	Sección transversal de una hoja de planta de tomate.....	25
2.8	Absorción vía apoplasto (rojo) y absorción vía simplasto (negro) del consumo foliar.....	26
2.9	Diagrama esquemático de rutas de consumo y traslocación de NP's...	28
2.10	Mecanismo de absorción, translocación y la acumulación de nanopartículas, utilizando micrografía de la hoja (a), el tallo (b), muestra la acumulación foliar de acumulación y traslocación de nanopartículas de TiO ₂	29
2.11	Célula expuesta a las nanopartículas.....	31
2.12	Ruta metabólica de la reducción de especies reactivas de oxígeno (O ₂) a H ₂ O.....	34
3.1	Ubicación de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UMSNH.....	36
3.2	Tomate determinado variedad primus LF.....	37
3.3	Infraestructura acondicionada con malla sombra 30% y malla antiáfido en la parte lateral.....	38
3.4	Rastreado de suelo con el motocultor y formación de camas.....	38
3.5	Colocación de cintilla de riego.....	39
3.6	Colocación de acolchado plástico.....	39
3.7	Plántulas de tomate primus LF en charola antes de trasplantar.....	39
3.8	Tratamiento a plántulas en charola y su trasplante al suelo.....	40
3.9	Tanques de almacenamiento del sistema de riego.....	42
3.10	Bomba del sistema de riego.....	42
3.11	Potencial de hidrogeno (pH) y conductividad eléctrica de la solución nutritiva utilizada.....	45
3.12	Perfil de humedad relativa ambiental y temperatura (°C) dentro del invernadero en función de la hora.....	46
3.13	Aplicación de NP's con rociador en las primeras etapas fenológicas....	48
3.14	Nanopartículas de Zinc (a), nanopartículas de Hierro (b) y nanopartículas de cobre (c).....	49

3.15	Pesado de nanopartículas en balanza analítica de precisión.....	50
3.16	Recipientes utilizados para almacenar las soluciones preparadas.....	50
3.17	Distribución de los tratamientos dentro de la casa malla sombra.....	51
3.18	Cultivo de tomate determinado variedad Primus LF a los 110 DDT.....	51
3.19	Medición de número de frutos, peso promedio de frutos, diámetro polar y diámetro ecuatorial.....	53
3.20	Conteo de flores y número de racimos.....	54
3.21	Conteo de número de tallos productivos.....	54
3.22	Hojas y tallos en bolsas de tomate para la determinación del peso seco.....	55
3.23	Rodajas de tomate para deshidratación en estufa.....	55
3.24	Estufa para la deshidratación de fruto tomate.....	55
3.25	Preparación para el secado de los tallos de las plantas de tomate.....	56
3.26	Retiro de las hojas para preparar la muestra de secado de hojas.....	56
3.27	Ultracongelador Haier.....	57
3.28	Preparación de la maceración de las hojas con solución de acetona al 80 %.....	57
3.29	Muestras después de 48 horas, para leer su absorbancia.....	57
3.30	Curva de calibración para la determinación de concentración de licopeno en fruto tomate.....	59
3.31	Medición de los sólidos solubles en tomate determinado.....	60
3.32	Determinación de la acidez titulable.....	60
3.33	Medición de la firmeza en tomate determinado.....	61
3.34	Determinación del pH.....	61
4.1	Temperaturas máximas y mínimas durante 109 días del ciclo del cultivo.....	66
4.2	Humedad relativa en invernadero.....	66
4.3	Dinámica de altura de la planta en tomate determinado Roma, durante el ciclo del cultivo.....	67
4.4	Altura de planta en tomate determinado Roma, durante el ciclo del cultivo.....	68
4.5	Dinámica de diámetro de tallo de la planta en tomate determinado Roma, durante el ciclo del cultivo.....	70
4.6	Diámetro de tallo en tomate determinado roma a los 94 días después de trasplante.....	70
4.7	Número de hojas en tomate determinado roma a los 94 días después de trasplante.....	71
4.8	Número de tallos productivos en tomate determinado roma a los 94 días después de trasplante.....	72

4.9	Contenido de clorofila en hojas de tomate determinado roma, expresados en μg de clorofila por g hoja fresca.....	73
4.10	Rendimiento de fruto en tomate determinado roma por aplicación foliar de nanopartículas.....	76
4.11	Concentración de licopeno (mg Licopeno por g de MS) en fruto tomate.....	95
4.12	Producción de materia seca en función de la aplicación de NP's en plantas de tomate.....	96
4.13	Respuesta del vigor de las plantas derivado de la aplicación foliar de nanopartículas.....	98

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
2.1	Tabla nutricional de tomate roma por cada 100 gramos.....	7
2.2	Temperaturas apropiadas para el cultivo de tomate en las diferentes etapas del cultivo.....	9
2.3	Requerimientos nutricionales para el cultivo de tomate.....	9
2.4	Principales funciones de los micronutrientes de las plantas.....	21
2.5	Enzimas activadas por Fe, Cu y Zn.....	21
2.6	Principales especies reactivas de oxígeno, sus propiedades y sus principales sistemas de inhibición en célula de las plantas.....	31
2.7	Las reacciones enzimáticas más importantes en el sistema antioxidante, su localización e inhibición en ERO en las células de las plantas.....	32
2.8	Las reacciones no enzimáticas más importantes en el sistema antioxidante, su localización e inhibición en ERO en las células de las plantas.....	33
3.1	Fertilidad del suelo de la casa malla sombra.....	41
3.2	Resultados de análisis físico-químico del agua.....	41
3.3	Solución Steiner Universal para el cultivo de tomate.....	41
3.4	Solución Steiner ajustada.....	42
3.5	Solución Steiner ajustada para cada etapa fenológica del tomate.....	42
3.6	Cantidad de fertilizante suministrado en el cultivo de acuerdo a la solución Steiner al 100 %.....	44
3.7	Fuentes utilizadas para la preparación de la solución nutritiva.....	44
3.8	Propiedades Fisicoquímicas de nanopartículas.....	49
3.9	Absorbancia propuesta a diferentes concentraciones de licopeno (patrón).....	58
3.10	Adaptación de escala Likert de vigor en plantas de tomate.....	62
3.11	Operacionalización de variables.....	63
4.1	Número de frutos por planta y peso promedio de frutos en tomate determinado roma con aplicación foliar de nanopartículas.....	78
4.2	Diámetro polar y diámetro ecuatorial en frutos de tomate en función de la aplicación de NP's.....	80
4.3	Prueba de Tukey al 5% para las variables de respuesta Número de flores y número de racimos en plantas de tomate determinado.....	81
4.4	Contenido nutrimental en frutos de tomate en función de la aplicación de nanopartículas de metales pesados.....	83

4.5	Límites máximos de consumo recomendado de Fe (NIH, 2022) versus contenido de Fe por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.....	85
4.6	Límites máximos de consumo recomendado de Zn (NIH, 2022) versus contenido de Zn por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.....	86
4.7	Límites máximos de consumo recomendado de Mn (NIH, 2022) versus contenido de Mn por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.....	87
4.8	Límites máximos de consumo recomendado de Cu (NIH, 2022) versus contenido de Cu por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.....	87
4.9	Límites máximos de consumo recomendado de Ni (NIH, 2022) versus contenido de Ni por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.....	88
4.10	Límites máximos de consumo recomendado de Ni (NIH, 2022) versus contenido de Ni por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.....	89
4.11	Límites máximos de consumo recomendado de Mo (NIH, 2022) versus contenido de Mo por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.....	89
4.12	Comparativo nutrimental entre el testigo y plantas con aplicaciones foliares de NP's de Zn+Cu+Fe.....	90
4.13	Variables Solidos solubles (SST), potencial de hidrogeno (pH) y acidez (% ácido cítrico) en tomate determinado roma mediante aplicación de nanopartículas.....	91
4.14	Evaluación del sabor en tomate determinado roma de acuerdo a la escala de Catwell <i>et al.</i> (2007).....	92
4.15	Variables de respuesta de firmeza y humedad en tomate roma.....	93
4.16	Evaluación de la firmeza en tomate determinado roma de acuerdo a la escala de Catwell.....	94
4.17	Medidas de posición de las características de vigor en plantas de tomate.....	97
4.18	Utilidad y Beneficio-Costo en la producción de tomate con nanopartículas en plantas tratadas con NP's Zn+Cu+Fe.	100
4.19	Utilidad y Beneficio-Costo en la producción de tomate sin nanopartículas (testigo).....	101

INTRODUCCIÓN

El desafío mundial hacia el año 2050 de acuerdo a la FAO es garantizar a la humanidad la alimentación, inocua y nutritiva. Ante el aumento de población a través del tiempo, es un evento que no se puede parar, y como consecuencia demandará más alimentos; por lo tanto, es necesario innovar en la agricultura (Bharadwaj, 2016).

La nanotecnología es la ciencia que investiga, caracteriza, usa y manipula materiales a nano-escalas, cuyo rango en tamaño va de 1 a 100 nanómetros, esta escala está en el orden atómico y molecular (Záyago y Faladori, 2010). En la agricultura cuando las nano-partículas son aplicadas al follaje se absorben a través de los estomas y su translocación o transporte basipétalo hacia la base del tallo es por el floema; mientras que al ser aplicadas por el agua de riego penetran a través de la epidermis de la raíz y la corteza, posteriormente por la endodermis y finalmente entran al tejido conductivo del xilema para ser traslocados a larga distancia hasta las ramas y el follaje de las plantas (Peng *et al.*, 2015). La efectividad de la entrada y transporte está determinada por el tamaño de los poros de la pared celular, que están en el rango de 5 a 20 nm (Fleischer *et al.*, 1999), por lo tanto, las nanopartículas (NP's) tienen un tamaño menor al de los poros de la pared celular y como consecuencia pueden pasar con facilidad y penetrar al citoplasma celular.

Las NP's son utilizadas como nanofertilizante, y son aplicadas de manera foliar, generalmente a bajas concentraciones (10 ppm), con lo que se ha logrado promover el crecimiento de algunas plantas, la producción de biomasa seca, la longitud de la raíz, el contenido de clorofila y el rendimiento agronómico (Tarafdar *et al.*, 2014). Se menciona que el zinc es un micronutriente esencial para varias enzimas responsables de reacciones metabólicas (Shyla y Natarajan, 2014), también interviene en la elaboración de la clorofila, en la germinación, en la producción de polen y en la acumulación de biomasa (Nuñez *et al.*, 2017). En sorgo (*Sorgo bicolor*), la aplicación de NP's de ZnO a la concentración de 5 ppm aceleró el crecimiento de las plantas e incrementó el rendimiento agrícola (Dimkpa *et al.*, 2019).

Las NP's de CuO son usadas para la prevención y el control de enfermedades ocasionadas por bacterias fitopatógenas. Investigaciones demostraron la actividad antifúngica de las NP's de CuO con algunos hongos fitopatógenos como: *Phoma destructiva*, *Curvularia lunata*, *Alternaria alternata* y *Fusarium oxysporum* (Kanhed *et al.*, 2014). Mientras que Van Nguyent *et al.* (2022) demostraron que las aplicaciones foliares en maíz a concentraciones de 69.4 μM (4.41 ppm) mantuvieron el rendimiento de grano aún bajo condiciones de estrés hídrico, mientras que la producción de biomasa se incrementó.

La aplicación de NP's de Fe_2O_3 en las plantas participa en muchos procesos fisiológicos como la biosíntesis de la clorofila, la respiración y las reacciones redox (Zhuo y Zhang, 2011; Mimmo *et al.*, 2014; Zargar *et al.*, 2015). Mientras que Yuan *et al.* (2018) encontraron en plantas de pimiento morrón (*Capsicum annum*) con aplicaciones de NP's de Fe_2O_3 a las concentraciones de 0.05 mM (2.792 ppm) aumentaron el crecimiento.

El tomate es uno de los principales ingredientes en la gastronomía culinaria en el país, además de la importancia de ganancias económicas (Delices *et al.*, 2019); por otro lado los agricultores utilizan una mayor cantidad de plaguicidas para lograr los rendimientos esperados (Najera *et al.*, 2011), los efectos de la baja productividad están asociados con el cambio climático y la pérdida de la fertilidad de los suelos, esto promueve a los productores utilizar mayores cantidades de fertilizantes, y a utilizar infraestructuras de mayor nivel tecnológico y mano de obra más calificada; las cuales implican una mayor inversión inicial, estas condiciones orillan al mediano productor a desistir del cultivo de tomate (Terrazas-Mendoza *et al.*, 2010; Ortiz-Jiménez *et al.*, 2013); el uso de nanotecnología beneficia al productor, debido a que sus efectos elevan la productividad del cultivo aun con tecnología baja, por lo que este estudio permite evaluar el uso de las NP's de Zn, Cu y Fe como promotor del rendimiento económico a las condiciones normales de fertilización y manejo de plagas convencional.

Por tanto, la aplicación foliar de NP's en tomate determinado tipo Roma, bajo cubierta de malla sombra, podría beneficiar a la agricultura en el Valle de Apatzingán

en acortar los ciclos para la cosecha y aumentar el rendimiento económico, ya que una de las principales funciones de las NP's es maximizar sus funciones fisiológicas en la planta (Zhao *et al.*, 2014). De lograrse el objetivo de esta investigación, se podrá generar una alternativa de cultivo sustentable, rentable y ambientalmente amigable.

Objetivos

Objetivo General

Determinar la respuesta de la aplicación foliar de nanopartículas Zn, Cu y Fe sobre la producción de tomate determinado (*Solanum lycopersicum*) tipo Roma.

Objetivos Específicos

- Comparar el efecto de nanopartículas de ZnO, CuO y Fe₂O₃ sobre el rendimiento de fruto y componentes del rendimiento de tomate determinado tipo Roma.
- Determinar la nanopartícula(s) que incremente(n) la producción de tomate determinado y mejore las características funcionales de los frutos.
- Conocer el efecto de la aplicación de nanopartículas metálicas sobre variables morfológicas del tomate determinado tipo Roma
- Evaluar económicamente la aplicación de nanopartículas.

Hipótesis

Las nanopartículas metálicas de ZnO, CuO y Fe₂O₃ aumentan la producción en tomate determinado (*Solanum lycopersicum*) tipo Roma bajo condiciones de malla sombra.

REVISIÓN LITERATURA

Generalidades del cultivo de tomate

Situación actual del cultivo del tomate

México se posiciona en el noveno lugar como productor de hortalizas en el mundo, al alcanzar una producción de 14.1 millones de toneladas de una amplia variedad de especies, la más importante es el cultivo de tomate (SIAP, 2021), el cual representa el 36% entre las hortalizas cultivadas, en el año 2021 la superficie empleada para el cultivo fue 48,041.88 ha, que produjeron 3,324,263.09 t de fruto fresco.

De acuerdo a datos de la CANAPO (2021), para el año 2050 la población ascenderá a 148.2 millones de personas, de tal forma que se requiere asegurar la alimentación sana y una producción sustentable a las futuras generaciones, mediante la optimización de procesos productivos (Alteri *et al.*, 1994; FAO, 2021).

En septiembre del año 2021 se contaba con un total de 59,000 ha bajo agricultura protegida, de las cuales, 34,000 ha son utilizadas para la producción de hortalizas, 22,000 ha para berries y 3,000 en flores. Además, por su tecnología se distribuyen en 15,000 ha son invernaderos de plástico, 25,000 ha en malla sombra y las de mayor crecimiento con 19,000 ha en macrotúnel (Horticultivos, 2021).

En México hay estados que producen tomate a campo abierto, tales como Sinaloa, Sonora, Baja California, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Morelos y San Luis Potosí, que cubren la demanda interna y la exportación. La producción de tomate en invernadero en el país tiende a cubrir dos ventanas de comercialización, las cuales ocurren en julio, agosto y noviembre (SADER, 2022).

El 70% de la producción de tomate es bajo la modalidad de agricultura protegida, la adopción de una agricultura intensiva, conlleva a su vez a un manejo adecuado para lograr altos rendimientos utilizando genotipos de crecimiento indeterminados (Juaréz-Maldonado *et al.*, 2017). Las exportaciones de tomate entre enero y julio del 2021 fueron de 1,180,586 t (Inforural, 2022).

En el año 2021 el SIAP reporta 28,017.95 ha de superficie destinada a la producción de tomate rojo en agricultura protegida en México, la cual a su vez se distribuye en invernadero (11,879.73 ha), malla sombra (15,659.30 ha) y macrotúnel (478.92 ha) (SIACON-NG, 2022).

En Michoacán en el año 2021, los principales productores de tomate que utilizan tecnologías en agricultura protegida son los municipios de: Churintzio, Cuitzeo, La Piedad, Numerán, Tacámbaro, Tanhuato, Vista Hermosa y Yurécuaro; que en conjunto suman 999.97 ha en invernadero y logran rendimientos de fruto de 152.32 t ha⁻¹; en macrotúnel se tienen 394.50 ha, distribuidos en los municipios de Churintzio, Ixtlán, Tanhuato, Vista Hermosa, Yurécuaro y Zamora con rendimientos de 61.81 t ha⁻¹. Mientras que, en Apatzingán, aún no se utiliza este tipo de tecnología, sólo se lleva a cabo a campo abierto en 50 ha con rendimientos de 23.80 t ha⁻¹ (SIACON-NG, 2022).

En Sinaloa, los tomates determinados se siembran a 1.80 m entre camas de siembra y una separación entre plantas de 0.40 m a doble hilera en tres bolillo, se pueden tener densidades de siembra de 23,100 plantas ha⁻¹ y rendimientos de 59.94 t ha⁻¹ a 67.09 t ha⁻¹, dependiendo del material a utilizado (López-Santiago, 2019).

En México se siembran tres tipos principales de tomate: el tomate bola el cual es un fruto de color intenso en su madurez de consumo, es de pulpa carnosa de sabor más ácido que otros tipos de tomate, se usa principalmente para exportación y producción industrial de salsas, puré, jugo concentrado, deshidratado o enlatado para exportación (Figura 2.1a); el tomate cherry el cual se caracteriza por un sabor más dulce, su tamaño es parecido a una cereza, es un alimento bajo en calorías, fuente de nutrientes como potasio y magnesio, vitamina C, E y A; alto contenido de carotenos. Se utiliza principalmente en ensaladas (Figura 2.1b); por último, el tomate roma también conocido como tomate *saladette* el cual contiene pulpa abundante, un ligero sabor dulce, es fuente de potasio, magnesio y vitaminas B1, B2, B5 y C. Alta firmeza y vida de anaquel, no requiere grandes cantidades de agua (Figura 2.1c).

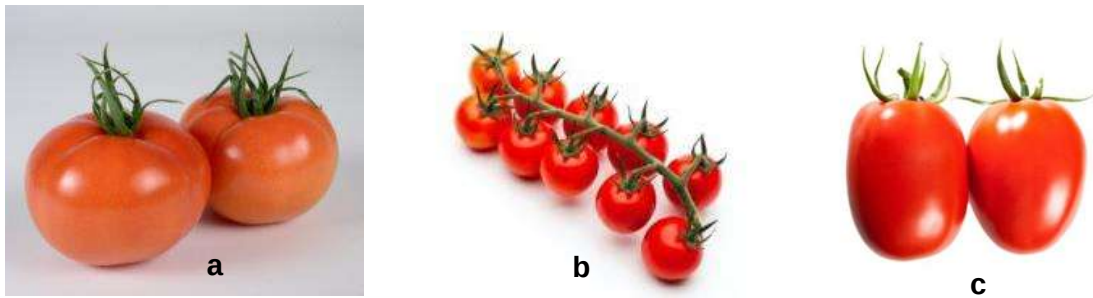


Figura 2.1 Tomate bola (a), tomate cherry (b) y tomate roma (c). Fuente: (Bayer, 2022).

Origen y Taxonomía

El tomate es originario de los Andes del Perú, el cual se encontraba de manera silvestre y era una fruta redonda de color rojo, posteriormente se esparció a lo largo de Sudamérica y América central en donde recibió el nombre de “xitomalt” en lenguaje Náhuatl, con el descubrimiento de Colon a mediados del siglo XVI llegó a Europa y se esparció por España, Italia y Francia y recibe su primer nombre científico *Solanum lycopersicum* por el naturalista Kart Linnaeus, y a partir del siglo XVI hasta la fecha se posicionó como un ingrediente principal en la preparación de distintos alimentos (Brouwer, 2006).

De acuerdo al United States Departament of Agriculture (USDA) y a Integrated Taxonomic Infomation System (ITIS), identifica al fruto en la siguiente clasificación taxonómica:

Reino: Plantae,
 Subreino: Tracheobionta,
 Superdivisión: *Espermatofita*,
 División: Magnoliofitas,
 Clase: Magnoliopside,
 Subclase: *Asteridae*,
 Orden: Solanales,
 Familia: Solanaceae,



Género: *Solanum*

Especie: *S. lycopersicum* L.

Variedad: Tomate tipo Roma

Análisis nutricional del tomate

Posee propiedades nutricionales importantes, produce los frutos con la mayor cantidad de licopenos y antioxidantes, características que contribuyen a disminuir el riesgo de contraer cáncer en el sistema digestivo, la próstata y el páncreas en los seres humanos, también posee altos niveles de potasio, vitamina A, vitamina C (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Tabla nutricional de tomate roma por cada 100 gramos (USDA, 2022; SiCarFarms, 2022).

Tabla nutricional			
Agua	94.5 g	Tiamina	0.037 mg
Energía	18 Kcal	Rivoflavina	0.019 mg
Proteínas	0.88 g	Niacina	0.594 mg
Lípidos totales	0.2 g	Acido Pantoténico	0.089 mg
Carbohidratos	3.92 g	Vitamina B6	0.08 mg
Fibra total	1.2 g	Folato total	15 mcg
Azúcar total	2.63 g	Ácido Fólico	0 mcg
Calcio	10 mg	Folato alimenticio	15 mcg
Hierro	0.27 mg	Vitamina A	833 UI
Magnesio	11 mg	Licopeno	2573 mcg
Fósforo	24 mg	Vitamina E	0.54 mg
Potasio	237 mg	Vitamina K	7.9 mg
Sodio	5 mg	Ácidos grasos saturados	0.028 g
Cobre	0.059 mg	Ácidos grasos monoinsaturados	0.031 g
Vitamina C	12.7 mg	Ácidos grasos polisaturados	0.083 g

Requerimientos edafo-climáticos para el cultivo

Suelo

Requiere suelos con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica, en suelos arcillosos y arenosos se desarrolla con un mínimo de 40 cm de profundidad. En cuanto el pH, el óptimo debe de oscilar entre 6 a 6.5 para que las plantas se desarrollen y dispongan adecuadamente de los nutrientes. Respecto a la salinidad

en el suelo y agua, se recomienda que no contengan conductividades eléctricas superiores a 3 dS m⁻¹.

Clima

Aunque el tomate se puede producir en una amplia gama de condiciones de clima y suelo, prospera mejor en climas secos con temperaturas moderadas, no obstante, el tomate es una especie de estación cálida, su temperatura óptima de desarrollo varía entre 18 y 30 °C, por ello el cultivo al aire libre se realiza en climas templados, las temperaturas mayores a 35 °C puede ocasionar diferentes trastornos, ya sea en la maduración, precocidad, color y fructificación; en temperaturas bajo 10 °C se afecta la formación de flores. La temperatura nocturna puede ser determinante en la producción, ya que cuando es inferior a 10 °C se originan problemas en el desarrollo de las plantas y frutos. También se provocan deformaciones (Cuadro 2.2) (INIA, 2017).

La combinación de altas temperaturas con humedad baja, puede generar aborto floral y baja viabilidad del polen (Alba-Sandoval *et al.*, 2014). El tomate requiere por lo menos ocho a 16 horas diarias de luz directa para florecer, estos valores reducidos pueden incidir de forma negativa sobre el proceso y la fecundación (Chemonics International Inc., 2008).

Con respecto a la humedad relativa, el cultivo requiere que oscile entre 60% a 80%, si las humedades relativas son altas, favorecen el desarrollo de enfermedades fungosas y bacterianas; además, se dificulta la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores. También está vinculado al agrietamiento de fruto o rajado, cuando se presenta un periodo de estrés hídrico y luego se produce un exceso de humedad en el suelo por riego abundante.

Cuadro 2.2 Temperaturas apropiadas para el cultivo de tomate en las diferentes etapas del cultivo (Torres, 2017).

Etapa y efecto		Temperatura
Se hiela la planta		-2 °C
Detiene su desarrollo		10 – 12 °C
Desarrollo normal de la planta		21- 24 °C
Germinación óptima		25 – 30 °C
Temperaturas óptimas		
Desarrollo	Diurna	23 – 26 °C
	Nocturna	13 - 16 °C
Floración	Diurna	23 – 26 °C
	Nocturna	15 – 18 °C
Maduración		15 - 22 °C

Requerimientos nutricionales del tomate

El rendimiento de fruto en invernaderos de baja tecnología es de aproximadamente 120 t ha⁻¹ en dos cosechas de acuerdo con Salazar *et al.* (2017) y los requerimientos nutrimentales se presentan en el cuadro 1.3.

Cuadro 2.3 Requerimientos nutricionales para el cultivo de tomate (INTAGRI, 2022)

Nutrimento	Consumo neto	
	kg por t de producción	kg para 67 t ha ⁻¹
N	2.1 – 3.8	140.7 – 254.6
P	0.3 – 0.7	20.1 – 46.9
K	4.4 – 7.0	314.9 - 469
Ca	1.2 -3.2	80.4 - 214
Mg	0.3 – 1.1	20.1 – 73.7

Nanopartículas de ZnO, CuO y Fe₂O₃

Antecedentes de la nanotecnología

La población en el mundo está en constante crecimiento, por lo tanto, también la demanda de alimentos y otros insumos se está incrementando; hoy en día el desafío de los investigadores en el área de la agricultura es innovar y desarrollar tecnologías que permitan garantizar la cantidad, calidad e inocuidad, mediante una producción sustentable (Lira-Saldivar *et al.*, 2018). Se estima que el crecimiento poblacional para el año 2050 será del 70% y 100% si la población continua en aumento (FAO, 2020). Hoy en día se procura maximizar la utilización de las tierras cultivables y usar fertilizantes sintéticos, plaguicidas, herbicidas y prácticas culturales. No obstante, no se logran los rendimientos esperados, debido a las pérdidas ocasionadas por las plagas, además, se tienen impactos negativos en el medio ambiente por la utilización de químicos para combatir las plagas (Lee *et al.*, 2017).

La agricultura en México en su mayoría tradicional, caracterizada por el uso excesivo e irracional de agroquímicos sintéticos. Así mismo, la importación mundial de plaguicidas en el año 2020 fue de 6,177,328.57 toneladas anuales, los diez principales importadores de plaguicidas son: USA, Brasil, Canadá, Australia, Francia, Nigeria, Alemania, China, Japón y Reino Unido (FAOSTAT, 2022). En un futuro se tendrán consecuencias en el deterioro de la salud del suelo, degradación de agro-ecosistemas, problemas de manejo de residuos, contaminación ambiental y la resistencia de los insectos a los tratamientos empleados. Por lo que se requiere una agricultura que sea incluyente en la utilización racional de pesticidas y fertilizantes, monitoreo y prevención mediante la implantación de un Manejo Integrado de Plagas (MIP), sin llegar al control, adoptar la cultura de uso de fertilizantes basada en análisis de suelo y foliar (Lira-Saldivar *et al.*, 2018).

Para lograr lo anterior, se debe de adoptar tecnologías que estén a la vanguardia y que además se alineen con la sustentabilidad y la seguridad alimentaria, la cuarta revolución verde ofrece el uso de nano-tecnología (Panwar *et*

al., 2012). Se han desarrollado nano-sensores utilizados para suministrar nutrientes a la planta o para el combate de patógenos; también se fabrican nanopartículas (NP's) que se utilizan para aumentar la eficacia de plaguicidas o fertilización foliar; otra aplicación es para desarrollar variedades de plantas que le permitan resistir a factores bióticos o abióticos extremos (Lira-Saldivar *et al.*, 2018).

La nanotecnología tiene sus orígenes con las investigaciones desarrolladas del físico estadounidense Richard Phillips Feynman, ganador del premio nobel de Física, el cual recibió en el año de 1959. Propuso manipular y fabricar artefactos con la precisión de unos pocos átomos; en el año 1974 se produjo el primer registro de una patente (Lira-Saldivar *et al.*, 2018).

Es utilizada en muchos campos de la ciencia como la física, la química, la medicina y hoy en día la nanotecnología es utilizada también en la agricultura moderna, los nanomateriales para la protección de la planta, nutrición y control de plagas. Investigaciones demuestran resultados eficaces que impactan de manera positiva en las funciones metabólicas en procesos de germinación y crecimiento de las plantas, control de insectos, control de malezas, como fungicidas, entre otros. (Tarafdar *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2015; Singh-Duhan *et al.*, 2017).

Definición de la nanotecnología

El diccionario de la RAE define la nanotecnología como la “tecnología de los materiales y de las estructuras, en las que el orden de magnitud se mide en nanómetros, con aplicación en la física, la química y la biología”.

Un nanómetro (nm) es la unidad de medida que se usa y corresponde a la millonésima parte de un milímetro, por lo tanto, esta tecnología manipula materiales con tamaños que oscilan entre 1 y 100 nm. Por ejemplo, un cabello humano tiene un grosor de entre 50,000 – 80,000 nm (Rahman *et al.*, 2011; Miguel-Rojas *et al.*, 2020).

Producción o síntesis de NP's metálicas

Las NP's se pueden producir o sintetizar por diferentes procesos industriales como la pirolisis, que permite la producción de materiales a gran escala como el humo de sílice por procedimientos a altas temperaturas. Las nano-estructuras con un tamaño de escala menor a 100 nanómetros (nm) pueden ser preparadas por descomposición no isotérmica en una atmosfera oxidante, por ejemplo, las nanoestructuras de sílice se pueden sintetizar a partir de la cáscara de arroz del que se obtiene un polvo uniforme ultrafino. Los nanohilos o nanoalambres, pueden ser sintetizados a partir de métodos vapor-líquido-sólido, con el uso de Galio (Ga) como catalizador y como fuente de sustrato al silicio (Si), con lo que se obtienen nanoalambres de SiO₂ muy finos, con diámetros de 50 nm a 100 nm y longitudes de 10 µm a 50 µm (Pukird *et al.*, 2017).

Las NP's metálicas y minerales pueden ser preparadas de dos formas: 1) llamado top-down y 2) el botton-up (Lira-Saldivar *et al.*, 2018). La primera consiste en la división de sólidos másicos en proporciones más pequeñas. Se involucran procesos de molienda o el desgaste, métodos químicos, y la volatilización de un sólido seguido por la condensación de los componentes volatilizados. La segunda consiste en la fabricación de las NP's a través de la condensación de átomos o entidades moleculares en una fase o una solución (Zanella, 2012; Hongda *et al.*, 2020), en la Figura 2.2 se esquematiza los dos procesos de obtención de NP's metálicas.

Actualmente está en desarrollo la producción de NP's de forma ecológica o denominado síntesis verdes, el cual es un método en el que se obtienen a partir de extractos vegetales. Este proceso es seguro, rentable y ecológico (Jonapá-Hernández *et al.*, 2020).

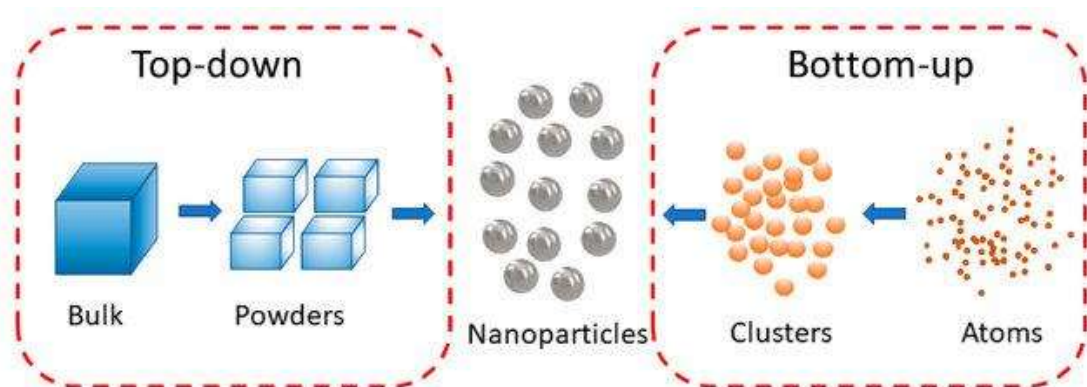


Figura 2.2 Esquema de síntesis top-down y bottom-up de nanopartículas (Hongda *et al.*, 2020).

Aplicaciones de NP's en la agricultura

La ciencia se enfrenta a problemas como el estancamiento del rendimiento de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de macro y micronutrientes, la disminución de la fertilidad del suelo, cambios multinutricionales, el cambio climático, la reducción de la disponibilidad de tierras cultivables, así como la escasez de agua y mano de obra (Shiva, 2016).

El uso de nanopartículas y nano-cápsulas para la liberación controlada de agroquímicos permiten reducir la cantidad de materia activa para aplicar en el campo, lo que se traduce en un menor impacto ambiental. La nano-capsulación permite diseñar agroquímicos con mayor selectividad y especificidad a la hora de ejercer su acción. La capacidad de unir en la superficie biomoléculas, como anticuerpos y ácidos nucleicos (ADN y ARN), posibilita actuar sobre agentes concretos, como pueden ser los fitopatógenos causantes de enfermedades, sin afectar a otros organismos beneficiosos (Rojas y Pérez-de-Luque, 2020).

La agricultura es el área en donde humanos y el medio ambiente interactúan para la producción de alimentos, a pesar del uso extensivo de agroquímicos, las pérdidas directas causadas por patógenos, animales y malas hierbas, causan entre el 20% a 40% o inclusive pueden llegar hasta el 50% de la productividad global (Pestovsky y Martínez, 2017). En un futuro la cantidad de productos con contenido de NP's se vendrá incrementando por encima de investigaciones pasadas que

mencionan un impacto negativo en humanos, animales y plantas; otras investigaciones demuestran que existen mayores beneficios (Mattiello y Marchiol, 2017).

Nanopartículas de Óxido de Zinc

Se ha demostrado que estas NP's reducen la presencia de enfermedades por su actividad antifúngica contra *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Apergillus fumigatus*, *Fusarium culmorum* y *Fusarium oxyporum*. También promueven el crecimiento de las plantas y calidad de los frutos, al incrementar la concentración de azúcar, además de tener efectos significativos en la germinación de semillas y en el crecimiento de plantas (Mendez-Argüello *et al.*, 2016).

En chícharo (*Pisum sativum*) la aplicación de NP's de Zn mejoró aspectos fisiológicos, como el incremento en el crecimiento de la raíz y el tallo, debido al aumento de la producción de ácido indolacético, el cual funciona como fitoestimulante hormonal, que promueve el crecimiento. El zinc se considera un microelemento esencial, que en pequeñas cantidades estimula el desarrollo vegetativo, al ser uno de los precursores en la producción de auxinas (fitorreguladoras del crecimiento), que promueven la elongación y división celular, también estimula la producción de clorofila y como consecuencia una mayor producción de fotosintatos, velocidad de germinación, producción de polen y biomasa (Tarafdar *et al.*, 2014; Mendez-Argüello *et al.*, 2016).

El zinc es un componente integral de la estructura de varias enzimas como las oxidorreductasas, las transferasas, las hidrolasas, las liasas, las isomerasas y las ligasas. También participa en la síntesis del ácido indolacético, que es una fitohormona necesaria para regular el crecimiento. Es un componente estructural de la enzima fosfatasa, la cual es necesaria para la movilización del nutriente fósforo en la rizosfera (Tarafdar *et al.*, 2014). También tiene uso en las infecciones bacterianas en la agricultura, en el tratamiento de agua y en el área de la cosmetología (Bedi y Kaur, 2015).

Sobre los beneficios del uso de NP's de Zn, Panwar *et al.* (2012) encontraron que el mayor crecimiento y la producción de biomasa en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*), se obtuvo con aplicaciones foliares de NP's de ZnO a concentraciones de 20 mL L⁻¹, y confirmaron que una ruta de la absorción de NP's es por medio de las estomas y su translocación basipétala es por la vía del floema.

Del mismo modo, Zhao *et al.* (2014) realizaron aspersiones foliares de NP's de ZnO a concentraciones de 10 mg kg⁻¹ en plántulas de garbanzo (*Cicer arietinum*), dando como resultados una mayor altura y biomasa seca.

A la vez Tarafdar *et al.* (2014) en mijo Perla (*P. americanum* L.) realizaron aplicaciones de NP's de ZnO a la concentración de 10 mg L⁻¹, y observaron que aumentó el área en la raíz (24.2%), hubo incremento en el contenido de clorofila (de 24.4% a 38.7%), en biomasa seca (12.5%), y en el rendimiento de grano (37.7%) con respecto al testigo.

Así mismo, Taheri *et al.* (2015), realizaron estudios en maíz (SC 704) utilizando fertirrigación a concentraciones de 2 mg L⁻¹ de NP's de Zn en tres etapas; una, dos, y tres semanas después de la emergencia, y observaron que se promovió el crecimiento en follaje (30%) y la cantidad de materia seca (39%) con respecto al control.

Paralelamente Raliya *et al.* (2015), realizaron estudios en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) con NP's de ZnO a concentraciones de 250 mg kg⁻¹ de forma foliar, y realizaron aspersiones a los 14 días después del trasplante. Las plantas mostraron incremento en altura (24.5%) y la longitud de la raíz (49.9%) con respecto al testigo. También encontraron que la manera de suministrar las NP's de ZnO tuvo efectos favorables en el rendimiento económico y calidad nutricional, con tratamientos en el suelo aumentó en 305.4% y con aplicación foliar incrementaron 81.9%, con respecto al testigo.

Méndez *et al.* (2016) aplicaron soluciones de NP's de ZnO puras y en combinación con Ag al 2.5% en chile (*Capsicum annuum* L.), fueron preparadas a la concentración de 50 mg L⁻¹ en agua des-ionizada. El suministro fue manual una

vez por semana, usaron 1 mL de la solución por planta para cubrir el follaje por día, durante 21 días, las plantas incrementaron la altura (16.8%), el área foliar (30.3%), la biomasa total (59.5%), la biomasa seca de la raíz (112.5%), la biomasa seca en tallo (76%), la longitud de la raíz (24.4%), el índice de clorofila (8%) y el número de hojas (32.6%).

La inducción de crecimiento se debe a que el zinc es cofactor de enzimas involucradas en el proceso fotosintético, así como la integridad y el mantenimiento de las membranas celulares de las plantas, mayor contenido de proteína, clorofila, carbohidratos, e induce la activación de enzimas antioxidantes, etc. (Mendez-Argüello *et al.*, 2016). También promueve el incremento del licopeno que es un antioxidante importante en la nutrición a aplicaciones de 100 mg kg⁻¹ NP's de ZnO en aspersiones foliares.

Del mismo modo, Raliya *et al.* (2015) menciona que el Zn interviene en un número de ciclos metabólicos y fisiológicos, incrementa la actividad del fósforo, moviliza enzimas como la fosfatasa y fitasa en la rizosfera, de esta manera incrementa disponibilidad de fósforo.

Nanopartículas Óxido de Cobre

El cobre es un elemento considerado como micronutriente esencial que interviene en muchos procesos fisiológicos. Se reporta que 1 kg de materia seca llega a contener 10 mg de este elemento. Algunos estudios muestran que el exceso de Cu afecta la asimilación de otros elementos como B, Mo, Mn, Mg, Zn y Fe (Taheri *et al.*, 2015; Rajput *et al.*, 2018).

Las NP's de CuO en la agricultura van teniendo importancia, ya que se le atribuyen propiedades antifúngicas y es un medio para el control de bacterias patógenas, y se considera una alternativa ecológicamente amigable (Banik y Perez-de-Luque, 2017). El depósito de las NP's de CuO en concentraciones altas en las hojas puede llegar a bloquear los estomas, por lo que se recomienda el suministro por irrigación (Rajput *et al.*, 2018).

Por lo tanto, el uso de estas nanopartículas en las plantas a las dosis recomendadas y en la etapa de desarrollo fenológico apropiado, es una opción contra las enfermedades causadas por virus (Vargas-Hernández *et al.*, 2020). Esto hace que puedan ser utilizadas como fertilizantes, para aumentar la producción de los cultivos. Actualmente se está buscando que el suministro en suelo sea de forma de liberación lenta y que puedan tener efecto durante años sin necesidad de volver a realizar aplicaciones de este elemento (Wang *et al.*, 2019). Con la utilización de NP's de CuO a concentraciones 100 mg kg⁻¹ se reduce la actividad microbiana del suelo (Simonin *et al.*, 2018).

Investigaciones que se han realizado, reportan resultados positivos en el control de *Tribolium castaneum* (Figura 2.3), los cuales provocan importantes pérdidas en cultivos que entran en las cadenas alimentarias humanas y animales. Así que las NP's de CuO sintetizadas biológicamente tienen actividad insecticida a bajas concentraciones contra plagas en productos almacenados (El-Saadony *et al.*, 2020).



Figura 2.3 Insecto adulto de *Tribolium castaneum* (SENASICA, 2022).

Asimismo, Hafeez *et al.* (2015), investigaron el efecto de NP's de CuO en la germinación de las semillas de trigo, después de una semana de su aplicación las dosis altas afectaron negativamente el proceso de germinación. A concentraciones bajas de 0.4 ppm promovieron la germinación, y al realizar aplicaciones en suelo a 30 ppm se incrementó el rendimiento de grano (52.5%), el área foliar (36.5%) y el contenido de clorofilas (17.3%) con respecto al testigo sin aplicación.

Rodríguez-Fernández (2016) aplicaron NP's de CuO a 5 y 10 ppm en tratamientos por 24 h en semillas de tomate colocadas en cajas Petri y papel filtro y observaron que promovieron el vigor de germinación de las semillas. A la

concentración de 10 ppm se incrementó la longitud del tallo con 5 ppm aumentó la longitud de la radícula.

Por otra parte, Lira-Saldivar *et al.* (2018) realizaron la aplicación de NP's CuO a la concentración de 5 ppm en chile ancho (*Capsicum annuum* L.), las plantas presentaron mayor vigor de germinación y se incrementó la longitud de la raíz, en 45.8 %.

Posteriormente, López-Vargas *et al.* (2018) estudiaron tratamientos de NP's de CuO, a la concentración de 250 ppm en *Solanum lycopersicum*, realizaron dos aplicaciones foliares; la primera a los 26 días después del trasplante y una segunda aplicación a los 46 días. Se encontró aumento de la firmeza del fruto, mayor vida de anaquel e incremento del contenido de vitamina C, de licopeno, fenoles y flavonoides.

Así mismo, Margenot *et al.* (2018) evaluaron el efecto de NP's de CuO en lechuga (*Lactuca sativa* L.) y zanahoria (*Daucus carota* L.), a los 10, 21 y 28 días después de la siembra, la aplicación se realizó al suelo a concentraciones de 0.8 a 798 mg L⁻¹. Encontraron que se redujo el crecimiento de la planta, por lo que el suministro de dosis altas es perjudicial para los cultivos.

Posteriormente, Van-Nguyen *et al.* (2022), utilizaron NP's de CuO en maíz LVN10 a concentraciones de 3.333 mg L⁻¹, 4.444 mg L⁻¹ y 5.556 mg L⁻¹, las aplicaciones fueron foliares a los 7, 14 y 21 días después de la siembra. Las plantas aumentaron el contenido de clorofila y carotenoides aún en condiciones de estrés hídrico, mejoraron las actividades enzimáticas de eliminación de especies reactivas de oxígeno en condiciones de estrés hídrico, con lo que se incrementó el total de granos y el rendimiento de grano.

Nanopartículas de Hierro

El hierro (Fe) es un elemento esencial para todos los organismos, el contenido de Fe en suelo es alto, pero se encuentra generalmente de forma insoluble como Fe³⁺, especialmente en suelos aeróbicos y con pH alto. Estos suelos

por lo general son deficientes en la disposición de este elemento. Las plantas usualmente absorben del suelo este elemento como Fe^{2+} . El Fe participa en diferentes procesos fisiológicos como la biosíntesis de la clorofila, la respiración, y en reacciones de reducción; la deficiencia de este elemento afecta el desarrollo, el crecimiento de la planta y el rendimiento agronómico (Mengment *et al.*, 2016).

Este elemento junto con el zinc, juega un papel importante en la activación de varias enzimas, involucradas en la absorción de los nutrientes, la biosíntesis de compuestos metabólicos y la formación de fitohormonas. La deficiencia en plantas puede causar necrosis en hojas, retraso en el crecimiento, reducción de tamaño y número de hojas, la calidad y el rendimiento agronómico (Mahmoud *et al.*, 2019), también interviene en la reducción del fosfato que se encuentra en el suelo, y de esta manera la planta puede disponer fácilmente de este nutrimento (Koopmans *et al.*, 2020).

Algunos estudios sobre el uso de NP's de Fe se presentan a continuación.

Megment *et al.* (2016) evaluaron diferentes concentraciones de NP's de Fe_2O_3 , y encontraron que el suministro a la concentración de 2 mg kg^{-1} promovió el aumento de producción de clorofila, de biomasa y el contenido de Fe en plantas de maní (*Arachis hypogaea L.*).

Más tarde Sheykhbanglou *et al.* (2018) realizaron aplicaciones foliares de NP's de Fe_2O_3 en las etapas de 4 hojas, 8 hojas y llenado de grano en soya (*Glycine max L.*), y registraron que la concentración de 0.75 g L^{-1} aumentó el contenido de proteínas en 33.8%, de lípidos en 25.4%, en comparación con las plantas del testigo.

Así mismo, Palchoudhury *et al.* (2018), investigaron el efecto de NP's de Fe_2O_3 como fertilizante para promover el crecimiento de las raíces en leguminosas, y los mejores resultados se lograron con la aplicación a concentraciones bajas ($\sim 5.54 \times 10^{-3} \text{ mg L}^{-1}$), con incrementos del 88% al 366% en materia seca de la raíz.

De igual forma, Yuan *et al.* (2018) demostraron que la aplicación de NP's de Fe_2O_3 a concentración de 0.05 mM en plantas de pimiento morrón (*Capsicum*

annuum L.), incrementó en 46% la altura de la planta, con respecto a las plantas sin aplicación. También propició el aumento del contenido de clorofila en un 79.36%.

Posteriormente Mahmoud *et al.* (2019) aplicaron NPs de ZnO (60 ppm), Fe₂O₃ (50 ppm) y estiércol de gallina en rábano rojo (*Rahanus sativus*), a los 30 días después de la siembra y a los 15 días. Además de los tratamientos, se suministraron la dosis recomendada de fertilizante, y obtuvieron incrementos significativos con respecto a las plantas del testigo, en altura (6.38%), área en hojas (5%), peso fresco en raíz (5.7%), peso seco de raíz (20.7%), diámetro de raíz (12%), contenido de clorofila en hojas (13.3%), carotenoides en hojas (13.2%) y rendimiento económico (13.1%).

Trabajos realizados por Boutchuen *et al.* (2019) donde utilizaron NP Fe₂O₃ encontraron que aún a concentraciones altas de 1.1 g L⁻¹ de Fe₂O₃ en leguminosas se incrementó el crecimiento vegetal de 230% a 280% dependiendo de las especies. Además, las plantas acortaron el tiempo a inicio de la producción de frutos, aumentaron al doble el número de frutos por planta y se incrementó la vida de anaquel en comparación con las plantas sin aplicación.

Micronutrientes Zn-Fe-Cu

Las concentraciones de los micronutrientes en las plantas son bajas en comparación con los macronutrientes, además de que cada elemento tiene diferente papel en el crecimiento y metabolismo de las plantas, las concentraciones más bajas de los micronutrientes se reflejan en su función como constituyentes de proteínas y como activadores de reacciones enzimáticas.

Funciones enzimáticas

Su presencia en grupos protéticos permite catalizar procesos redox de los elementos de transición Fe, Mn, Cu y Mo; también forman complejos enzimáticos ligando una enzima con un sustrato (Fe y Zn); también se conoce que varios micronutrientes (Mn, Zn y Cu) están presentes en las isoenzimas superóxido dismutasa (SD), las cuales actúan como sistemas de barrido para erradicar radicales de oxígeno toxico, protegiendo las bio-membranas, ADN, clorofila y

proteínas (Kyrkby y Römheld, 2008). En la Cuadro 2.4 se presentan las principales funciones de los micronutrientes:

Cuadro 2.4 Principales funciones de los micronutrientes de las plantas (Kirkby et al., 2008).

Micronutrientes	Función
Fe, Mn, Cu, Ni	Constituyente de las enzimas (metalproteínas)
Mn, Zn	Activación de enzimas
Fe, Cu, Mn, Cl	Involucrado en el transporte de electrones en la fotosíntesis.
Mn, Zn, Mo	Involucrado en la tolerancia del estrés
Cu, Mn, Zn, B	Involucrado en el crecimiento reproductivo (inducción a la floración, polinización, establecimiento del fruto).
B, Zn	Constituyente de paredes celulares y membrana.

Estos elementos también se consideran activadores metálicos de enzimas (Cuadro 2.5):

Cuadro 2.5 Enzimas activadas por Fe, Cu y Zn (Pérez-Leal, 2022).

Elemento	Enzima activada
Zn ²⁺	Deshidrogenasas, anhidrasa carbónica, ácido ribonucleico (ARN), ácido desoxirrinucleico (ADN) y polimerasa, superóxido dismutasa, ribulosa bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco)
Fe ²⁺ , Fe ³⁺	Citocromos, catalasas, ferredoxina, peroxidasas, nitritoreductasa. Tiene la afinidad para formar ligandos Fe-S (ácidos orgánicos, fosfatos), también tiene la posibilidad de cambio de valencia y puede intervenir en varios procesos fisiológicos.
Cu ²⁺	Citocromo oxidasa, tirosinasa, ácido ascórbico oxidasa, plastocianina.

Movilidad, contenido y transporte

Hierro

Es un elemento poco móvil, el hierro es uno de los elementos de mayor importancia en la formación de clorofila e indispensable para la fotosíntesis, el hierro es poco soluble y su disponibilidad en el suelo aumenta conforme el pH disminuye, se absorbe de forma catiónica Fe²⁺, en el suelo se encuentra como Fe³⁺, por lo que en la raíz se reduce a Fe²⁺ para ser transportado al interior de la planta hacia el citoplasma, es antagónico con Cu, Mn, Zn y Mo (Peñaranda, 2021).

El contenido normal en hortalizas es de 141-200 mg kg⁻¹ en materia seca (Infoagro, 2022), el Fe es mediante transporte activo a través del xilema, impulsado por la transpiración de la planta.

Cobre

La planta absorbe al Cu en su forma iónica o quelatada y lo almacena en forma de sales, es un elemento inmóvil dentro de la planta, su contenido normal puede ir de 1 a 25 ppm, participa en procesos enzimáticos involucrados en la formación y conversión de aminoácidos, así como en la desintoxicación de radicales libres superóxidos. El Cu antagoniza con el Fe, Mn y Zn, también, altas cantidades de fosfato reduce la disponibilidad, al igual que altas concentraciones de N, además conforme aumenta el pH decrece la disponibilidad del Cu en el suelo (INTAGRI, 2022).

Zinc

El Zn es absorbido principalmente como Zn²⁺, la disponibilidad se reduce conforme aumenta el pH, por altos niveles de fósforo y cobre, altas concentraciones de hierro y manganeso (Fertilab, 2022), es un elemento esencial, el contenido oscila entre 15 y 20 mg kg⁻¹ de materia seca. El Zn es necesario para llevar a cabo el metabolismo de los ácidos nucleicos, ya que este elemento forma parte de enzimas y proteínas que están involucradas en la síntesis y expresión del ADN, tales como polimerasas de ADN y de ARN, es indispensable para la fotosíntesis y en el metabolismo de los carbohidratos, mantiene activo el fotosistema II. Es un elemento poco móvil dentro de la planta.

Es un elemento inmóvil en el suelo por lo que la absorción por la planta está limitada por la tasa de transporte hacia las raíces que ocurre principalmente por difusión y en menor proporción por flujo de masas, una vez absorbido es transportado por el xilema y el floema como ion libre (Peñaloza, 2022), es antagonístico del magnesio, hierro, manganeso, cobre y por excesos de fósforo (INTAGRI, 2022).

Deficiencias en plantas

Hierro: La carencia se detecta en las hojas jóvenes, apareciendo una amarillez en la parte inferior del folíolo. Inciden en la carencia: en suelos con poca aireación, baja temperatura, altos contenidos de calcio y fósforo, alta predisposición varietal (Figura 2.4).



Figura 2.4 Deficiencias de hierro en plantas de tomate. (Montana State University, 2022).

Cobre: La carencia aparece en las hojas jóvenes, presentando una decoloración de nervaduras y enrollamiento hacia el envés (Figura 2.5).



Figura 2.5 Deficiencias de cobre en plantas de tomate (FAO, 2022).

Zinc: Los síntomas de carencia aparecen en las hojas bajas y medias de la planta. Presenta decoloración inercial, que en sus inicios es difícil de distinguir y posteriormente se parece a la de magnesio (Figura 2.6).



Figura 2.6 Deficiencias de zinc en plantas de tomate. Fuente: (FAO, 2022).

Absorción de nutrientes vía foliar

La fertilización foliar es una forma utilizada para el manejo sostenible y productivo de los cultivos, se hace uso de la nutrición foliar cuando existe limitaciones de los nutrimentos en el suelo, en condiciones en donde existen altas tasas de pérdida de nutrientes aplicados al suelo y cuando en etapa de crecimiento de la planta, la demanda interna y las condiciones ambientales interactúan para limitar el suministro de nutrimentos a órganos vitales de la planta.

La principal vía de absorción en fertilización foliar es a través de las hojas, que incluye procesos de absorción, penetración a través de la cutícula, absorción en las células metabólicamente activas de las hojas y finalmente la traslocación hacia los órganos donde la planta requiere estos elementos (Figura 2.7).

Las células epidérmicas de la superficie aérea de la planta, se encuentra cubierta por una capa extracelular, conocida como cutícula, que es la interfaz entre los órganos de la planta y el medio ambiente, esta cutícula protege órganos de la planta de factores de estrés biótico y abiótico, se conforma de un material ceroso

que tiene propiedades hidrofóbicas, la absorción foliar se logra a través de poros hidrofílicos que se encuentran en la cutícula, y en la epidermis de la planta contiene tricomas y estomas que influyen en la absorción de nutrientes foliares (Fernández, 2013).

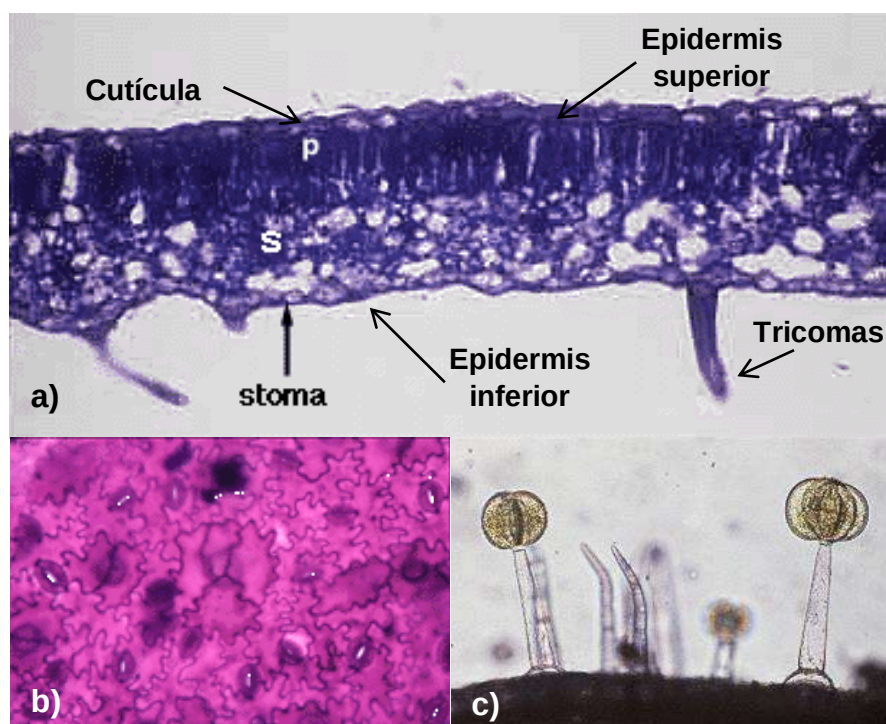


Figura 2.7 a) Sección transversal de una hoja de planta de tomate (p: mesófilo empalizada, s: mesófilo esponjoso, b) Estomas y c) Tricomas. (Fuente: Tomato Anatomy).

La cutícula es de carácter hidrofóbico y adicionalmente las superficies vegetales poseen células epidérmicas modificadas como tricomas y estomas. Por lo tanto, La absorción de soluciones nutritivas por la superficie de la planta puede ocurrir a través de la cutícula, grietas o irregularidades de la cutícula y estomas, tricomas, lenticelas u otras posibles estructuras epidérmicas, se ha demostrado que La cutícula posee una carga negativa lo que favorece la absorción de iones positivos (Murillo-Castillo *et al.*, 2013).

Una vez que penetran en la hoja hay dos vías de absorción, la primera ruta es por medio del apoplasto (espacios intercelulares) de la hoja esta se encuentra ocupados por nutrientes, aire y agua. La segunda ruta es por medio del simplasto

(espacios intracelulares) de cada célula individual, el cual tiene el papel del intercambio de iones y como barrera de difusión (Figura 2.8).

Los nutrientes esenciales se clasifican en altamente móviles (N, P, K, Mg, S, Cl, Ni) y poco móviles (Fe, Zn, Cu, B, y Mo) e inmóvil (Ca, Mn) en relación a su movilidad en el floema (Fernández and Brown, 2013).

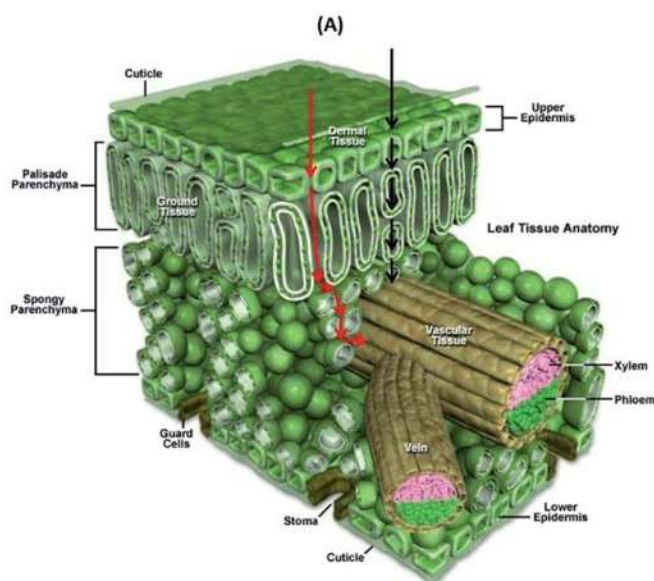


Figura 2.8 Absorción vía apoplasto (rojo) y absorción vía simplasto (negro) del consumo foliar. Imagen recuperada de: <http://www.molecularexpressions.com> de la Universidad de Florida con permiso de Ercik Clark.

Estudios revelan que la penetración de las sustancias a través de la cutícula es de manera pasiva. La fertilización foliar consiste en aplicar disoluciones de nutrientes sobre el tejido foliar, esto permite que la planta obtenga los nutrientes de manera rápida, permitiéndole corregir deficiencias nutricionales (Weinbaum *et al.*, 2002).

La absorción foliar de NP's a través de la hoja, es de la misma forma que los nutrientes convencionales, mediante tres procesos:

1. *Retención de la disolución en el follaje*, consiste en la aplicación por aspersión sobre la superficie de las hojas, en productos convencionales se recomienda que esté en contacto entre 3 y 4 horas (Fageria *et al.*, 2009).

Los factores abióticos favorecen la permeabilidad de los nutrientes, la humedad relativa es alta, temperaturas medias de 20 °C, el uso de agentes tensoactivos, permiten que los nutrientes permanezcan en contacto con la superficie de la hoja (Stevens *et al.*, 1988).

2. *Transporte de los nutrientes a las células*, los nutrientes son transportados a través de las diferentes capas de las hojas, hasta llegar a las células epidermales (Murillo-Castillo *et al.*, 2013).

Investigaciones realizadas por Li *et al.* (2018) en soja (*Glycine max*) y *S. lycopersicum* a los 14 días después del trasplante, utilizaron un analizador de partículas μ XFM para determinar la velocidad de transporte de la NP de Zn y mencionan que en solo 15 minutos se transportó el Zn desde la cutícula hacia los tejidos inferiores de la hoja y en comparación al utilizar una fuente ZnSO_4 la cual fue de 6 horas.

3. *Movimiento del nutriente hasta los órganos*, los nutrientes se transportan desde las células epidermales hasta los órganos donde la planta los requiera, los nutrientes atraviesan los espacios intercelulares (apoplasto) o células de diferentes tejidos (simplasto), hasta llegar al tejido vascular (xilema y especialmente floema), y como resultado final una movilidad alta del nutriente (Murillo-Castillo *et al.*, 2013) (Figura 2.9).

Mecanismos de transporte

Las nanopartículas aplicadas de manera foliar pueden penetrar en las hojas a través de las estomas o a través de la cutícula, esta actúa como primera barrera, restringiendo la entrada a partículas por debajo de 5 nm; la NP's mayores a 10 nm pueden entrar a través de las estomas, y el transporte celular ocurre a través de las rutas apoplasto y simplasto dentro del sistema vascular de la planta. Mientras que las NP's de tamaño de 10 a 50 nm su transporte es por medio de la ruta

citoplasmática, además, las NP's de tamaño entre 50 y 200 nm son transportadas a través de la ruta apoplastica (Ruttkey *et al.*, 2017; Jitao *et al.*, 2019; Ahmed *et al.*, 2021).

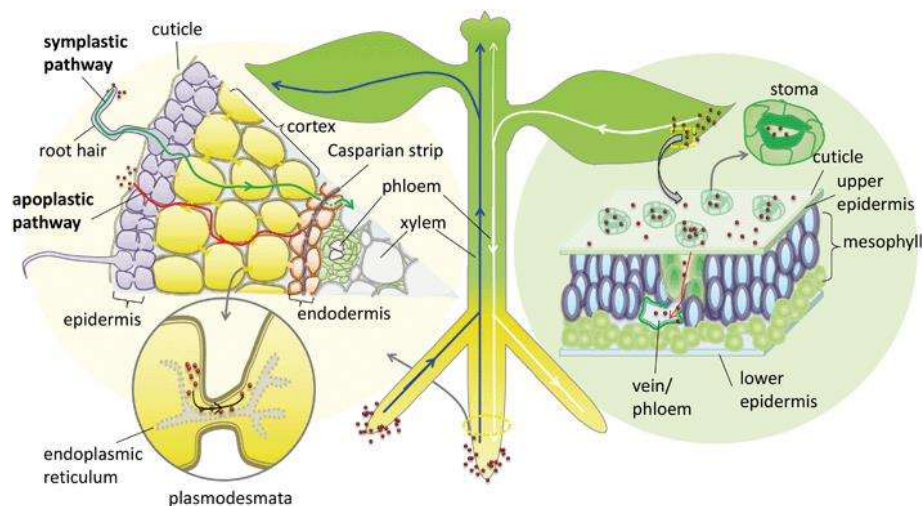


Figura 2.9 Diagrama esquemático de rutas de consumo y traslocación de NP's (Jitao *et al.*, 2019).

Estudios sobre la penetración de las NP's a través de la cutícula mencionan que es por medio de procesos pasivos y no mediado por energía (Peng *et al.*, 2015). De igual manera, las investigaciones realizadas por Su *et al.* (2019) menciona que las NP's tienen una carga neutra y un tamaño de partícula que propicia la absorción pasiva de estas hacia las células, y mientras la planta tenga abiertas las estomas, las nanopartículas pueden transportarse a través del floema y xilema en una velocidades de 6 m en 24 horas, existe el antecedente de Fernández *et al.* (2005) que al aplicar de forma foliar quelatos de Fe no cargados, demostraron que se puedan penetrar, transportarse y translocarse.

En cambio, cuando se usan sales de nutrientes, estas tienen cargas positivas y pueden unirse potencialmente a los grupos carboxilo e hidroxilo libres existentes y presentes en la cutícula, la cual actúa como una membrana de intercambio de iones, este fenómeno es más fuerte cuando se considera la difusión de nutrientes a través de las paredes celulares, el cual es un requisito previo para la traslocación de elementos minerales aplicados de forma foliar (Fernández y Brown, 2013).

Internamente las NP's son transportadas en unión con el flujo de la savia por el floema y xilema, y estas pueden transportar y acumular en los diferentes órganos de la planta, en raíces, fruta, granos, hojas jóvenes, etc. (Shahid *et al.*, 2021).

Metabolismo de la aplicación foliar de nanopartículas

El consumo, traslocación y acumulación de las NP's en la planta depende de la fisiología y estructura de las células vegetales, el nanomaterial, la interacción con el suelo, la estabilidad de las nanopartículas, promueven cambios en los estadios morfológicos y fisiológicos. Estos efectos se pueden manifestar de manera positiva o inclusive de manera negativa (Husen *et al.*, 2014; Janmohammadi *et al.*, 2016; Shahid *et al.*, 2021).

Investigaciones realizadas por Raliya *et al.* (2015), propusieron un mecanismo de la translocación de NP's de óxido de zinc en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Primero, la asimilación de las nanopartículas de óxidos metálicos, depende del tipo de planta, edad, y las propiedades de las nanopartículas, así como de su morfología; mencionan que las NP's son transportadas por el floema en ambos sentidos (Figura 2.10).

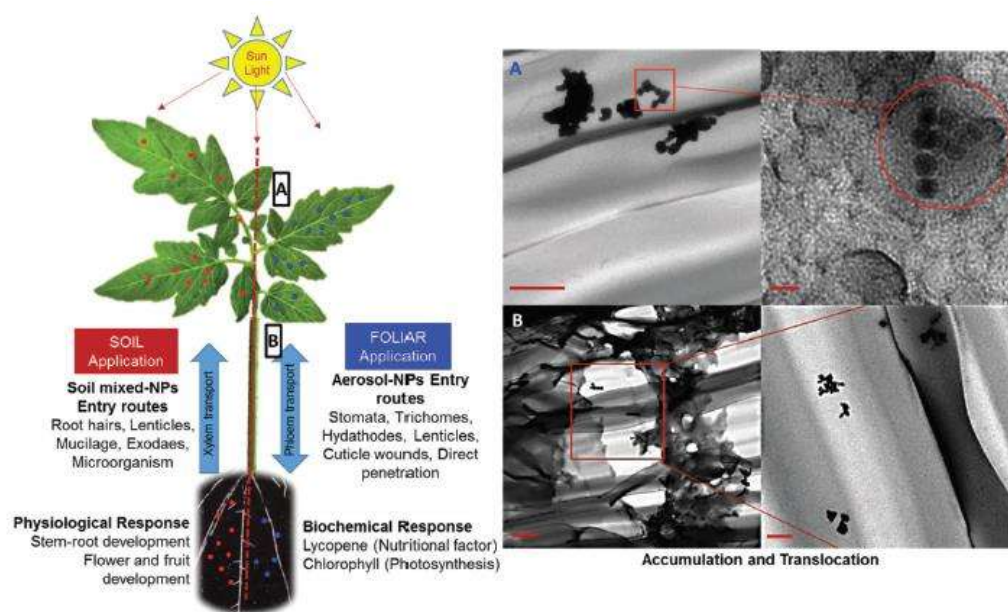


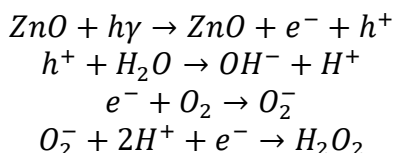
Figura 2.10 Mecanismo de absorción, translocación y la acumulación de nanopartículas, utilizando micrografía de la hoja (a), el tallo (b), muestra la acumulación foliar de acumulación y traslocación de nanopartículas de TiO_2 .

Misma propuesta indican Zhao *et al.* (2016), quienes sometieron plantas de lechuga a NP's de cobre a concentraciones de 1050 – 2100 mg L⁻¹ en aplicaciones foliares durante un mes, y encontraron que del 97% al 99% del Cu aplicado se absorbió en las hojas y solo 1% al 3% se transportó por el floema a la raíz, esto muestra evidencia que el transporte depende del tipo de planta.

Las NP's una vez que se encuentran dentro de la planta, pueden ocurrir transformaciones abióticas o bióticas, reacciones redox, agregación y disolución de las NP's en la rizosfera. En los últimos diez años se han utilizado técnicas analíticas especializadas para poder detectar la ubicación de las NP's dentro de la planta, a nivel celular y subcelular, existen propuestas para explicar cómo se metabolizan las NP's (Jitao *et al.*, 2019).

Las NP's interfieren en el metabolismo de las plantas a través de la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO) y el metabolismo aeróbico de las plantas, utilizan el oxígeno como aceptor final de electrones, y de esta forma se producen las ERO (Figura 2.11). La generación de ERO se puede dar en medios adversos como a causa de factores bióticos como el ataque de patógenos o condiciones de estrés abiótico como altas temperaturas, sequía, salinidad, alta radiación solar, en estas condiciones el O₂ influye negativamente (Mehrnaz *et al.*, 2017; Scarpeci *et al.*, 2009).

Una vez que las NP's penetran en la célula vegetal, se separan los elementos de la nanopartícula metálica. Según Hongda *et al.* (2020) las reacciones para la obtención de especies reactivas del oxígeno a partir de las nanopartículas de ZnO, son las siguientes:



En donde: ZnO: Nanopartículas de óxido de zinc; $h\nu$: energía de fotón; e^- : electrón; h^+ : estado vacío (hueco); H_2O : molécula de agua; $\text{HO}^\cdot$ – radical hidroxilo; H^+ : ion hidrogeno; O_2^- : radical superóxido; H_2O_2 – peróxido de hidrogeno.

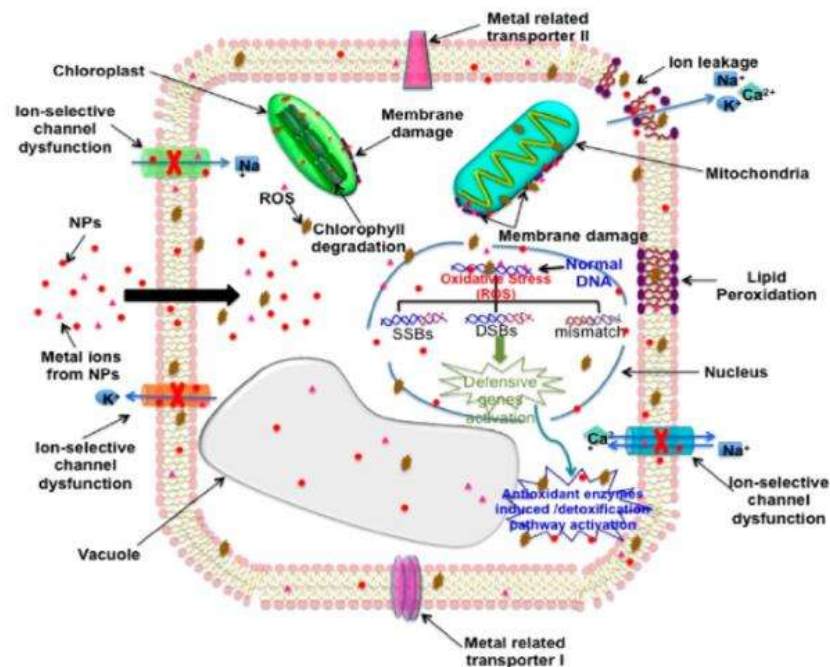


Figura 2.11. Célula expuesta a las nanopartículas (Ma *et al.*, 2016).

Las NP's metálicas son capaces de producir diferentes ERO, ya que pueden participar en distintos tipos de reacciones en las que pueden sufrir procesos de oxidación o reducción; mientras que las NP's Fe_2O_3 y de ZnO pueden generar H_2O_2 y $\text{OH}^\cdot$, las NP's de CuO pueden producir los cuatro tipos de oxígeno reactivo, por tanto, el $\text{O}_2^\cdot$ y el H_2O_2 , son causantes de reacciones de estrés menos agudas y son neutralizadas por antioxidantes endógenos (Cuadro 2.6) (Vázquez-Olmos *et al.*, 2018; Karuppanapandian *et al.*, 2011).

Cuadro 2.6 Principales especies reactivas de oxígeno, sus propiedades y sus principales sistemas de inhibición en célula de las plantas.

ERO	Tiempo medio y movilidad	Modo de acción	Sistema principal de mitigación
Superóxido $\text{O}_2^\cdot$	1 μs , 30 nm	Reacciona con S-Fe, Óxido nítrico (NO).	Superóxido dismutasas
Hidroxililo $\text{OH}^\cdot$	1 μs , 1 nm	Extremadamente reactivo con proteínas, lípidos, DNA y otras macromoléculas.	Flavonoides, prevención de formación de $\text{OH}^\cdot$ por secuestro de Fe.
Peróxido de hidrogeno H_2O_2	1 ms, 1 μm	Oxida proteínas con $\text{O}_2^\cdot$ y como catalizador el Fe forma $\text{OH}^\cdot$.	Catalasas, varias peroxidasas, peroxirredoxinas y flavonoides.
Oxígeno singlete $^1\text{O}_2$	1 μs , 30 nm	Oxida directamente proteínas, ácidos polisacáridos grasos y DNA.	Carotenoides a y α -tocoferoles.

La activación del O₂ también se inicia con la transferencia de los electrones desde la clorofila al O₂ cuando la molécula absorbe energía lumínica; la consecuencia de esta foto-activación es la producción del oxígeno singlete (¹O₂) , y también puede ocurrir por la transferencia de uno, dos o tres electrones, para generar radicales superóxidos (O₂⁻), peróxido de hidrógeno (H₂O₂) o el radical hidroxilo (OH⁻), al generarse estas ERO en condiciones estándar se metabolizan rápidamente por el sistema de defensa antioxidante de la planta (Cuadro 2.7 y 2.8) (Apel *et al.*, 2004).

Cuadro 2.7 Las reacciones enzimáticas más importantes en el sistema antioxidante, su localización e inhibición en ERO en las células de las plantas (Karuppanapandian *et al.*, 2011).

Enzimas antioxidantes	Reacción Catalizada	Ubicación celular
Catalasa	$2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Peroxisomas, glioximas y mitocondria
Ascorbato peroxidasa	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{AA} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{DHA}$	Citosol, peroxisomas, cloroplasto y mitocondria
Guaiacol peroxidasa	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{DHA} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{GSSG}$	Cloroplasto, citosol, Mitocondria y retícula endoplasmático
Superóxido dismutasa	$\text{O}_2^- + \text{O}_2^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	Citosol, cloroplasto, peroxisomas y mitocondria.
Monodehidroascorbato reductasa	$2\text{MDHA} + \text{NADH} \rightarrow 2\text{AA} + \text{NAD}^+$	
Monodehidroascorbato	$\text{DHA} + 2\text{GSH} \rightarrow \text{AA} + \text{GSSG}$	Cloroplasto, Mitocondria y Citosol.
Glutación reductasa	$\text{GSSG} + \text{NADPH} \rightarrow 2\text{GSH} + \text{NADP}^+$	

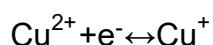
Abreviaciones: ¹O₂: oxígeno singlete; AA: ácido ascórbico; DHA: dehidroascorbato; GSSG: glutatión oxidada; MDHA: monodehidroascorbato; NADH: nucleótido Nicotiamida adenina dinucleótido; NAD⁺: especie reducida de nicotiamida adenina dinucleótido. GSH: glutatión ensima; NADPH: Nicotiamida adenina dinucleótido fosfato; NADP: forma reducida de Nicotiamida adenina dinucleótido fosfato.

Cuadro 2.8 Las reacciones no enzimáticas más importantes en el sistema antioxidante, su localización e inhibición en ERO en las células de las plantas (Karuppanapandian *et al.*, 2011).

Enzimas antioxidantes	Reacción Catalizada	Ubicación celular
Ácido ascórbico	Sustrato para APX, desintoxica H ₂ O ₂	Cloroplasto, citosol, peroxisomas, vacuola y apoplasto
Glutación	Sustrato para POXs, GSTs y GR, desintoxica de H ₂ O ₂ , otras hidroperoxidasas y compuestos tóxicos.	Cloroplasto, citosol, peroxisomas, vacuola y apoplasto
Tocoferoles.	Protege la membrana lipídica de peroxidación, desintoxica de peróxidos lipídicos e inhibe ¹ O ₂ .	Membranas
Carotenoides	Inhibe ¹ O ₂ , influye en componentes clave en el fotosistema, precursores del ácido abscísico ABA.	Cloroplasto, cromoplastos, apoplasto, y amiloplasto.
Flavonoides	Puede inhibir directamente H ₂ O ₂ y OH ⁻ .	Vacuola

Abreviaciones: APX: ascorbato peroxidasa; POXs: peroxidasas; GSTs: glutación-S-transferasa; GR: Glutathion reductasa.

Los estudios de Wei y Wang *et al.* (2013) demostraron que las NPs de Fe₃O₄ y CuO realizan acciones que imitan la actividad de la catalasa; exhibieron la actividad de peroxidasa (Adrees *et al.*, 2015). Una vez que las nanopartículas se separan del oxígeno quedan libres como elementos Fe³⁺, Cu²⁺, y Zn²⁺, los metales en transición Fe³⁺ y Cu²⁺ tienen varias valencias y los cambios de valencia los hace aceptar o donar electrones individuales, mientras que el Zn²⁺ solo tiene una valencia, esta característica de Fe³⁺ y Cu²⁺ los hace muy buenos promotores de las reacciones de radicales libres O₂⁻ y H₂O₂ en el radical OH⁻ (Carvajal, 2019), las cuales pueden ser removidas por el sistema antiestrés de la planta (Figura 2.12).



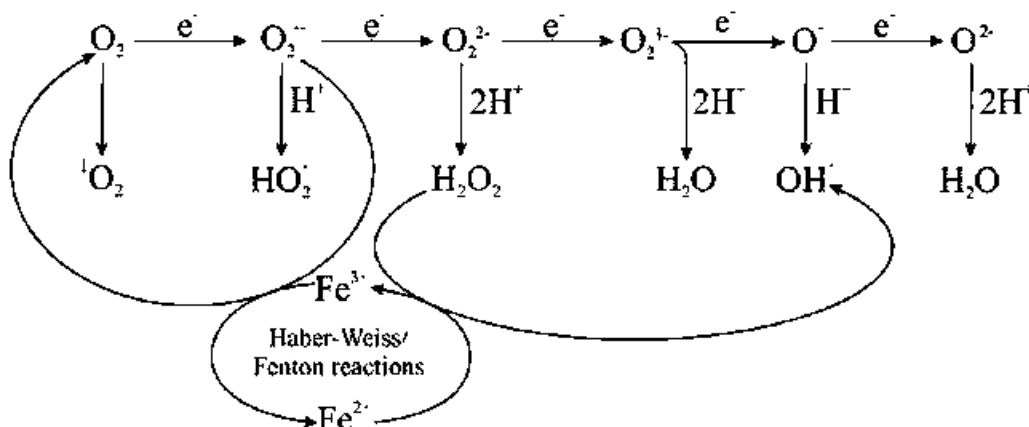


Figura 2.12 Ruta metabólica de la reducción de especies reactivas de oxígeno (O_2) a H_2O , a través de la generación intermedias de especies reactivas de oxígeno (ERO) en plantas. La reducción del O_2 por la adición de un e^- resulta en la generación del radical superóxido ($O_2^{\cdot-}$). A bajo pH, la dismutación del $O_2^{\cdot-}$ es inevitable, por una ruta es reducido al radical hiperoxido ($HO_2^{\cdot}$) por la adición de protones (H^+), y por otra por una ruta es oxidado a $O_2^{\cdot-2}$ seguido de una protonación ($2H^+$) resultando en la generación del peróxido (H_2O_2). Adicionalmente, el ($O_2^{\cdot-}$) puede donar un e^- al hierro (Fe^{3+}) para ser reducido a (Fe^{2+}) el cual puede reducir el peróxido de hidrogeno (H_2O_2), produciendo la dismutación de $O_2^{\cdot-}$ a radical hidroxilo ($OH^{\cdot}$). La reducción de $O_2^{\cdot-}$ y H_2O_2 y la generación rápida de Fe^{2+} para formar $OH^{\cdot}$ se le denomina reacción de Haber-Weiss, en el paso final que involucra la oxidación del Fe^{2+} por H_2O_2 es conocida como la reacción de Fenton. Cuando $OH^{\cdot}$ es reducido más adelante es cuando se forma el H_2O . Otras ERO como oxígeno singlete ($^1O_2$), pero no hay adición de un e^- extra formar O_2 , se lleva cabo mediante la elevación de un e^- a un nivel más alto de energía, liberando así oxígeno en estado spin-restringido. Abreviaciones: $O_2^{\cdot-2}$: peroxidasas ion; $O^{\cdot-}$: oxeno ion; O^{2-} : oxido ion. (Karuppanapandian, 2011).

A pesar de que el Cu puede formar las cuatro formas reactivas, el oxígeno singlete ($^1O_2$) se forma principalmente por el exceso de energía solar, la producción elevada de esta ERO induce en los vegetales respuestas como muerte celular programada, es decir, la muerte fisiológica controlada de las células afectadas que evita, por ejemplo de aquellas que son provocadas por patógenos, se ha demostrado que para que este proceso suceda se requiere que las células

vegetales tengan cloroplastos funcionales y que el oxígeno se genere en el interior de dicho orgánulo (Gutiérrez *et al.*, 2014). Se sugiere que la producción de H_2O_2 tiene el propósito de proteger a las plantas del estrés lumínico; esta producción es inducida por la aplicación de NP's Zn (Kim *et al.* 2008).

Impacto ambiental de las NP's

Concentraciones altas de NP's Cu son perjudiciales para los microorganismos beneficios del suelo, los cultivos agrícolas, los animales acuáticos y las plantas. Las NP's a base Cu son absorbidos por organismos (eficiencia interna) o adsorbidos en estructuras externas (eficiencia externa), por lo tanto, se requiere una investigación más profunda para determinar el impacto de las NP's en el suelo (Rajput *et al.*, 2019).

Al utilizar concentraciones altas de NP's se puede generar efectos toxicológicos en lechugas, tomates, trigo y melón. Es necesario crear normativas estrictas y eficientes para prevenir el mal uso de esta tecnología (Paramo *et al.*, 2020).

Los mecanismos de nano-toxicidad siguen siendo desconocidos, están estrechamente relacionados con el producto químico, composición, estructura química, tamaño de partícula y área de superficie. La toxicidad de las NP's se le atribuyen a dos acciones: una toxicidad química en base a la liberación de iones tóxicos y el estrés o estímulos causados por la superficie, el tamaño y/o forma de las partículas. Solo se ha comprobado la fitotoxicidad a las plantas por el uso de altas concentraciones, pero se ha evidenciado que los beneficios son grandes a las concentraciones adecuadas (Lira-Saldivar *et al.*, 2018).

La nanotecnología tiene gran aplicación en la industria alimentaria, al ser una tecnología muy reciente, la mayor parte de las investigaciones han sido en el laboratorio. Por lo tanto, es necesario concientizar a los consumidores de los productos que están realizados en base a NP's a comprender su impacto ambiental; aún no hay directrices o leyes que regulen la venta de agroquímicos con nanotecnología (Mittal *et al.*, 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización

El estudio se realizó en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la U.M.S.N.H. en Apatzingán de la Constitución, Michoacán, México, que se ubica en las coordenadas de 19° 05' 00.66" LN y 102° 22' 15.53" LO a una altitud de 307 msnm (Figura 3.1).



Figura 3.1 Ubicación de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UMSNH (Google Heart, 19 de abril del 2022).

Clima

El clima en la localidad de Apatzingán, Michoacán; donde se estableció el cultivo, de acuerdo a la clasificación climática Köppen es BS₁w(w), que corresponde a un clima seco estepario, con 1.9% de lluvias invernal; que inicia en junio y alcanza su máximo en agosto, con lluvias atípicas en los meses de septiembre a diciembre (García-Enriqueta, 1964; García-Enriqueta, 1974).

Se estableció el cultivo el 20 diciembre del 2021, y la última lectura de las variables de respuesta a la aplicación de NP's (Zn, Cu, Fe) fue el 8 de abril del año 2022

Metodología

Genotipo experimental

Se utilizaron plántulas de tomate de tipo roma determinado variedad Primus LF. Este material produce frutos con pesos promedio de 95 a 100 gramos. Se caracteriza por su precocidad, resistencia a *Fusarium*, frutos de buena firmeza, color rojo intenso, ideal para cosechas tempranas, mercado interno o de exportación, puede ser cultivado en invernadero, bajo condiciones de malla sombra o campo abierto (Figura 3.2). Este tomate requiere de climas ligeramente cálidos, las condiciones climáticas en la región son tropical seco, con una precipitación media de 740 mm de agua anual, temperaturas máximas de 40 a 42 °C en los meses de abril a junio; temperaturas mínimas de 12 a 14 °C en los meses de diciembre a febrero. Temperatura promedio anual de 15.6 a 39.3 °C (CONAGUA, 2019). La duración diaria de luz en promedio es de 12 horas.



Figura 3.2 Tomate determinado variedad primus LF. Recuperada de: <https://www.latamseeds.mx/>

Establecimiento del experimento

Se utilizó una estructura de 10 m x 40 m acondicionada con malla sombra al 30 % de polietileno color negro, completamente aislada del medio externo con malla antiáfida de 25 x 25, con orientación de oriente a poniente, para este caso de estudio se ocupó una superficie 10 x 20 m. Cuenta con sistema de riego por goteo, integrado por cuatro cisternas marca Rotoplas de 2500 L de capacidad cada una, bomba de agua con capacidad de bombeo de 2 pulgadas y sistema de nebulización (Figura 3.3).



Figura 3.3 Infraestructura acondicionada con malla sombra 30% y malla antiáfido en la parte lateral.

Preparación del terreno: Se realizaron dos pases de arado, con el objetivo de dejar el suelo bien suelto y no compactado (Figura 3.4). Para conocer las características físicas y químicas del suelo, se realizó la toma de una muestra compuesta de 10 submuestras a la profundidad de 30 cm. Con la cual se realizó un análisis físico y químico.



Figura 3.4 Rastreado de suelo con el motocultor y formación de camas.

Posteriormente se formaron ocho camas y se instalaron cintillas una por cama, colocadas a lo largo de la cama. Después, cada una de las camas fue cubierta por acolchado blanco (Figura 3.5 y 3.6). Se realizó la desinfección del suelo con Metalaxil a la concentración del 1 mL L^{-1} para el control de hongos y microorganismos patógenos. Para el control de grillos y babosas se aplicó Clorpirifos etil en polvo al voleo en los surcos.



Figura 3.5 Colocación de cintilla de riego.



Figura 3.6 Colocación de acolchado plástico.

Adquisición de plántula: el 18 de diciembre del 2021 fueron adquiridas plántulas de la variedad Primus, de productores de la región, dicha variedad está adaptada al clima de la región (Figura 3.7).



Figura 3.7 Plántulas de tomate primus LF en charola antes de trasplantar.

Trasplante: el 20 de diciembre del 2021 se realizó el trasplante por la tarde, previamente se aplicó un riego hasta capacidad de campo. Las charolas fueron

sumergidas en una solución compuesta por enraizador (Raizal® 400 Syngenta) a la concentración de 10 g L⁻¹, fungicida Metalaxil a 1.5 mL L⁻¹ de concentración e insecticida compuesto por Clorpirifos y permetrina a 1 mL L⁻¹. Se sumergieron las charolas a 1 cm por debajo del espejo de la solución hasta que dejó de burbujear la charola de la plantula. Posteriormente se dejaron las charolas escurriendo para retirar el exceso de la solución. Las plántulas se trasplantaron, colocando una planta en cada orificio del alcoholado a 30 cm de distancia entre plantas, la distancia entre líneas (camas) fue de 1.20 m, por lo que se generó la densidad de población de 27,778 plantas ha⁻¹ (Figura 3.8).

De manera preventiva para el control de grillo (*Gryllus campestris*), babosa (*Deroceras* spp) y hormiga (*Formicidae*) se aplicó 2 g de insecticida compuesto por Clorpirifos etil granulado alrededor del tallo de la planta.



Figura 3.8 Tratamiento a plántulas en charola y su trasplante al suelo.

Riego y fertilización: el riego y la nutrición se realizó de acuerdo a cada etapa fenológica de la planta, se determinaron los miliequivalentes aportados por el suelo (Cuadro 3.1) y el agua (Cuadro 3.2); se utilizó para la fertilización solución Steiner (Cuadro 3.3), y se le resto los aportes de miliequivalentes por el agua resultando la Solución Steiner ajustada (3.4) y así para cada etapa fenológica del tomate (Cuadro 3.5).

De acuerdo al análisis de suelo el agua se determinó los miliequivalentes de aporte:

Cuadro 3.1. Fertilidad del suelo de la casa malla sombra (Análisis Fertilab, 2019)

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

Es moderadamente alcalino (pH de 7.11), textura media (Franco), moderadamente bajo en carbonatos, bajo en sales, muy alto nivel en materia orgánica (4.22%), la conductividad hidráulica es moderadamente baja (2.59 cm h⁻¹), punto de saturación alto (56%), capacidad de campo alta (30%), punto de marchites permanente alto (17.9%), con una densidad aparente de 0.96 g cm⁻³, un, una CIC de 38.5 meq 100 g⁻¹, alto suministro de fósforo disponible, considerable suministro de potasio, alto suministro de magnesio, importante suministro de nitrógeno inorgánico.

Cuadro 3.2 Resultados de análisis físico-químico del agua (Análisis CIDAM, 2020).

NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	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 agua es extraída de pozo, la cual tiene un pH de 7.17, una conductividad eléctrica de 0.31 mS cm⁻¹, una relación de absorción de sodio de 0.27, con un perfil mineral (Cuadro 9), los microelementos Fe²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Mn²⁺ y B se encuentran por debajo 0.05 mg L⁻¹.

Cuadro 3.3 Solución Steiner Universal para el cultivo de tomate (Santos-Coello and Ríos-Mesa, 2016).

	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻
	----- meq L ⁻¹ -----					
meq requeridos	7	9	4	11	1	8

Cuadro 3.4 Solución Steiner ajustada.

	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}
	-----meq L ⁻¹ -----					
meq requeridos	7	9	4	11	1	8
me Agua	0.03	0.72	2.43	0.21	0.01	0.24
me aporte	6.97	8.28	1.57	10.79	0.99	7.76

Nota: Es el resultado de restar los miliequivalentes de aporte del agua, a la solución Steiner propuesta.

Cuadro 3.5 Solución Steiner ajustada para cada etapa fenológica del tomate.

Etapa fenológica	Concentración	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
		----- me L ⁻¹ -----					
Establecimiento	25 %	2.69	0.24	1.74	2.07	0.39	1.94
Desarrollo Vegetativo	50 %	5.39	0.49	3.48	4.14	0.78	3.88
Floración y amarre	100 %	10.79	0.99	6.97	8.28	1.57	7.76
Maduración y cosecha	150 %	16.18	1.48	10.45	12.42	2.35	11.64

Nota: Cantidad de nutrimento aportado después de restar el aporte del agua de pozo. La SN se suministró a las concentraciones (%) del 25, 50, 100 y 150, de acuerdo a la etapa fenológica de la planta.

Se suministró la solución Steiner mediante el sistema de riego que esta acondicionado a la infraestructura (Figura 3.9 y Figura 3.10).



Figura 3.9 Tanques de almacenamiento del sistema de riego.



Figura 3.10 Bomba del sistema de riego.

La cual consta de cuatro tanques de 4500 L de capacidad cada uno y un tanque de 450 L, en el cual se prepara la solución nutritiva para poder ser inyectada al sistema de riego, estos tanques se encuentran interconectados a una bomba de marca EVANS de 0.75 Hp (0.56 Kw) conectada a 120 Volts.

Manejo de cultivo

Riego

El riego se programó cada tercer día, en los meses de diciembre 2021 y enero 2022 en las primeras etapas fenológicas de la planta; en los meses posteriores los riegos se realizaron una vez por día, a excepción de los domingos, en ambos casos el sábado se dio un riego pesado; el volumen de agua utilizada en cada riego fue de 1.28 litros planta⁻¹.

Nutrición

La nutrición del cultivo se proporcionó mediante Solución Steiner de acuerdo con lo establecido en cuadro 2.5, los nutrientes se suministraron a través del sistema de riego; se comenzó con la concentración del 25% durante los primeros días de trasplante, durante el desarrollo vegetativo el suministro fue al 50%, en floración y amarre en al 100% y finalmente, en la etapa de maduración y cosecha al 150%. Los riegos se realizaron cada tercer día con la solución nutritiva Steiner, conforme el cultivo demandó más agua, se realizaron riegos intermedios solo con agua.

La cantidad de fertilizantes suministrados para completar el aporte requerido por el cultivo se muestra en el cuadro 3.6:

Cuadro 3.6 Cantidad de fertilizante suministrado en el cultivo de acuerdo a la solución Steiner al 100%.

Fuente de Nutrimiento	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Peso equivalente del Compuesto	mg de la fuente L ⁻¹
	-----me L ⁻¹ -----							
	6.97	8.28	1.57	10.79	0.99	7.76		
H ₃ PO ₄					0.99		32.65	32.32
MgSO ₄ ·7H ₂ O			1.57			1.57	123.18	193.39
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O		8.28		8.28			118.04	977.37
KNO ₃	0.78			0.78			101	78.78
K ₂ SO ₄	6.19					6.19	87.12	539.27
CH ₄ N ₂ O				1.73			60	103.80

En el cuadro 3.7 se muestran las fuentes utilizadas para la preparación de la solución nutritiva:

Cuadro 3.7 Fuentes utilizadas para la preparación de la solución nutritiva.

Fuente de Nutrimiento	Nombre del compuesto	Nombre comercial	Fabricante
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico P ₂ O ₅ 52 %	Nutrimaster	Tepeyac
MgSO ₄ ·7H ₂ O	Sulfato de magnesio heptahidratado	Sulmag	Peñoles
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	Nitrato de calcio	Calcinit	Yara
KNO ₃	Nitrato de potasio	Ultrasol NKS + plus	SQM
K ₂ SO ₄	Sulfato de potasio	Ultrasol SOP 51	SQM
CH ₄ N ₂ O	Urea	Urea	Yara

La solución nutritiva se inyectó con un pH entre 5.5 y 6.5, el cual se midió con un medidor de pH marca EXTECH INSTRUMENTS, modelo EC500; también se midió la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$. Los fertilizantes se pesaron en una báscula portátil marca Electronic Kitchen Scale, modelo SF-400 (Figura 3.11).

La solución nutritiva se preparó en tanques marca Rotoplas de 450 L de capacidad, en el cual se agregaron los fertilizantes; la forma de preparación fue primeramente mediante la mezcla y disolución por separado de fertilizantes que en su fórmula contienen sulfatos y de los que contienen nitratos. Para ello se utilizaron recipientes de plástico de 20 L de capacidad. Una vez disueltos se vaciaron al

mismo tanque y se agitaron con un tubo de PVC para homogenizar la solución. Se inyectó la solución nutritiva mediante el sistema de riego y después de la aplicación se regó por tres minutos solo con agua para arrastrar toda la solución nutritiva y evitar acumulación y taponamientos.

Se tomaron las lecturas del potencial de hidrogeno (pH), de conductividad eléctrica y de la temperatura, esto se realizó cada vez que se inyectó solución nutritiva, las temperaturas en los meses de diciembre y enero fue de 28.9 °C, mientras en los siguientes meses la temperatura fue de 29 a 30.6 °C. Se utilizó un medidor de pH/conductividad/SDT de la marca Extech Instruments a Flir Company.

De forma foliar se aplicó el fertilizante Haifa Proteck, su formulación es 26% de fósforo (P_2O_5) y 37% de potasio (K_2O) a la concentración de 2 g L⁻¹, las aplicaciones fueron cada 15 días a los 30 días después del trasplante en plantas que presentaban sintomatología de contagio por virus, a pesar de tener características de hojas arrugadas, poco crecimiento, se logró mantener un color verde, producción de flores y frutos.

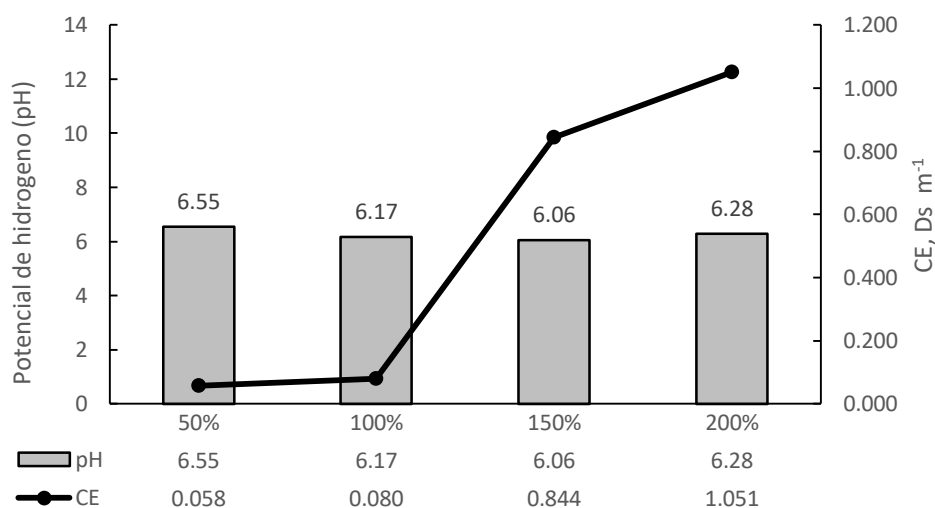


Figura 3.11 Potencial de hidrogeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva utilizada.

Plagas

El manejo de plagas se realizó de manera preventiva con aplicaciones foliares, en los primeros días de trasplantes se utilizaron Clorpirifos + permetrina (Carioca Max) e Imidacloprid (Confidor 350 SC) a concentraciones de 1 mL L^{-1} , para la prevención de ataque de grillo (*Gryllus campestris*), babosa (*Deroceres spp*) y hormiga (*Formicidae*), en conjunto con fumigaciones periódicas de Malation a 2 mL L^{-1} alrededor de la nave.

Después de 20 días después de trasplante (DDT) se realizó un manejo preventivo de plagas con aplicaciones foliares alternadas de insecticidas químicos y orgánicos. Los insecticidas químicos suministrados fueron: Flupyradifurone (Sivanto prime 200 SL) a 1.5 mL L^{-1} e Imidacloprid (Confidor 350 SC) a concentración de 1.5 mL L^{-1} a intervalos de 14 días, entre las aplicaciones químicas se utilizó extracto de canela (Cinnacide) y extracto de ajo (Garsol) cada 3 días, alternando entre estos. En todas las aplicaciones se utilizó el adherente (Inex-A) a la concentración de 1 mL L^{-1} de agua.

Enfermedades

Se realizaron aplicaciones vía drench cada 10 días de Metalaxil (Star Tall 240 CE) a 1 mL L^{-1} ; a los 25 DDT se detectó la incidencia de peca bacteriana y se realizó una aplicación foliar de Metalaxil (Star Tall 240 CE) y Terramicina agrícola 5 %, ambos se suministraron junto con adherente (Inex-A a la concentración de 1 mL L^{-1}); Se prescindió de utilizar cobre, ya que es un elemento que está bajo investigación. La manera de prevenir enfermedades por virus fue mediante el control de insectos vectores.

Polinización

Debido a que el cultivo se estableció bajo condiciones protegidas, en donde se limita la circulación de aire y no se tienen la presencia de polinizadores, en la etapa de apertura floral, se realizó la aplicación de aire a las plantas con una sopladora de motor. Esto cuando la humedad relativa dentro de la estructura fue de

40% a 60%, condición que se presentó de las 9:30 am a 11:00 am de día (Figura 3.12). Esta actividad se realizó del 25 de enero al 03 de marzo del 2022, a los 35 DDT hasta los 43 DDT, periodo en el que se presentó la mayor floración, esta práctica se realizó una vez al día.

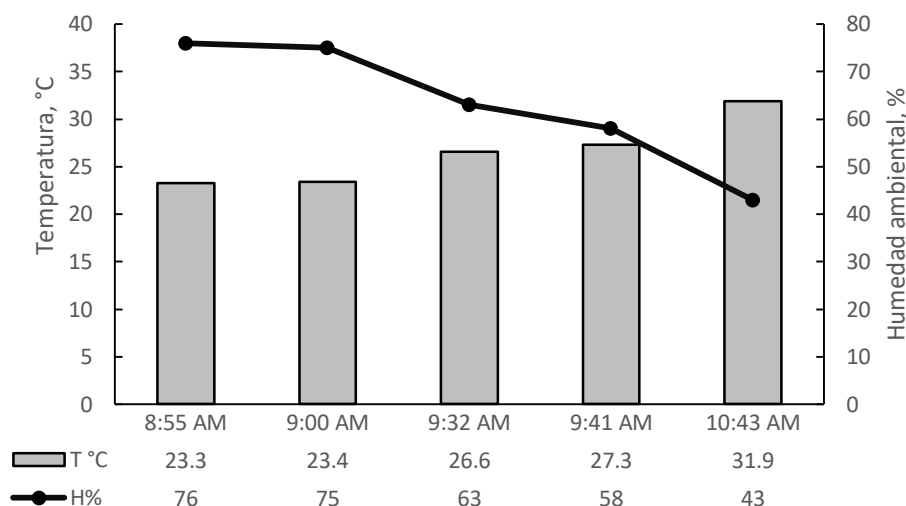


Figura 3.12 Perfil de humedad relativa ambiental (H%) y temperatura (°C) dentro del invernadero en función de la hora.

Para la prevención de aborto de flores, se hicieron aplicaciones foliares de la mezcla del nutriente foliar (FOSFACEL-800) a 10 g L^{-1} y Metalaxil (Star Tall 240 CE) a 1 mL L^{-1} , que se suministró junto con el adherente Inex-A.

Prácticas culturales

Dentro de las prácticas se realizó la eliminación de las hojas basales para obtener plantas equilibradas y vigorosas (Infoagro, 2019). Se realizaron deshierbes manuales y con azadón, se eliminó la maleza de entre los camellones de las camas del cultivo. Se retiró de forma manual la maleza que crecen al pie del tallo del tomate, el deshierbe alrededor de la nave, y el tapado de agujeros de nave para prevenir la invasión de plagas del exterior. No se utilizó ningún químico para el control de malas hierbas.

Tratamientos en estudio

Se realizó la aplicación foliar de NP's de ZnO (Figura 27), Fe₂O₃ (Figura 28) y CuO solos y combinados a la concentración de 10 ppm cada uno, esto generó los siguientes tratamientos: Zn, Fe, Cu, Zn+Cu, Zn+Fe, Cu+Fe, Zn+Cu+Fe y un testigo sin aplicación. Las NP's son de marca Sigma Aldrich, con las características descritas en el Cuadro 15, 16 y 17.

Se efectuaron dos aplicaciones por mes en un periodo de tres meses, por lo que se realizaron 7 aplicaciones en total. El inicio de las aplicaciones de las NP's fue a los 14 días después del trasplante (Figura 3.13).

En cada aplicación se utilizó el coadyuvante comercial Inex-A a 1 mL L⁻¹ para aumentar la eficacia de los tratamientos. Las aplicaciones en las primeras etapas fenológicas se realizaron con rociadores de 1 L de capacidad, en etapas fenológicas posteriores se utilizaron bomba de mochila, con boquilla de cono lleno, a punto de goteo, las aplicaciones se realizaron por la mañana, antes de las 8:00 de la mañana.



Figura 3.13 Aplicación de NP's con rociador en las primeras etapas fenológicas.

Nanopartículas utilizadas

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas de nanopartículas.

Material	Óxido de Zinc	Óxido de Hierro	Oxido de cobre
Formula	ZnO	Fe ₂ O ₃	CuO
Color	Blanco	Rojo - Cafe	Negro
Forma	Polvo	Polvo	Polvo
Concentración	79.7%	69.3%	78.8%
Tamaño	67 nm	27 nm	40 nm
pH	6.0 – 9.0	No disponible	No disponible
Solubilidad en agua	0.0029 g L ⁻¹ a 20 °C (68 °F) - Directrices de ensayo 105 del OECD - ligeramente soluble	0.001 g L ⁻¹ a 20 °C (68 °F) - Directrices de ensayo 105 del OECD	0.0001 g L ⁻¹ a 20 °C (68 °F) - Directrices de ensayo (EC) No. 440/2008 Annex, A.6 - Insoluble

Nota: Certificado de calidad del proveedor, nm - nanómetros.



Figura 3.14 Nanopartículas de Zinc (a), nanopartículas de Hierro (b) y nanopartículas de cobre (c).

Preparación de la solución de NP's

Se prepararon las ocho soluciones con las combinaciones de las nanopartículas, utilizando una balanza analítica con precisión de 0.0001 g (Figura 3.15), para las dos primeras aplicaciones se utilizaron rociadores de 1 L de capacidad (Figura 3.16), y se rociaron las plántulas hasta el punto de goteo.



Figura 3.15 Pesado de nanopartículas en balanza analítica de precisión de 0.0001 g.



Figura 3.16 Recipientes utilizados para almacenar las soluciones preparadas.

Diseño experimental

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, que resultó en 32 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo conformada por nueve plantas de tomate, lo que totalizó 288 plantas de tomate bajo estudio. Como parcela útil se tuvieron cuatro plantas de la parte de en medio de cada unidad experimental (Figura 3.17 y 3.18).

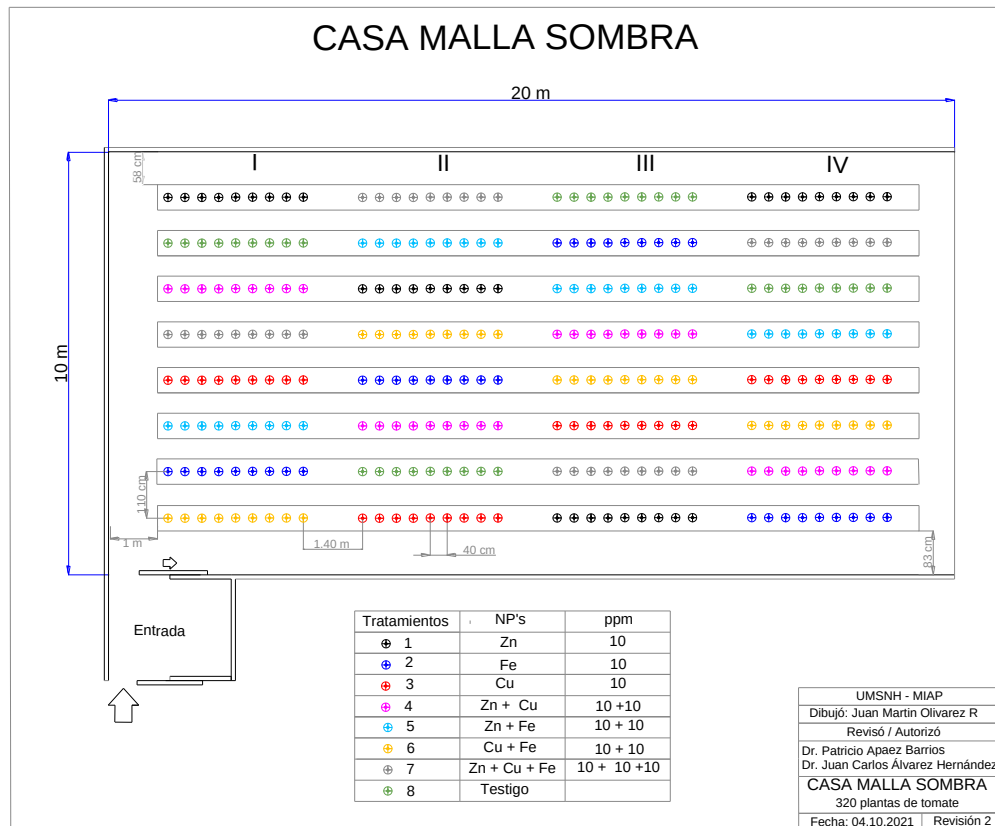


Figura 3.17 Distribución de los tratamientos dentro de la casa malla sombra.



Figura 3.18. Cultivo de tomate determinado variedad Primus LF a los 110 DDT.

Variables de respuesta

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las plantas de tomate determinado, se registraron y midieron las siguientes variables de respuesta.

Variables morfológicas

A los 15 días después del trasplante se inició con la medición de variables morfológicas:

Altura de la planta (AP): Se utilizó una cinta métrica flexible, midiendo desde el nivel del suelo hasta la parte apical de la planta en cm.

Diámetro del tallo (DT): Con un vernier digital se midió esta variable en mm, considerando a una distancia de 2 cm de altura del suelo.

Número de hojas (NH): Se realizó el conteo visual de las hojas desarrolladas de cada planta.

Estas variables se midieron cada 15 días durante el ciclo del cultivo.

Variables de rendimiento

Producción de frutos por planta (P): en cada cosecha se pesan todos los frutos cortados de las plantas de la parcela útil de cada unidad experimental, el peso total se divide entre las tres plantas (Figura 3.19).

Número de frutos por planta (NFP): es la sumatoria acumulada de todos los cortes realizados de las plantas de la parcela útil de cada unidad experimental, dividido entre el número de plantas muestreadas (Figura 3.19).

Peso promedio de frutos (PPF): fueron pesados los frutos cosechados de las plantas de la parcela útil de cada unidad experimental y este valor se dividió entre el número de frutos (Figura 3.19).

Diámetro ecuatorial el fruto (DE): corresponde a la medida horizontal que se toma en la mitad del fruto, es decir, el fruto se coloca de manera verticalmente, situando en la parte superior el pedúnculo y en la parte inferior el estigma, por tanto, la medida se toma colocando el vernier a la distancia media entre ambos puntos anteriormente mencionados y de forma horizontal se toma la lectura en cm; la frecuencia de medida es en los frutos cosechados de las plantas que se consideran como parcela útil (Figura 3.19).

Diámetro polar (DP): corresponde a la medida vertical que existe entre el pedúnculo y el estigma, se coloca el vernier de manera vertical y se toma la distancia entre estos dos puntos. Esta medición se tomó a una muestra de 10 frutos cosechados en las plantas de la parcela útil de cada unidad experimental (Figura 3.19).



Figura 3.19. Medición de número de frutos, peso promedio de frutos, diámetro polar y diámetro ecuatorial.

Número de flores: (NF): se realizó el conteo del número de flores por planta en la parcela útil de cada unidad experimental, la frecuencia de toma de datos fue de 15 días (Figura 3.20).

Número de racimos (NR): es el conteo de racimos de flores por planta de la parcela útil de cada unidad experimental, la frecuencia de medición fue de 15 días (Figura 3.20).



Figura 3.20. Conteo de flores y número de racimos.

Número de tallos productivos (NTP): al final del ciclo de producción del tomate, se contabilizó el número de tallos productivos (Figura 3.21).



Figura 3.21 Conteo de número de tallos productivos.

Materia seca total y por órgano de la planta

Después de la cosecha se realizó un muestreo destructivo de las plantas de la parcela útil de cada unidad experimental, el corte de las plantas se realizó a nivel

del suelo con tijeras de podar, posteriormente se separaron los órganos de la planta y se colocaron en bolsas de papel (Figura 3.22), las cuales se sometieron a secado al medio ambiente de 20 a 30 días hasta peso constante. Después se pesaron cada uno de los órganos: frutos (Figura 3.23 y 3.24), tallos (Figura 3.25) y hojas (Figura 3.26), para conocer la distribución de la materia seca de la planta.

El peso seco total de materia seca se determinó con la sumatoria de los pesos secos de todos los órganos de la planta.



Figura 3.22. Hojas y tallos en bolsas de tomate para la determinación del peso seco.



Figura 3.23. Rodajas de tomate para deshidratación en estufa.



Figura 3.24. Estufa para la deshidratación de fruto tomate.



Figura 3.25. Preparación para el secado de los tallos de las plantas de tomate.



Figura 3.26. Retiro de las hojas para preparar la muestra de secado de hojas.

Variables de nutrición

Para conocer el efecto de la aplicación de nanopartículas sobre el contenido nutrimental e los frutos de tomate, se realizó la determinación del Nitrógeno con el método de Dumas. El Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Azufre, Hierro, Zinc, Manganeso, Cobre, Boro, Níquel y Molibdeno por digestión ácida multi-elemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03.

Para obtener la concentración en peso fresco de cada nutriente se utilizó la siguiente expresión matemática, derivada del balance de masa en el fruto.

$$x_{\text{Nutriente}}^{\text{Fresco}} = \frac{w_{\text{Fresco}} \cdot (1-H) \cdot x_{\text{Nutriente}}^{\text{final}}}{10 \cdot w_{\text{total}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$x_{\text{Nutriente}}^{\text{Fresco}}$ = Concentración de nutriente en peso fresco.

w_{Fresco} = Peso inicial de la muestra.

H = Humedad reportada del fruto (valores de 0-1).

$x_{\text{Nutriente}}^{\text{final}}$ = Concentración reportada de los análisis de laboratorio.

Variables metabólicas

Clorofila (C): se tomaron tres hojas de la parte media superior de la parcela útil de cada unidad experimental, se lavaron y se congelaron en un ultra-congelador Marca Haier, modelo DW-86W100 a -32°C (Figura 3.27), después se pulverizó y se tomó 1 g de muestra de las hojas, se dejó reposar en 10 mL de solución de acetona al 80% por alrededor de 48 horas; una vez transcurrido el tiempo se centrifugaron los viales (Figura 3.28 y 3.29). Posteriormente se tomó 1 μL para determinar la absorbancia a 646 nm y 663 nm, la metodología utilizada fue de acuerdo con Liang *et al.* (2017).



Figura 3.27 Ultra-congelador Haier.



Figura 3.28 Preparación de la maceración de las hojas con solución de acetona al 80%.



Figura 3.29 Muestras después de 48 horas, para leer su absorbancia.

El contenido de clorofila se calculó mediante las siguientes ecuaciones propuestas por Liang *et al.* (2017):

$$\text{Clorofila}^a (\mu\text{g/mL}) = -1.93A_{646} + 11.93A_{663} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Clorofila}^b (\mu\text{g/mL}) = 20.36A_{646} - 5.50A_{663} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Total Clorofila} (\mu\text{g/mL}) = 6.43A_{663} + 18.43A_{646} \quad \text{Ecuación 4}$$

Licopeno (L): se tomaron tres frutos en madurez de consumo, provenientes de las plantas de la parcela útil de cada unidad experimental. Se licuaron los frutos en un procesador de alimentos, después se deseca por 24 horas en una estufa a 55 °C, pasado este tiempo se tomó 1 g de fruto y se agregó 10 mL de hexano, posteriormente se colocó en un tubo para centrifuga; se reposar por 24 horas, después se centrifugó y se tomaron 3 µL en una celda de Cuarzo y se procedió a tomar la lectura en el espectrómetro a la absorbancia de 450 nm (Fernández *et al.*, 2007). Para la determinación de las concentraciones de licopeno se consideró la tabla de calibración propuesta por Fernández *et al.* (2007) y que se presenta en el cuadro 3.9.

Cuadro 3.9 Absorbancia propuesta a diferentes concentraciones de licopeno (patrón) (Fernández *et al.*, 2007).

Concentración (ppm ± *E-5)	Absorbancia (Au ± 5*E-5)
1	0.12688
2	0.46976
3	0.63454
4	0.86713

Para determinar la concentración del contenido de licopeno de los frutos por tratamiento, se graficaron los datos del cuadro 21 con ayuda de Excel se obtuvo una curva de correlación (Figura 3.30), para posteriormente determinar la

concentración en ppm de licopeno en función de las absorbancias medidas de acuerdo a la metodología mencionada anteriormente.

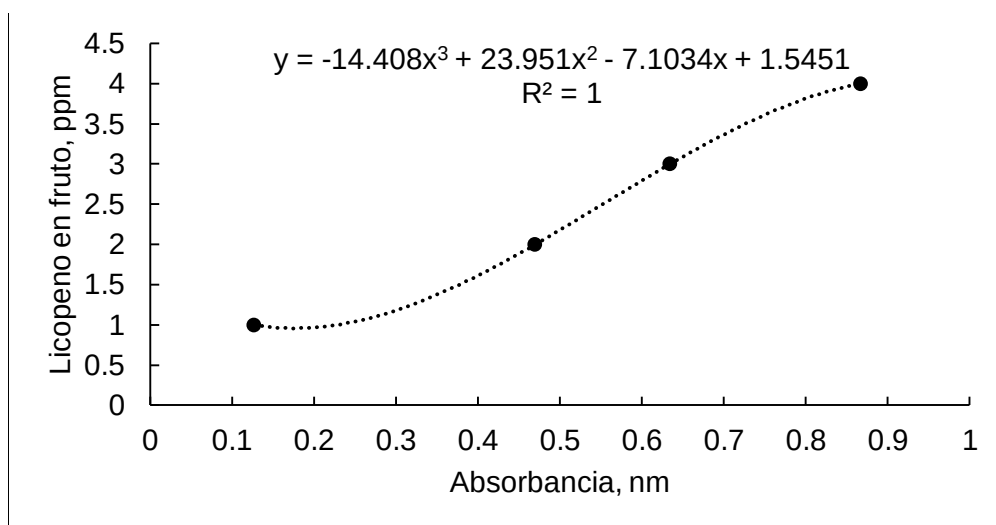


Figura 3.30 Curva de calibración para la determinación de concentración de licopeno en fruto tomate (Fernández *et al.*, 2007)

Se selecciona la absorbancia como variable independiente, porque lo que se va a medir es la absorbancia en el espectrómetro es la absorbancia a una concentración desconocida.

Variables de calidad

Sólidos solubles (°Brix): la mayor parte de los sólidos solubles en el zumo de las verduras son azúcares, aunque también están presentes ácidos orgánicos, aminoácidos, compuestos fenólicos y pectinas solubles en menor proporción. Para la determinación se trituraron tres tomates por unidad experimental en un procesador de alimentos, el zumo se colocó sobre el cristal del refractómetro modelo r²i300 de la marca Reichert (Figura 3.31).



Figura 3.31. Medición de los sólidos solubles en tomate determinado.

Acidez titulable (AT): se licuaron tres frutos de la parcela útil de cada unidad experimental en un procesador, se tomaron 10 g de la pulpa homogenizada y se agregaron 10 mL de agua destilada, se licuó y se filtró con una gasa, por último, se tomaron 10 mL y se tituló con una solución de hidróxido de sodio 0.01 N y los resultados se expresan como porcentaje de ácido cítrico (Figura 3.32).



Figura 3.32 Determinación de la acidez titulable.

Firmeza (F): se utilizó un penetrómetro modelo GY-3, de marca Vetus Instruments para su medición. La prueba consistió en determinar la fuerza máxima necesaria para penetrar una punta de acero inoxidable 8 mm (Figura 3.33).



Figura 3.33 Medición de la firmeza en tomate determinado.

pH: tres frutos de plantas de la parcela útil de cada unidad experimental se licuaron en un procesador de alimentos, posteriormente se determinó el pH con un potenciómetro portátil marca waterproof (Figura 3.34).



Figura 3.34. Determinación del pH.

Humedad (H): se determinó de manera indirecta a partir del peso seco del fruto, mediante la siguiente ecuación, los resultados se expresan en porcentaje:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Vigor de plantas

Se evaluó el vigor de las plantas de tomate, se valoró la calidad, el porte y el estado físico, en función de las aplicaciones de las NP's, para esto de se empleó

estala Likert, mediante el otorgamiento de valores de orden descendente conforme. Las escalas utilizadas se muestran en el cuadro 3.10:

Cuadro 3.10 Adaptación de escala Likert de vigor en plantas de tomate (Álvarez-Hernandez, 2019).

Valor	Calificativo	Características visuales
1	Muy vigorosa	Tallos y hojas erguidos, hojas de color intenso, protuberancias de yemas axilares visibles, sanidad completa, excelente desarrollo de la altura.
2	Buen vigor	Tallos y hojas erguidos, hojas de color intenso, sin yemas axilares visibles, sanidad completa, desarrollo de la altura de la planta.
3	Vigor medio	Tallos y hojas medio erguidos, hojas de color medio intenso, sin yemas axilares visibles, sanidad completa, desarrollo medio en la altura.
4	Poco vigorosa	Tallos y hojas curvadas, hojas amarillentas, sin yemas axilares visibles, algunas necrosidades en los brotes, poco desarrollo de la altura.
5	Raquítica	Tallos y hojas decaídos, hojas amarillentas, necrosidades visibles en la mayor parte de los brotes, nulo desarrollo de la altura.

Operacionalización de variables

Recapitulando las variables de respuesta se concentran en el siguiente cuadro, que muestra la operacionalización de variables (cuadro 3.11).

Cuadro 3.11 Operacionalización de variables.

Definición conceptual		Definición operacional				Definición de instrumento
Variable general	Variable intermedia	ID	Tipo de variable	Frecuencia de medición	Unidades de medición	Instrumento de medición
Morfológicas	Altura de planta	AP	A	15 días	cm	Flexómetro
	Diámetro de tallo	DT	A		mm	Vernier
	Número de hojas	NH	A		unidades	Observación
	Número de tallos productivos	NTP	A	Al final del ciclo	unidades	visual
Rendimiento	Producción	P	A	Por cosecha	gramos por planta	Bascula digital
	Número de frutos por planta	NFT	A		visual	
	Peso promedio de frutos	PPF	A		gramos	Bascula
	Diámetro ecuatorial	DE	A		unidades	Observación visual
	Diámetro polar	DP	A	unidades	Observación visual	
	Número de racimos	NR	A	15 días	mm	Vernier
	Número de flores	NF	A		mm	Vernier
Materia seca	Peso seco de fruto	PSF	A	Al final del ciclo	gramos	Mufla y bascula
	Peso seco de tallo	PST	A		gramos	Mufla y bascula
	Peso seco de hojas	PSH	A		gramos	Mufla y bascula
Nutrición	Análisis mineral fruto	-	A	Al final del ciclo	ppm	Laboratorio externo
Vigor de la planta	-	-	B	15 días	Asignación de valores	Escala Likert
Calidad	TSS	GB	A	Al final del ciclo	°Bx	Refractómetro
	Ph	PH	A		adimensional	Potenciómetro
	Acidez	AT	A		% ácido cítrico	Titulación
	Firmeza	F	A		kg cm ⁻²	Penetrómetro
	Humedad	H	A		%	Diferencia de peso
Metabolismo	Clorofila	C	A		µg ml ⁻¹	Espectrómetro
	Licopeno	L	A		ppm	Espectrómetro
A – Variable Cuantitativa			B – Variable cualitativa			

Análisis estadístico

A los datos obtenidos de cada variable de respuesta se les aplicó un análisis de varianza y a las variables que resultaron con diferencias estadísticas significativas se sometieron a la prueba comparación de medias de Tukey al 5%, de probabilidad del error, todo esto se realizó con el software SAS 9.4.

Análisis económico

Se realizó un análisis económico para determinar el tratamiento con el que se logra la mayor utilidad económica antes de impuestos y beneficio-costo. Se determinó de acuerdo a:

Utilidad neta: es el beneficio económico efectivo resultante luego de descontar de los ingresos por la organización, todos los gastos.

$$\text{Utilidad Neta} = \text{Ingresos por ventas} - \text{Costos de producción}$$

Relación Beneficio-Costo: es un indicador que resulta de dividir las ventas generadas entre el valor de los costos de producción, la relación beneficio costo, expresa los beneficios obtenidos por unidad monetaria total invertida durante el ciclo de producción, si la relación es menor que 1, quiere decir que existen pérdidas.

La ecuación para establecer la relación Beneficio Costo calculada al año actual es la siguiente:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Ingresos por ventas}}{\text{Costos de producción}}$$

Para calcular los costos de producción es la suma de los costos fijos más los costos variables,

$$\text{Costos de producción} = \text{Costos pre-operativos} + \text{Costos fijos} + \text{Costos variables}$$

Costos pre-operativos: son los gastos en preparación de suelo (rastreado y desinfección), acolchado, acondicionamiento del sistema de riego.

Costos fijos: son aquellos gastos empleados en valor de la renta de tierra, mantenimiento de infraestructura, mantenimiento de equipo utilizado en la unidad, agua, energía eléctrica, costo de equipos adicionales al sistema de riego, cajas de plástico utilizadas en la cosecha.

Costos variables: se consideran los gastos de análisis de suelo y agua, adquisición de plántulas, materiales para tutorado, insumos para el control de malezas, plagas y enfermedades, mano de obra, combustibles de transporte y mano de obra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el tiempo que se sometieron las plantas en observación se midieron temperaturas y humedades relativas; y la temperatura máxima en diciembre fue de 38.50 °C y se fue incrementando hasta 41 °C en abril; mientras que la temperatura mínima en diciembre a abril se mantuvo entre 16.35 a 17.5 °C (Figura 4.1). La precipitación anual fue de 188.7 mm de agua (CONAGUA, 2021).

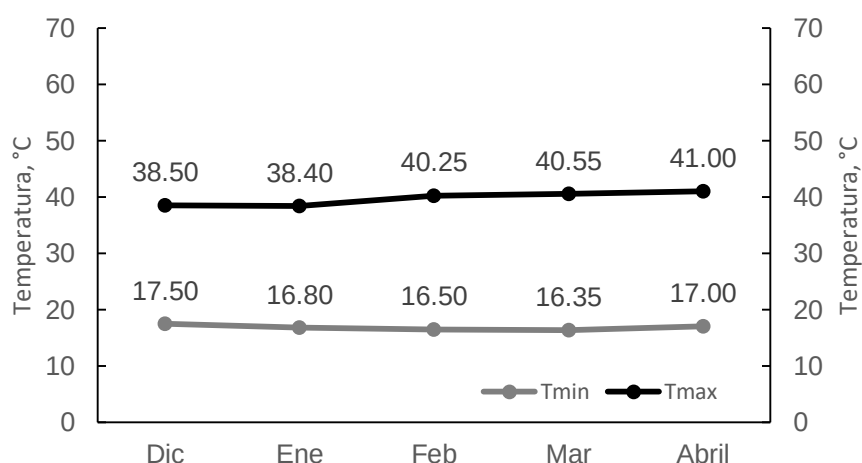


Figura 4.1 Temperaturas máximas y mínimas durante 109 días del ciclo del cultivo. La temperatura promedio para el buen desarrollo del tomate es de 13 a 26 °C (Torres, 2017).

Se registró la humedad relativa dentro del invernadero durante el ciclo de la investigación (Figura 4.2).

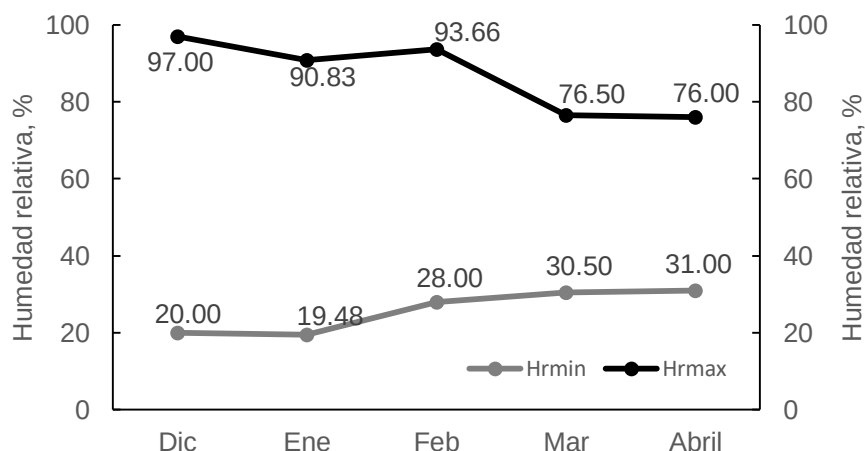


Figura 4.2 Humedad relativa en invernadero.

Variables Morfológicas

Con respecto a los objetivos específicos se evaluaron y analizaron las variables de respuesta para determinar si hay diferencias estadísticas significativas provocadas la aplicación de NP's metálicas Zn, Cu, Fe, que a continuación se mencionan.

Altura de la planta

La altura de planta en tomate determinado presentó diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos; la aplicación foliar combinada de Zn+Cu+Fe, así como el suministro de Zn generaron las plantas más altas con alturas de 115.25 cm y 115 cm respectivamente, que superaron a las plantas del testigo (sin aplicación) y a las plantas con los otros tratamientos evaluados (Figura 49). La altura de planta de tomate, en función de los días después del trasplante con todos los tratamientos se ajustaron a modelos de regresión de segundo orden ($y = \alpha + \beta_0x + \beta_1x^2$), la respuesta de la altura en función de los tratamientos aplicados, demuestra que comenzó a haber diferencias después de la primera aplicación (15 DDT). Las plantas con suministro de NP's de Zn y NP's de Zn+Fe+Cu a los 95 DDT mostraron la mayor altura (Figura 4.3).

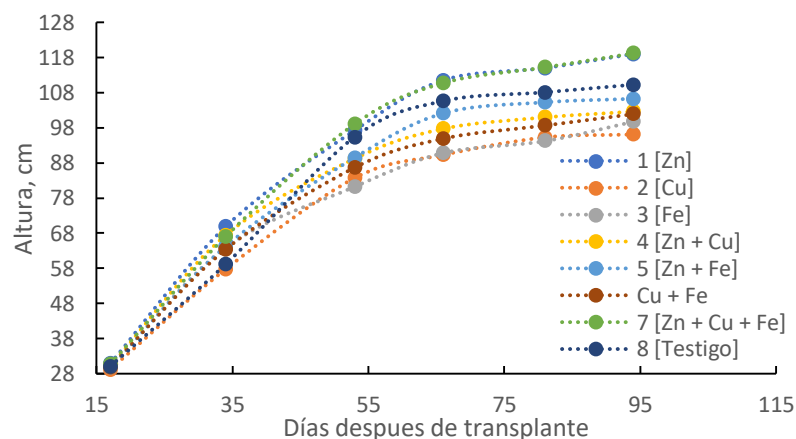


Figura 4.3 Dinámica de altura de la planta en tomate determinado Roma, durante el ciclo del cultivo.

La altura de planta en función de los días después de trasplante con cada uno de los tratamientos evaluados se ajustó a las siguientes ecuaciones:

Zn	$y(t) = -0.0176t^2 + 3.0655t - 15.447$	$r^2 = 0.9978$
Fe	$y(t) = -0.0130t^2 + 2.2967t - 3.3156$	$r^2 = 0.9890$
Cu	$y(t) = -0.0146t^2 + 2.4807t - 8.9594$	$r^2 = 0.9978$
Zn + Cu	$y(t) = -0.0169t^2 + 2.7737t - 10.439$	$r^2 = 0.9943$
Zn + Fe	$y(t) = -0.0167t^2 + 2.8363t - 13.376$	$r^2 = 0.9991$
Cu + Fe	$y(t) = -0.0151t^2 + 2.5786t - 8.5152$	$r^2 = 0.9962$
Zn + Fe + Cu	$y(t) = -0.0176t^2 + 3.0923t - 16.938$	$r^2 = 0.9980$
Testigo	$y(t) = -0.0175t^2 + 3.0007t - 17.856$	$r^2 = 0.9914$

De acuerdo con las ecuaciones, se encontró que, en la parte lineal, fue con la aplicación individual de Zn y la combinación Zn+Cu+Fe con las que se generó de los mayores incrementos en altura con 3.07 y 3.09 cm por día, lo que resultó en plantas más altas (Figura 4.4).

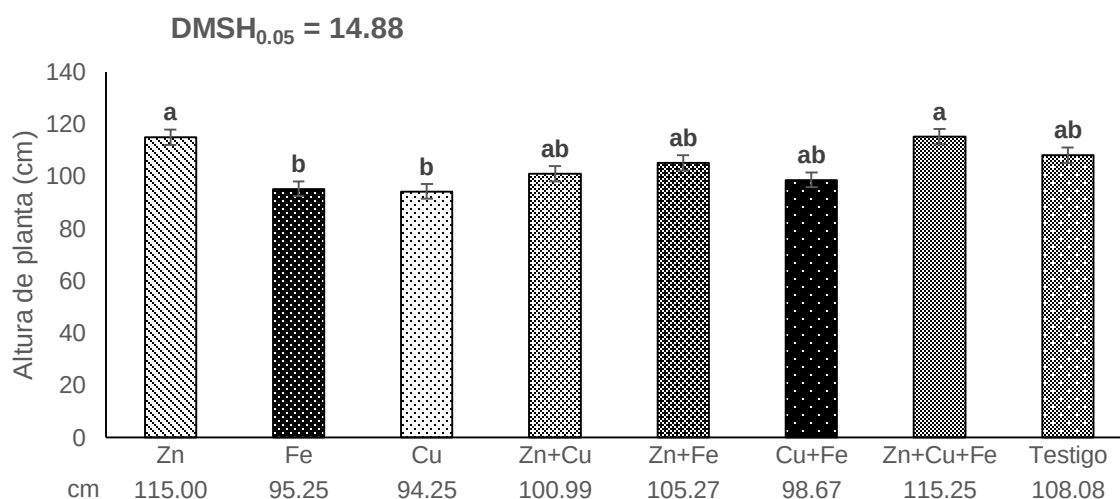


Figura 4.4 Altura de planta en tomate determinado Roma, durante el ciclo del cultivo. DMSH_{0.05} = Diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

Los resultados obtenidos con respecto a la altura de la planta tienen un comportamiento semejante a las investigaciones realizadas por Zhao *et al.* (2014)

en las plantas de garbanzo (*Cicer arietinum*) en donde el suministró foliar de NP's de Zn favoreció la altura de la planta; al igual que Raliya *et al.* (2015) aplicaron NP's de Zn, quienes registraron el aumento de 24.5 cm en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) con respecto al testigo. Así mismo, Méndez *et al.* (2016) aplicaron NP's de Zn a 1.3% y obtuvieron un incremento del 16% en altura en plantas de pimiento morrón verde (*Bell pepper*) con respecto al testigo; mientras Yuan *et al.* (2018) en plantas de chile (*Capsicum annum*) con la aplicación de NP's de Fe se lograron plantas con mayor altura que las plantas del testigo sin aplicación. Estas tendencias las corroboraron Nechitailo *et al.* (2021) quienes al realizar la aplicación combinada de NP's de Zn+Cu+Fe registraron incrementos significativos en la altura de plantas de tomate.

En el presente estudio, las plantas con aplicación foliar las nanopartículas de Zn+Fe+Cu, tuvieron incrementos del 6.2% en altura con respecto a las plantas del testigo, mientras en las plantas en donde solo se les suministró Np's de Zn se obtuvo un incremento en altura del 6.0% con respecto al testigo. Estos resultados son similares a los obtenidos por Nechitailo *et al.* (2021) en donde las plantas con mayor altura fueron aquellas a las que se les aplicó la combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Diámetro de tallo

El diámetro de tallo en función de los días después de trasplante, no mostraron diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos, todos los tratamientos se ajustaron a modelos de regresión de segundo orden ($y = \alpha + \beta_0 x + \beta_1 x^2$), los modelos resultantes mostraron que fueron similares las velocidades de incremento en el diámetro del tallo con todos los tratamientos (Figura 4.5).

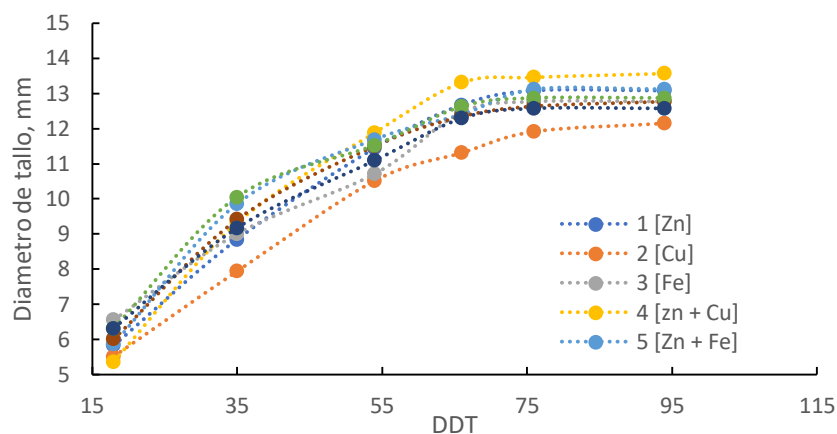


Figura 4.5 Dinámica de diámetro de tallo de la planta en tomate determinado Roma, durante el ciclo del cultivo.

Por lo que al aplicar la prueba de Tukey al 5% de probabilidad del error, todos resultaron estadísticamente similares y en promedio las plantas presentaron diámetro de 12.8 mm (Figura 4.6).

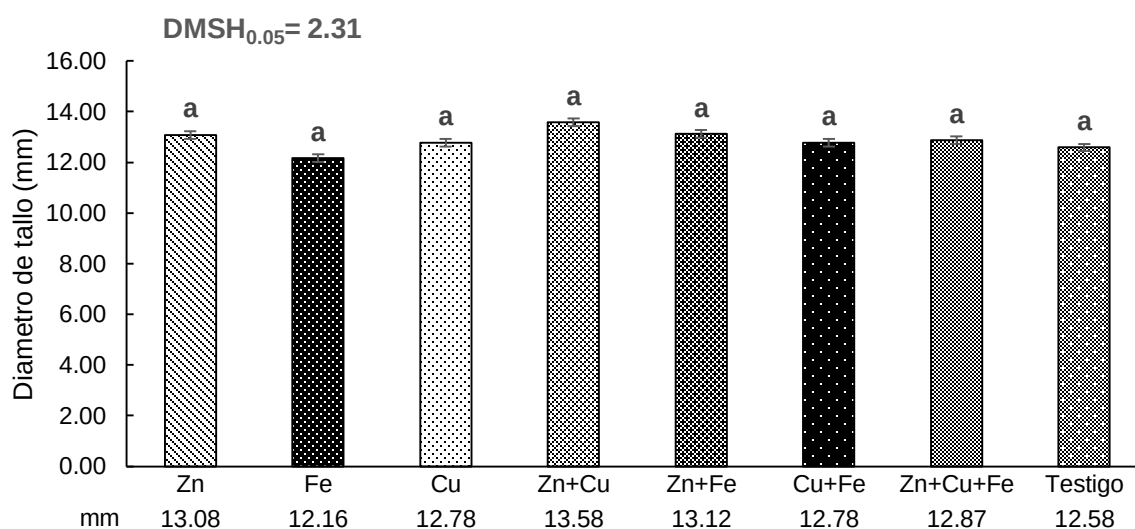


Figura 4.6 Diámetro de tallo en tomate determinado roma a los 94 días después de trasplante. Diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.

Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones realizadas por Pérez-Velazco *et al.* (2020) en donde aplicaron Np's de Zn a 1500 ppm en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y no se encontraron diferencias significativas en el diámetro del tallo, de la misma forma, Jawad Kadhim *et al.* (2021) suministraron 2 g

de NP's de Zn L⁻¹ y tampoco registraron modificaciones significativas en esta variable.

Número de hojas

Los resultados del análisis estadístico (ANOVA) a causa de la aplicación de NP's metálicas indican que no se registraron diferencias significativas en el número de hojas por planta (Figura 4.7).

La falta de respuesta en esta variable a causa de la aplicación de NP's metálicas concuerdan con lo encontrado por Jawad-Kadhim *et al.* (2021) quienes aplicaron combinación foliar de macronutrientes (NPK) y micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo) a diferentes dosis en plantas de tomate, las cuales no modificaron significativamente el número de hojas.

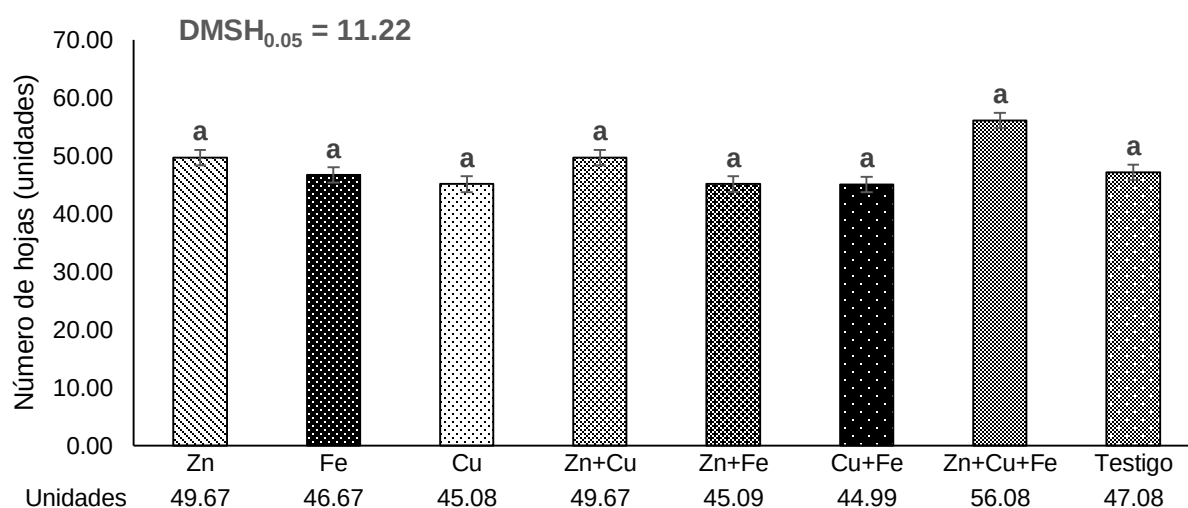


Figura 4.7 Número de hojas en tomate determinado roma a los 94 días después de trasplante. Diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

Resultados similares obtuvieron Ahmed *et al.* (2021) que aún y con la utilización de concentraciones superiores a 50 ppm de NP's de Zn en tomate no se incrementó el número de hojas; por otra parte, El-Desouky *et al.* (2020) encontraron

que a concentraciones de 100 ppm de Fe como NP's en tomate se incrementó el número de hojas. En el caso del presente estudio se aplicaron las NP's a concentraciones más bajas.

Es necesario resaltar que a las concentraciones (10 ppm) en las que se suministraron las NP's del presente estudio se estimula la respuesta de enzimas, que requieren los elementos Zn, Fe y Cu, que promueven un mayor metabolismo, lo que puede favorecer el rendimiento agronómico del cultivo.

Número de tallos productivos

Se obtuvo mayor número de tallos reproductivos en las plantas donde se le suministró de forma foliar Zn+Cu+Fe, con 17.75 tallos reproductivos, valor que resultó estadísticamente superior respecto al testigo y a la mayoría de los tratamientos a excepción del número de tallos productivos registrados en las plantas con el suministro de Zn, las cuales presentaron 16.5 tallos (Figura 4.8).

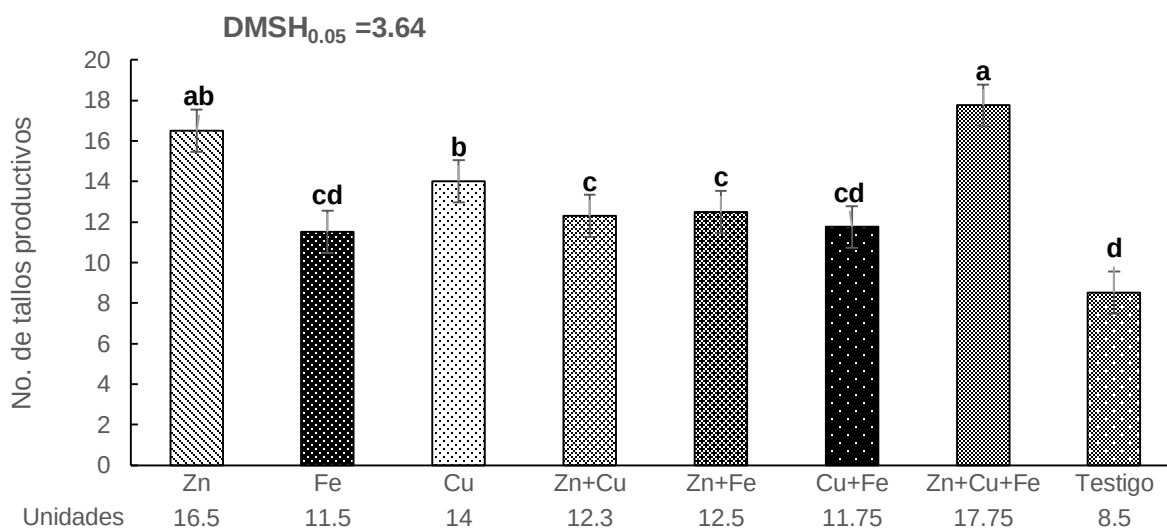


Figura 4.8. Número de tallos productivos en tomate determinado roma a los 94 días después de trasplante. Diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

Investigaciones realizadas por Abdel-Monnem *et al.* (2020), en donde probaron distintas concentraciones de NP's de Zn en plantas de haba (*Vicia faba* L.),

encontraron que a la concentración de 50 ppm aumentó significativamente la cantidad de tallos vegetativos. Lo que evidencia que el Zn tiene la capacidad de promover el número de tallos productivos, en el tratamiento en donde se aplicó el Zn de forma individual se obtuvieron 16.5 tallos productivos.

Investigaciones realizadas por Zafar *et al.* (2020) realizaron aplicaciones de combinación de NP's de Zn y Cu la cual promovió el desarrollo de tallos productivos en mostaza negra (*Brassica nigra*), por tanto, en el segundo mejor tratamiento en donde solo se le suministro Cu se desarrollaron 14 tallos reproductivos, tanto el Cu y Zn suministradas como NP's promueven el desarrollo de tallos reproductivos, como ocurrió con la aplicación individual de Zn y en combinación (Zn+Cu+Fe) que lograron hasta 52.11% de aumento en esta variable.

Contenido de clorofilas

Las plantas que presentaron el mayor contenido de clorofila en las hojas fueron a las que se suministró Cu+Fe con $137.5 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco, mientras que las plantas en donde se aplicó Zn+Cu+Fe fue el segundo mejor tratamiento con $117.2 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco (Figura 4.9).

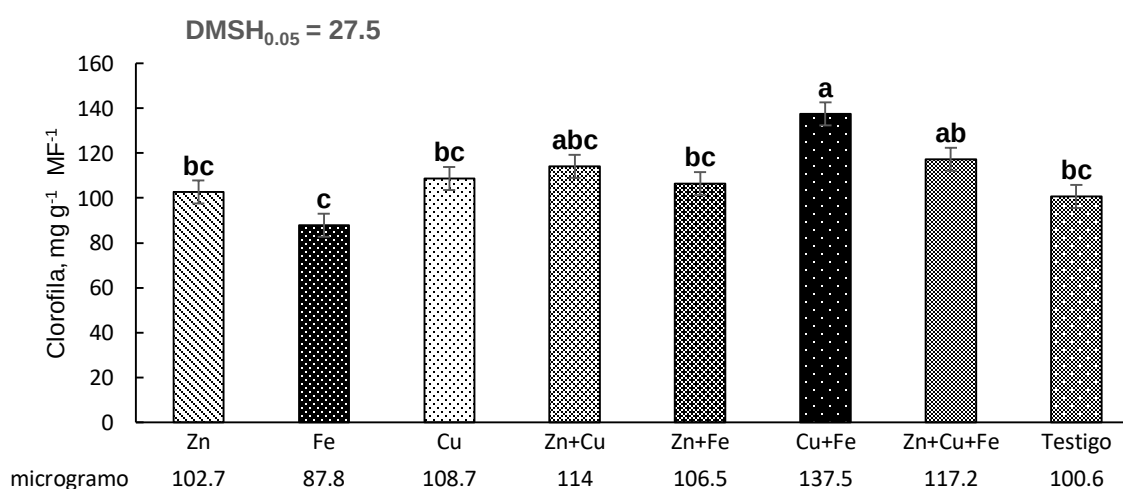


Figura 4.9 Contenido de clorofila en hojas de tomate determinado roma, expresados en μg de clorofila por g hoja fresca.

Las NP's de Zn no presentaron efecto positivo en la producción de clorofila, resultado que es similar a lo encontrado por Lira-Saldivar *et al.* (2018) en plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) tratadas con NP's de Zn, las cuales presentaron similar contenido de clorofila que las plantas no tratadas.

En plantas de tomate en donde se aplicó NP's de Cu se demostró que este elemento tampoco favoreció la producción de clorofila. Sin embargo, su aplicación de acuerdo con Pérez-Labrada *et al.* (2019) y Faraz *et al.* (2022) eleva la actividad enzimática de fenilalanina amoniaco liasa, ascorbato peroxidasa, glutatión peroxidasa, superóxido dismutasa y catalasa.

La respuesta positiva de la aplicación foliar combinada de Cu+Fe, en el contenido de clorofilas concuerdan con lo encontrado por Mengmeng *et al.* (2016) y Mahmoud *et al.* (2019) en donde el Fe promovió la síntesis de clorofila.

El mayor rendimiento económico fue el tratamiento en donde se le suministró Zn+Cu+Fe obteniendo 2876 g, pero no fue el que produjo mayor cantidad de clorofila, mientras que el tratamiento donde se le suministró Cu y Fe se obtuvo una producción de 2261.20 g; en incremento de producción fue de 21.37%; el cual fue el que se obtuvo una mayor síntesis de clorofila.

El Fe forma parte como cofactor de numerosas enzimas e interviene en distintos procesos enzimáticos, forma parte de la enzima ferredoxina y de esta dependen otras enzimas como nitrito reductasa, glutamato sintasa, Sulfito reductasa y ferredoxina-tiorredoxina reductasa. También es importante en la síntesis de clorofila (Franco-Bodek y Castillo-B, 2013). Dicho efecto se intensificó al combinado con Cu. En las plantas donde se aplicó Fe de manera individual no se notó un incremento, debido a que la forma en que la planta libera el metal es mediante la generación ERO, cuando la planta se encuentra bajo estrés tiende a disminuir la fotosíntesis, en los dos mejores tratamientos está presente el elemento Cu en el mecanismo antioxidante de la planta mediante procesos metabólicos lo que pudo favorecer la síntesis de clorofila cuando se aplicó con Fe.

Por lo tanto, no existe una correlación positiva en la producción de clorofila con el rendimiento económico (Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1998), este último favorecido por la aplicación de Zn solo y en combinación. Lo cual puede atribuirse a que el Zn es un elemento que requieren 2,800 proteínas para sintetizarse y actuar, se utiliza en la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis en la transformación de azúcares en almidón (INTAGRI, 2022), así como enzimas como alcohol deshidrogenasa, superóxido dismutasa, anhidrasa carbónica y ARN polimerasa, para la síntesis de triptófano, es un aminoácido esencial en la síntesis de la auxina ácido indolacético (Castillo-González *et al.*, 2018).

Rendimiento y componentes

Producción

Las plantas de tomate más productivas fueron las que recibieron la aplicación foliar Zn+Cu+Fe, las cuales registraron 2,876 g de fruta fresca por planta, valor que resultó estadísticamente superior a la producción de las plantas con los otros tratamientos y el testigo absoluto (sin aplicación). La aplicación combinada de las tres NP's provocó 39.9% más de rendimiento de fruto fresco en comparación con las plantas sin aplicación las cuales registraron 1729.9 g planta⁻¹, similar a la producción de las plantas con suministró de Fe y Cu de forma individual (Figura 4.10).

El efecto positivo en el rendimiento de fruto a causa de la aplicación de NP's de Zn+Cu+Fe, concuerda con los resultados obtenidos por Nechitailo *et al.* (2021) en plantas de tomate, quienes encontraron que la aplicación individual de NP's no favoreció la producción de frutos.

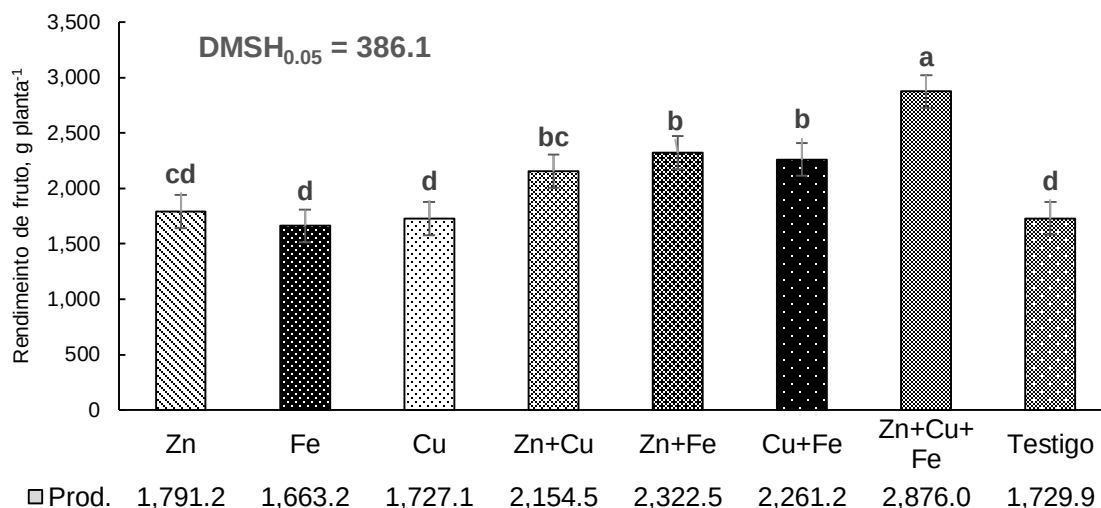


Figura 4.10 Rendimiento de fruto en tomate determinado roma por aplicación foliar de nanopartículas. Diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

El suministro de NP's de manera individual no aumentó la producción de frutos, lo que puede atribuir a la baja concentración a la que se aplicaron (10 ppm), ya que Mahmoud *et al.* (2019) al utilizar concentraciones de 60 ppm de Zn y 50 ppm de Fe incrementaron en 13.1% el rendimiento en rábano (*Rahanus sativus* L.). Así mismo, Palchoudhury *et al.* (2018) aplicaron la dosis de 1100 ppm de NP's de Fe con lo que el rendimiento se incrementó al doble en leguminosas; mientras que Van-Nguyen *et al.* (2022) y Hafeez *et al.* (2015) mencionan que para la obtención de resultados positivos se obtienen a partir de concentraciones inclusive menores de 10 ppm de Np's de Cu, esto se contradice con los resultados obtenidos en el tratamiento en donde se le suministro de manera individual, pero en combinación se obtuvieron resultados positivos.

En los tratamientos Zn+Cu+Fe, Cu+Fe y Zn+Fe, que más favorecieron el rendimiento, está presente Fe, el cual pudo ser más determinante en el incremento de la producción (Pejam *et al.*, 2021; Mahmoud *et al.*, 2019). La mejora en la producción de tomate con aplicación de NP's, implica ahorro en los fertilizantes utilizados, ya que el suministro es a bajas concentraciones.

De acuerdo a SIAP (2022), el rendimiento por hectárea de tomate en casa malla sombra es de 113.24 t ha⁻¹. Salazar-Moreno *et al.* (2017) mencionan que el tomate en malla sombra la cosecha se puede extender hasta en 180 días y de acuerdo al manejo agronómico, se pueden obtener dos cosechas por año; en cada cosecha se producen en promedio 56.6 t ha⁻¹. En esta investigación a la densidad propuesta por Sinaloa de 23,100 plantas/ha (López-Santiago, 2018) y con la aplicación de Zn+Cu+Fe, se cosechó 2.876 kg planta⁻¹, lo que representa 66.4 t ha⁻¹, tomando en cuenta frutos con pesos promedios de 62.5 g (Cuadro 18). Estos resultados concuerdan con lo encontrado por López-Santiago (2018), quien registró rendimientos de fruto en distintas variedades de tomate de 59.94 a 67.09 t ha⁻¹.

En Apatzingán se tienen registradas 286 ha de cultivo de tomate a campo abierto, con rendimientos de 21.61 t ha⁻¹ (SIAP, 2022), y de acuerdo con los resultados de la presente investigación, el cultivo bajo casa malla sombra y con la aplicación de NP's aumenta el rendimiento 39.9%, lo que mejoraría de manera significativa la producción de esta hortaliza en la región.

De la información analizada sobre la aplicación de Zn+Cu+Fe, se encontró que el rendimiento de frutos (2.876 kg/planta) con este tratamiento está en función del número de tallos productivos (17.75), aunque en el caso de la aplicación individual de Zn provocó incrementos significativos en el número de tallos por planta (16.5), sin embargo, el rendimiento de frutos fue inferior a lo encontrado en plantas con aplicaciones combinadas de NP's (Zn+Cu+Fe, Zn+Cu, Zn+Fe y Cu+Fe).

Así mismo, existieron tratamientos que provocaron el aumento en el contenido de clorofilas en las plantas, como ocurrió con la aplicación de Cu+Fe, con el que se registró el mayor contenido, que, aunque no resultó en el mejor tratamiento respecto a la producción de fruta, pero sí fue un incremento significativo. La aplicación combinada Zn+Cu+Fe, fue el segundo tratamiento con el que más se estimuló la síntesis de clorofila, por lo pudo favorecer el mayor rendimiento de fruto registrado con este tratamiento, así mismo, se tuvieron de las plantas con mayor altura.

Durante el desarrollo del cultivo, dentro de la casa malla sombra se presentaron temperaturas altas en los meses diciembre con 38.5 °C, enero de 38.4 °C, febrero de 40.1 °C y marzo de 41.5 °C, las cuales pudieron el rendimiento del cultivo como lo mencionan Ibukun *et al.* (2020). En este sentido, la aplicación de NP's aplicadas en combinación es posible que otorgaran resistencia a las plantas contra altas temperaturas y de esta manera lograr rendimientos aceptables.

Número de frutos por planta, peso promedio de frutos

La aplicación de NP's como Zn+Fe, Cu+Fe, provocaron incrementos significativos de 36.8% y 25.9%, respectivamente en el número de frutos por plantas en tomate determinado. Sin embargo, fue con el suministro de y Zn+Cu+Fe con el que se logró el más alto incremento en esta variable, al registrarse 49.1% más de frutos que en las plantas del testigo sin aplicación (Cuadro 4.1).

Con respecto a la variable peso de fruto, de acuerdo con el análisis de varianza, no se registraron diferencias estadísticas significativas a causa de los tratamientos en esta variable. El peso promedio de frutos fue de 62.48 g (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Número de frutos por planta y peso promedio de frutos en tomate determinado roma con aplicación foliar de nanopartículas.

Tratamiento	Número de frutos por planta	Peso de frutos (g)
Zn	26.67 ± 2.79 de [¶]	62.26 ± 4.93 a
Fe	21.75 ± 2.81 e	60.78 ± 5.05 a
Cu	29.17 ± 2.00 cde	63.38 ± 4.24 a
Zn+Cu	29.67 ± 2.06 cd	62.13 ± 4.33 a
Zn+Fe	42.00 ± 2.28 b	64.73 ± 4.04 a
Cu+Fe	35.83 ± 1.77 bc	55.71 ± 7.03 a
Zn+Cu+Fe	52.17 ± 5.37 a	65.06 ± 4.08 a
Testigo	26.56 ± 4.57 cd	65.76 ± 6.30 a
Media	32.98	62.48
Prob. F	**	ns
DMSH _{0.05}	7.88	12.29
CV %	10.07	8.3

[¶]= medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, p ≤ 0.05).

** p ≤ 0.01, ns = no significativo. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta. CV = coeficiente de variación.

Resultados similares a los del presente estudio encontraron Ahmed *et al.* (2021) quienes al aplicar NP's de Zn a concentraciones de 50 ppm en plantas de tomate registraron un mayor número de racimos, mientras que Zhao *et al.* (2016) observó que la aplicación individual de NP's de Zn, Cu y Fe tienen efectos similares; cabe destacar que la combinación de NP's promovió mayor número de frutos y como consecuencia un mayor rendimiento concordando con Nechitailo *et al.* (2021).

La mayor cantidad de frutos por planta (52.2) en las plantas con suministro de Zn+Cu+Fe es superior a los resultados encontrados por López *et al.* (2018), quienes, en tomate determinado en la región de Sinaloa, reportan 27.82 a 28.97 frutos por planta, similar a lo encontrado en el presente estudio en las plantas del testigo absoluto sin aplicación (26.56 ± 4.57 frutos).

De acuerdo a Barraza *et al.* (2004) la cantidad de frutos está determinada por el número de hojas, ya que estas se encargan de la actividad fotosintética por unidad de área, a su vez, de la velocidad de crecimiento y tamaño final de la planta; a pesar de que durante las prácticas culturales solo se retiraron hojas enfermas de las plantas, en la variable número de hojas no se detectaron diferencias estadísticas significativas.

Diámetro ecuatorial y diámetro polar

Al igual que en el peso promedio de frutos, el diámetro ecuatorial y el diámetro polar no presentaron cambios estadísticos significativos a causa de los tratamientos de NP's. El diámetro ecuatorial promedio registrado en los frutos de las plantas fue de 45.8 cm y el diámetro polar promedio fue de 54.6 cm (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2 Diámetro polar y diámetro ecuatorial en frutos de tomate en función de la aplicación de NP's.

Tratamiento	Diámetro	
	Ecuatorial (cm)	Polar (cm)
Zn	45.96 ± 1.83 a [¶]	53.97 ± 3.79 a
Fe	45.07 ± 3.06 a	53.85 ± 2.02 a
Cu	46.28 ± 2.47 a	54.05 ± 2.52 a
Zn+Cu	45.78 ± 2.70 a	55.31 ± 1.43 a
Zn+Fe	45.70 ± 1.37 a	54.78 ± 0.93 a
Cu+Fe	44.66 ± 2.30 a	51.71 ± 3.20 a
Zn+Cu+Fe	46.57 ± 2.20 a	56.47 ± 3.92 a
Testigo	46.27 ± 1.47 a	56.94 ± 2.06 a
Media	45.78	54.64
Prob. F	ns	ns
DMSH ^{0.05}	5.23	6.31
CV %	9.8	9.8

[¶]= medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

ns = no significativo. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta. CV = coeficiente de variación.

Los resultados obtenidos son similares a los que encontrados por Jawad-Kadhim *et al.* (2021) quienes al aplicar nanofertilizante compuesto por NPK y micronutrientes (8% Fe, 1.5% Zn, 1.5% Mn, 0.5% Cu, 0.5% B y 0.5% Mo) tampoco encontraron diferencias estadísticas significativas en el diámetro ecuatorial ni en el diámetro polar de frutos de tomate.

Número de flores y número de racimos

Las variables número de flores y número de racimos (NR) mostraron diferencias estadísticas significativas como consecuencia de la aplicación de NP's, y de acuerdo al análisis estadístico ANOVA y la prueba complementaria de Tukey 5% se determinó que los tratamientos en donde se aplicó Cu+Fe (73.09 ± 5.07), Zn+Cu+Fe (72.92 ± 4.74) y Cu (72.42 ± 6.51), fueron los que generaron mayor número de flores con respecto al testigo y a los demás tratamientos (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3 Prueba de Tukey al 5% para las variables de respuesta Número de flores y número de racimos en plantas de tomate determinado.

Tratamiento	Número de flores	Número de racimos
Zn	65.67 ± 3.17 ab [¶]	21.67 ± 0.98 bc
Fe	60.34 ± 5.33 b	21.09 ± 2.46 c
Cu	72.42 ± 6.51 a	26.50 ± 2.73 ab
Zn+Cu	62.33 ± 5.66 ab	21.25 ± 2.38 c
Zn+Fe	62.22 ± 3.18 ab	22.59 ± 2.62 abc
Cu+Fe	73.09 ± 5.07 a	26.84 ± 2.14 ab
Zn+Cu+Fe	72.92 ± 4.74 a	27.58 ± 2.47 a
Testigo	61.08 ± 5.11 b	23.67 ± 1.94 abc
Media	66.26	23.89
Prob. F	**	**
DMSH _{0.05}	11.19	5.21
CV %	7.12	9.18

[¶]= medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

** $p \leq 0.01$. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error. CV = coeficiente de variación.

Por lo que la aplicación de NP's de Zn+Cu+Fe promovió un 16.23% más cantidad de floración, por planta e incrementó en 14.17% el número de racimos con respecto a las plantas del testigo sin aplicación.

Al igual también se observó que estos mismos tratamientos desarrollaron mayor número de racimos, a las plantas en donde se le suministró Zn+Cu+Fe (27.58 ± 2.47 racimos), Zn+Cu (26.84 ± 2.14 racimos) y Cu (26.50 ± 2.73 racimos); entre estas dos variables de respuesta el elemento Cu es que es común entre ellos, por lo que se le puede atribuir que tenga influencia en el desarrollo de la floración, entre los dos primeros tratamientos los dos mejores resultados son los tratamientos que contienen Fe y Cu.

Variables de calidad

Contenido nutricional en fruto

Con respecto al contenido de macroelementos (N, P, K, Ca, Mg, S, Na) en el fruto, no presentaron cambios, ya que son muy parecidas las concentraciones de estos elementos en los frutos de las plantas del testigo sin aplicación.

A consecuencia de la aplicación foliar de NP's metálicas, se generó sinergismos entre los microelementos, en el tratamiento donde se aplicaron NP's de Cu, se incrementó la concentración de tres elementos, el Mg fue de 35.2 mg kg⁻¹, 9.68 mg kg⁻¹ y B fue de 28 mg kg⁻¹, todos ellos con respecto al testigo.

En los frutos de las plantas en donde se suministró Zn+Cu se obtuvo las concentraciones más altas en Fe (121 mg kg⁻¹) y Zn (55.4 mg kg⁻¹), en las plantas con aplicación de Zn+Fe+Cu los frutos tuvieron las concentraciones más altas en Ni (13.3 mg kg⁻¹) y Mo (4.57 mg kg⁻¹). Así mismo, estos frutos presentaron mayores concentraciones de todos los elementos en comparación con los frutos de las plantas del testigo a excepción del B, que fue superior el contenido en los frutos del testigo.

También se encontró que en las plantas con suministró de combinación de nanopartículas y con aplicación de sólo Cu, los frutos incrementaron el contenido de Ni y Mo, condición que no se presentó en los frutos de las plantas sin aplicación de NP's y en los frutos de plantas con aplicación de Zn y Fe como NP's (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4 Contenido nutrimental en frutos de tomate en función de la aplicación de nanopartículas de metales pesados.

Trat	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Ni	Mo
	----- % -----							----- mg kg ⁻¹ -----						
Zn	3.46	0.52	3.90	0.06	0.20	0.23	0.03	63.2	43.1	32.4	7.88	3.9	0.88	0.00
Fe	3.17	0.46	3.73	0.08	0.18	0.22	0.03	63.1	45.0	30.7	4.71	14.3	0.01	0.01
Cu	3.23	0.48	4.15	0.14	0.19	0.21	0.03	88.4	50.1	35.2	9.68	28.0	9.49	0.00
Zn+Cu	3.28	0.49	4.51	0.08	0.20	0.22	0.03	121	55.4	33.3	5.39	21.0	2.95	0.01
Zn+Fe	3.33	0.55	4.36	0.04	0.21	0.24	0.03	75.5	38.2	33.2	6.89	5.52	4.16	1.38
Cu+Fe	3.32	0.51	3.81	0.08	0.20	0.23	0.03	57.0	39.8	31.4	5.82	12.8	2.35	3.73
Zn+Cu+Fe	3.20	0.47	4.10	0.15	0.18	0.18	0.03	79.0	51.6	33.6	9.55	16.0	13.3	4.57
Testigo	3.25	0.53	3.93	0.10	0.18	0.23	0.03	58.0	40.5	30.5	5.34	18.3	0.00	0.01

La absorción del Ni en las plantas se realiza a través del sistema radical, y su transporte es pasivo y activo, en el análisis no presenta antagonismo con los elementos Cu^{2+} y Zn^{2+} en el suelo, que pudieran inhibir la asimilación, ya que en el análisis nutrimental son superiores a las concentraciones del testigo; el Ni es llevado de las raíces a los brotes y hojas a través de la transpiración por medio del xilema y este metal es un cofactor de la activación de la ureasa, ya que requiere dos átomos de Ni para ser activada. Esta enzima cataliza la hidrólisis de urea para producir amonio, por tanto, el Ni es muy importante en varios procesos metabólicos del nitrógeno (Yusuf *et al.*, 2011; Rodríguez-Jiménez *et al.*, 2016).

La absorción de Mo es en forma de molibdato (MoO_4^{2-}), es un elemento móvil a través del xilema y floema, tiene la función de cofactor en la asimilación del nitrógeno, en enzimas como nitrato reductasa y nitrogenasa, también en las enzimas xantina deshidrogenasa/oxidasa, aldehído oxidasa y en el sulfito reductasa. La función de la enzima nitrogenasa es la fijación biológica del nitrógeno y la nitrato reductasa es la responsable de la reducción del nitrato (NO_3^-) a nitrito (NO_2^-) hasta formar amoniaco (NH_3) y posteriormente amonio (NH_4^+), compuesto absorbido por la planta y que se utiliza para formar aminoácidos (Kaiser *et al.*, 2005; INTAGRI, 2018).

Los resultados de la presente investigación concuerdan con investigaciones realizadas en tomate por Pejam *et al.* (2021), quienes encontraron que la aplicación

de NP's de Fe modificó el estado nutricional, la actividad de la enzima nitrato reductasa, la concentración de prolina y provocaron la modificación del metabolismo primario del nitrógeno. Las NP's de Fe promueven la actividad de enzimas de procesos antioxidantes, como lo menciona que Tawfik *et al.* (2021), que tales enzimas en donde hay mayor actividad son peroxidasa, p-Polifenol oxidasa, super oxido dismutasa y nitrato reductasa; las molibdeno-enzimas son cofactores de la reducción del nitrato a nitrito, y como consecuencia la disponibilidad de nitrógeno colabora con la formación de clorofila, se aumenta la actividad fotosintética y como consecuencia un mayor desarrollo, por lo que el tratamiento en donde se le aplicó NP's de Zc+Cu+Fe fue el que mejor rendimiento de frutos presentó y fue con el que los frutos de las plantas presentaron la mayor concentración de Mo.

Así mismo, López-Vargas *et al.* (2018) mencionan que al aplicar NP's de Cu en tomate se incrementó la actividad de las enzimas catalasa y superóxido dismutasa, que son responsables de la eliminación de las ERO's. Por tanto, los tratamientos en donde se combinan NP's logran incrementar procesos enzimáticos y otras la eliminación ERO's, recordando que la célula de la planta para poder obtener el nutriente mineral de la NP's es mediante procesos de generación de ERO's.

También Faraz *et al.* (2022), indican que la aplicación foliar de NP's de Zn incrementaron la actividad de las enzimas catalasa, peroxidasa y superóxido dismutasa en plantas de tomate. Además, investigaciones de Sbartaí *et al.* (2011) menciona que también interviene en las enzimas glutathion-s-transferasas y ascorbato peroxidasa.

Con relación a la combinación de las NP's metálicas, es posible que exista afinidad de la activación del sistema antioxidante de la planta, es que a pesar de los factores abióticos durante el ciclo del cultivo se logró obtener un rendimiento de acuerdo a lo reportado por López-Santiago (2018), cuando se evaluaron híbridos de tomate determinado en Sinaloa; aunque se requiere profundizar más en los mecanismos de absorción, asimilación y traslocación de los nutrientes suministrados Zn, Fe y Cu como NP's; para determinar cuáles son las que eliminan

las ERO's y cuales activan enzimas que tienen función estructural o son cofactores de otras.

La aplicación foliar de NP's de Cu promueve la acumulación de este elemento en los frutos, ya que, en el análisis nutrimental en frutos de tomate, en las plantas con suministro de NP's de Cu fue más alto (Cuadro 24). Resultado que difiere con lo encontrado por López-Vargas *et al.* (2018), quienes con la aplicación de las NP's de Cu en drench en el cultivo no incrementó el contenido de Cu en el fruto.

Contenido de hierro

El tratamiento que promovió una alta concentración de Fe en fruto de tomate fue el suministro de NP's de Zn+Cu, a pesar de no haber generado el más alto rendimiento de frutos. Existe la incertidumbre sobre la seguridad alimenticia de la producción, ya que se utilizaron NP's derivadas de síntesis química; la concentración del tratamiento que obtuvo el mejor rendimiento económico fue la combinación de nanopartículas de Zn+Cu+Fe el cual se obtuvo una concentración en fruto de 0.54 mg por cada 100 gramos de fruto fresco (Cuadro 4.5).

En Bolivia el contenido de Fe en tomates en variedades redondo y perita es de 1 a 1.1 (PROSISUR-IICA, 2014); mientras que el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación Española (MAPA) reporta una concentración en tomate de 0.60 mg de Fe por cada 100 gramos de fruto fresco, lo que indica que los valores reportados por el laboratorio están dentro de rangos para consumo humano.

Cuadro 4.5 Límites máximos de consumo recomendado de Fe (NIH, 2022) versus contenido de Fe por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Edades	Límite máximo recomendado	Contenido 100 g⁻¹
Bebes hasta los 12 meses de edad	40 mg	0.54 mg
Niños de 1 a 13 años de edad	40 mg	
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	45 mg	
Adultos de 19 o más años de edad	45 mg	

Contenido de Zinc

Hubo un aumento de contenido de Zn en el fruto en respuesta a la aplicación de NP's de forma foliar, destaca que el suministró Zn+Cu generó frutos con la mayor concentración, en el caso de la aplicación de Zn+Cu+Fe el contenido de Zn en frutos fue de 0.356 mg de Zn por porción de 100 g de tomate. El contenido de zinc en el fruto fresco por porción de 100 g de fruto tomate tratado con NP's de Zn+Cu+Fe es de 0.356 mg, este valor está por debajo de lo que permite (NIH), por lo tanto, es seguro para su consumo (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6 Límites máximos de consumo recomendado de Zn (NIH, 2022) versus contenido de Zn por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Edades	Límite máximo recomendado	Contenido 100 g⁻¹
Bebes hasta los 6 meses de edad	4 mg	0.356 mg
Bebes de 7 a 12 meses de edad	5 mg	
Niños de 1 a 3 años de edad	7 mg	
Niños de 4 a 8 años de edad	12 mg	
Niños de 9 a 13 años de edad	23 mg	
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	34 mg	
Adultos de 19 o más años de edad	40 mg	

Contenido de Manganeso

Las aplicaciones de NP's en plantas de tomate incrementó ligeramente el contenido de Mn en frutos, Cuando se suministró Zn+Fe+Cu se registró 33.6.2 mg kg⁻¹ que corresponde a 0.231 mg de Mn por cada 100 g de fruto fresco, la concentración de Mn es menor al límite máximo de consumo recomendado, por lo que es seguro su consumo (Cuadro 4.7).

Cuadro 4.7 Límites máximos de consumo recomendado de Mn (NIH, 2022) versus contenido de Mn por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Edades	Límite máximo recomendado	Contenido 100 g ⁻¹
Bebes hasta los 6 meses de edad	ND	0.231 mg
Bebes de 7 a 12 meses de edad	ND	
Niños de 1 a 3 años de edad	2 mg	
Niños de 4 a 8 años de edad	3 mg	
Niños de 9 a 13 años de edad	6 mg	
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	9 mg	
Adultos	11 mg	
Adolescentes embarazadas o en periodo de lactancia	9 mg	
Mujeres embarazadas o en periodo de lactancia	40 mg	

Contenido de Cobre

En plantas en donde se le suministraron NP's de Zn+Cu+Fe se incrementó la concentración de Cu en 50.7% al presentar 9.55 mg kg⁻¹ que corresponde a 60 mg de Cu por cada 100 gramos de fruto fresco, de acuerdo a los límites máximos de consumo recomendado por NIH, el contenido de Cu en los frutos es inferior a las concentraciones máximas recomendables por lo el alimento es seguro para consumo humano (Cuadro 4.8).

Cuadro 4.8 Límites máximos de consumo recomendado de Cu (NIH, 2022) versus contenido de Cu por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Edades	Límite máximo recomendado	Contenido 100 g ⁻¹
Bebes hasta los 12 meses de edad	No determinado	60 mg
Niños de 1 a 3 años de edad	1000 µg	
Niños de 4 a 8 años de edad	3000 µg	
Niños de 9 a 13 años de edad	5000 µg	
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	8000 µg	
Adultos de 19 o más años de edad	10,000 µg	

Contenido de Boro

Con respecto a este elemento, con la aplicación de Zn+Cu+Fe que fue con el que se logró el mayor rendimiento de fruto, se encontró un ligero decremento en la concentración de boro en el fruto respecto a los frutos del testigo al presentar 16 mg kg⁻¹ que corresponde a 0.1104 mg de boro en una porción de 100 g, de acuerdo a los límites máximos de consumo recomendado por NIH. La concentración de boro es inferior a las concentraciones reportadas, por lo que con respecto a este nutriente el alimento es seguro su consumo (Cuadro 4.9).

Cuadro 4.9 Límites máximos de consumo recomendado de B (NIH, 2022) versus contenido de B por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Edades	Límite máximo recomendado	Contenido 100 g⁻¹
Bebes hasta los 6 meses de edad	ND	0.1104 mg
Infantes de 7 a 12 meses	ND	
Niños de 1 a 3 años de edad	3 mg	
Niños de 4 a 8 años de edad	6 mg	
Niños de 9 a 13 años de edad	11 mg	
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	17 mg	
Adultos	20 mg	
Adolescentes embarazadas o en periodo de lactancia	17 mg	
Mujeres embarazadas o en periodo de lactancia	20 mg	

Contenido de Níquel

En plantas en donde se le suministraron NP's de Zn+Cu+Fe aumentó el contenido de Ni en frutos en 13.3%, por lo que promovió la absorción a 0.09 mg de Ni por cada 100 gramos de fruto fresco, de acuerdo a los límites máximos de consumo recomendado por NIH, la concentración de níquel en frutos es inferior a las concentraciones recomendadas máximas por NIH, por lo que el alimento es seguro para la alimentación humana (4.10).

Cuadro 4.10 Límites máximos de consumo recomendado de Ni (NIH, 2022) versus contenido de Ni por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Edades	Límite máximo recomendado	Contenido 100 g⁻¹
Bebes hasta los 6 meses de edad	ND	0.09 mg
Infantes de 7 a 12 meses	ND	
Niños de 1 a 3 años de edad	0.2 mg	
Niños de 4 a 8 años de edad	0.3 mg	
Niños de 9 a 13 años de edad	0.6 mg	
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	1 mg	
Adultos	1 mg	
Mujeres embarazadas o en periodo de lactancia	No determinado	

Contenido de Molibdeno

En plantas con NP's de Zn+Cu+Fe se incrementó el contenido 0.03 mg (30 µg) de Mo por cada 100 gramos de fruto fresco, de acuerdo a los límites máximos de consumo recomendado NIH, La concentración de Mo en los frutos es inferior a las concentraciones de límites máximos de consumo recomendado por NIH, por lo que estos frutos son apropiados para consumo humano (Cuadro 4.11).

Cuadro 4.11 Límites máximos de consumo recomendado de Mo (NIH, 2022) versus contenido de Mo por porción de 100 g en frutos de tomate en plantas donde se le suministro combinación de NP's de Zn+Cu+Fe.

Edades	Límite máximo recomendado	Contenido 100 g⁻¹
Bebes hasta los 12 meses de edad	ND	30 µg
Niños de 1 a 3 años de edad	300 µg	
Niños de 4 a 8 años de edad	600 µg	
Niños de 9 a 13 años de edad	1,000 µg	
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	1,700 µg	
Adultos	2,000 µg	
Mujeres embarazadas o en periodo de lactancia	ND	

La aplicación de la combinación de NP's de Zn+Cu+Fe desarrollo frutos de tomate con mayores cantidades de nutrimentos en hierro (26.6%), zinc (21.5%), Mn (9.2%) y Cu (44.1%); además de que se encuentran otros elementos de importancia en la salud humana que son el Ni y el Mo (Figura 72), esto concuerda con lo mencionado por Nechitailo *et al.* (2021) y Hernández-Hernández *et al.* (2019) quienes indican que la aplicación de NP's mejoran el contenido nutrimental en tomate (Figura 4.12).

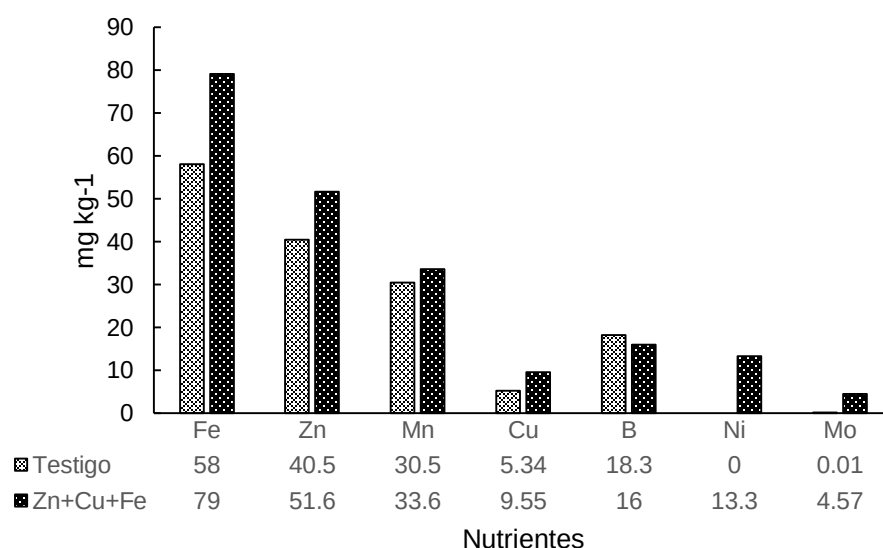


Figura 4.12 Comparativo nutrimental entre el testigo y plantas con aplicaciones foliares de NP's de Zn+Cu+Fe.

Resultados similares a los del presente estudio encontró Rahmatizadeh *et al.* (2019) aplicaciones foliares de NP's de Fe₃O₄ a concentraciones de 20 mg L⁻¹ promovió la absorción de Fe y Ca en tomate; de acuerdo a las hojas informativas para los consumidores por la organización National Institutes of Health (NIH, 2022) en USA, y de acuerdo con Ramírez-Hernández *et al.* (2015) los siguientes son oligoelementos esenciales: Zn, Cu, Fe, Mn, Ni, Mo) y no esenciales el Boro y son necesarios para el organismo humano.

Debido a que frutos de las plantas tratadas con NP's de manera general incrementaron el contenido nutrimental, se estaría abriendo la posibilidad a la

producción de alimentos nutraceuticos por medio de nanopartículas; lo que favorecería el combate de enfermedades, es bien sabido la importancia del Zn, Cu, Fe y Se para el fortalecimiento del sistema de defensas del cuerpo humano en el control futuro del COVID-19 como lo menciona Singh *et al.* (2020); al igual que Ramírez-Hernández *et al.* (2015) que proponen la utilización de oligoelementos con fines terapéuticos.

Solidos solubles, potencial de hidrogeno y acidez

En el cuadro 4.13 se puede observar que la aplicación de las NP's de manera individual y en combinación a las concentraciones de 10 mg L⁻¹ no tienen efecto en las variables sólidos solubles totales, pH y acidez. Esto difiere con lo reportado por Ahmed *et al.* (2021), que mostraron un aumento en sólidos solubles en frutos de tomate por las aplicaciones foliares en concentraciones de NP's de Zn en tomate a concentraciones 50 mg L⁻¹.

Cuadro 4.13 Variables Solidos solubles (SS), potencial de hidrogeno (pH) y acidez (% ácido cítrico) en tomate determinado roma mediante aplicación de nanopartículas.

Tratamiento	SST (°Brix)	pH	Acidez %
Zn	3.65 ± 0.21 a [¶]	4.43 ± 0.13 a	0.705 ± 0.0260 a
Fe	3.60 ± 0.43 a	4.20 ± 0.35 a	0.585 ± 0.0027 a
Cu	3.70 ± 0.42 a	4.45 ± 0.13 a	0.609 ± 0.0042 a
Zn+Cu	3.58 ± 0.19 a	4.43 ± 0.15 a	0.605 ± 0.0159 a
Zn+Fe	3.63 ± 0.13 a	4.48 ± 0.10 a	0.593 ± 0.0098 a
Cu+Fe	3.65 ± 0.37 a	4.45 ± 0.19 a	0.538 ± 0.0318 a
Zn+Cu+Fe	4.10 ± 0.81 a	4.38 ± 0.15 a	0.716 ± 0.0020 a
Testigo	3.73 ± 0.30 a	4.40 ± 0.08 a	0.708 ± 0.0003 a
Media	3.70	4.40	0.6324
Prob. F	ns	ns	*
DMSH _{0.05}	0.928	0.408	0.147
CV %	10.56	3.90	17.06

[¶]= medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, p≤ 0.05).

* p≤ 0.05. ns = no significativo. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error. CV = coeficiente de variación.

Las propiedades sensoriales son importantes, pues, en el tomate el sabor es un parámetro importante, ya que es un alimento, por lo que fue importante determinar si el uso de nanotecnología modifica el sabor que está determinado entre otras cosas por los azúcares (fructosa y glucosa), aminoácidos libres (Glutamato), ácidos orgánicos (ácido cítrico) y compuestos que proporcionan aroma (Dávila-Aviña *et al.*, 2011). Martín-Hernández *et al.* (2012) mencionan que para un mejor sabor se requiere de un alto contenido de azúcares y ácidos; un contenido alto de ácidos y bajos de azúcares produce un sabor ácido, uno alto en azúcares y bajo en ácidos dan un sabor suave, y ambos bajos dan un sabor insípido.

De acuerdo a la tabla de calidad en tomate Roma propuesta por Cantwell *et al.* (2007), menciona que el puntaje 1 = $TSS \leq 4.5\%$, 2 = $4.5\% \leq TSS \leq 5.0\%$ y 3 = $TSS \geq 5.0\%$; y para la acidez el puntaje 1 = $acidez \leq 0.30\%$, 2 = $0.30\% \leq acidez \leq 0.40\%$ y 3 = $acidez \geq 0.40\%$, considerando que 1 = baja calidad, 2 = calidad intermedia y 3 = alta calidad. Los tomates frescos tipo Roma que se comercializan en USA han reportado la calidad en sabor en las variedades Mónica (1.7), BSS526 (2.2), SD257 (1.5), PX 739 (1.5), Mi Roma (1.4) y Mi Rey (1.4); mientras que los tomates producidos en aplicación de nanopartículas fueron uniforme con una calidad 2, retomando los valores anteriores de los análisis estadísticos de SS, acidez se valoriza de acuerdo a la escala propuesta por Cantwell (2007) (Cuadro 4.14).

Cuadro 4.14 Evaluación del sabor en tomate determinado roma de acuerdo a la escala de Catwell *et al.* (2007).

NP's	Acidez	TSS	Acidez	TSS	Puntuación
Zn	0.705 ± 0.0260^{II}	3.65 ± 0.21	3	1	2
Cu	0.585 ± 0.0027	3.60 ± 0.43	3	1	2
Fe	0.609 ± 0.0042	3.70 ± 0.42	3	1	2
Zn+Cu	0.605 ± 0.0159	3.58 ± 0.19	3	1	2
Zn+Fe	0.593 ± 0.0098	3.63 ± 0.13	3	1	2
Cu+Fe	0.538 ± 0.0318	3.65 ± 0.37	3	1	2
Zn+Cu+Fe	0.716 ± 0.0020	4.10 ± 0.81	3	1	2
Testigo	0.708 ± 0.0003	3.73 ± 0.30	3	1	2

Por lo que la aplicación de las nanopartículas a las concentraciones estudiadas no tiene impacto en el sabor del fruto, probablemente con el ajuste de la fertilización se pueda aumentar el contenido TSS y como consecuencia elevar la calidad en sabor.

Mientras que en la variable de firmeza (kg cm^{-2}) fueron con la aplicación de Fe y Zn+Cu+Fe los que presentaron la mayor firmeza con 4.867 kg cm^{-2} y 5.008 kg cm^{-2} respectivamente (Cuadro 4.15). Con respecto a la humedad no hubo diferencias estadísticas significativas (Cuadro 3.13), resultados similares obtuvieron Ahmed *et al.* (2021) en tomate con aplicaciones foliares de NP's de Zn en concentración de 100 mg L^{-1} con lo que se logró firmeza de 3.66 kg cm^{-2} .

Cuadro 4.15 Variables de respuesta de firmeza y humedad en tomate roma.

Tratamiento	Firmeza, Kg cm^{-2}	Humedad, %
Zn	3.075 ± 1.22 b	0.928 ± 0.0053 a
Fe	4.867 ± 0.63 a	0.935 ± 0.0019 a
Cu	3.817 ± 0.66 ab	0.930 ± 0.0053 a
Zn+Cu	3.721 ± 0.69 ab	0.931 ± 0.0019 a
Zn+Fe	3.173 ± 0.32 b	0.931 ± 0.0026 a
Cu+Fe	3.679 ± 0.51 ab	0.932 ± 0.0007 a
Zn+Cu+Fe	5.008 ± 0.69 a	0.931 ± 0.0056 a
Testigo	3.838 ± 0.61 ab	0.932 ± 0.0020 a
Media	3.897	0.931
Prob. F	*	ns
DMSH _{0.05}	1.63	0.009
CV %	17.68	0.39

[¶]= medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

* $p \leq 0.05$. ns = no significativo. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error. CV = coeficiente de variación.

Considerando la tabla de calidad en tomate Roma propuesta por Cantwell *et al.* (2007), para la firmeza se tienen los valores de 1 = firmeza ≤ 15 Newton, 2 = $15 \leq$ firmeza ≤ 20 y 3 = firmeza ≥ 20 newton, derivado de la conversión resultante de la multiplicación de la firmeza (kg cm^{-2}) por el factor 9.8 m s^{-2} se obtiene el cuadro 36, y se determina que todos los frutos están por encima de 20 newton, por lo que la firmeza de los tomates en general está en la calidad máxima (Cuadro 4.16).

Cuadro 4.16 Evaluación de la firmeza en tomate determinado roma de acuerdo a la escala de Catwell *et al.* (2007).

NP's	Newton cm ²	Puntuación
Zn	30.2	3
Fe	47.7	3
Cu	37.4	3
Zn+Cu	36.5	3
Zn+Fe	31.1	3
Cu+Fe	36.1	3
Zn+Cu+Fe	49.1	3
Testigo	37.7	3

Las NP's de Zn, Fe y Cu a estas concentraciones no tienen efecto en las variables de calidad mencionadas, mantienen características similares al testigo. Al ser la nanotecnología algo reciente en la agricultura, existe aún incertidumbre en la población por el consumo de tomates tratados con nanopartículas.

Licopeno

En plantas de tomate en donde se le suministró Fe, Zn+Cu, Cu+Fe y Zn+Cu+Fe se registraron incrementos significativos en el contenido de licopeno, respecto a los frutos de las plantas del testigo. Los mayores incrementos se registraron en los frutos con Zn+Cu+Fe con lo que se logró duplicar el contenido de licopeno en comparación de los frutos de las plantas sin aplicación.

Estos resultados son similares a los encontrados por Ahmed *et al.* (2021) en tomate, quienes al aplicar NP's de Zn de manera foliar promovieron el aumento de licopeno en tomate, de la misma manera que López-Vargas *et al.* (2018) quienes con la aplicación foliar de NP's de Cu aumentaron significativamente la concentración de licopeno (Figura 4.11).

En los frutos de las plantas en donde se suministró de manera individual las NP's de Zn y Cu, se registraron valores similares a los del testigo. Cabe mencionar

que a temperaturas mayores de 30 °C se inhibe la síntesis de licopeno (Brandt *et al.*, 2005). La temperatura máxima alcanzada en los meses de producción del presente estudio fue de 38.5 a 41 °C, sin embargo, se registraron valores altos con algunos tratamientos aplicados (Delgado-Alvarado y Luna-Guevara, 2014).

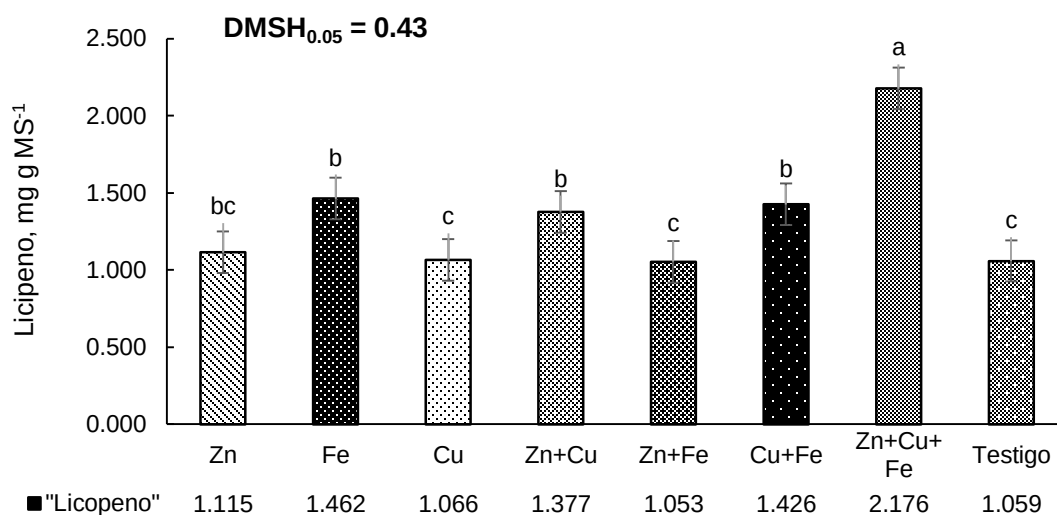


Figura 4.11 Concentración de licopeno (mg Licopeno por g de MS⁻¹) en fruto tomate. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

De igual manera, El-Raie *et al.* (2015) menciona que la aplicación de NP's de Fe en tomate promovió el incremento de licopeno; por tanto, en el tratamiento en donde se aplicó NP's de Zn+Cu+Fe, la respuesta favorable en el incremento de este compuesto pudo ser en parte atribuida a este elemento, ya que el Fe tiene la función de activar el sistema antiestrés de la planta y las rutas de metabolización de licopeno.

Mientras que Ramos-Muñoz *et al.* (2017) en Zacatecas mencionan que los tomates tienen un contenido de licopeno de 38.4 mg kg⁻¹ con un manejo orgánico, mientras que los tomates en el supermercado alcanzan 25 mg kg⁻¹ de licopeno; en Polonia el investigador Górecka *et al.* (2020) menciona que los tomates alcanzan una concentración de 25.4 mg kg⁻¹; mientras en Canadá Rao *et al.* (2006) la concentración de los tomates es de 0.72-20 mg kg⁻¹; y en USA se reporta que los tomates tienen concentración de 25.70 mg kg⁻¹ (USDA, 2022, SicarFarms, 2022).

En la presente investigación se aprecia que la concentración de licopeno es de 10.59 mg kg⁻¹ en el testigo, esta baja concentración se puede atribuir a las altas temperaturas que se presentaron dentro de la casa malla sombra. Mientras que con el suministraron de las NP's metálicas Zn+Cu+Fe, los tomates presentaron concentraciones de 21.76 mg kg⁻¹ aun a las mismas condiciones de cultivo que las plantas del testigo, por lo que las NP's promovieron la síntesis de licopeno. Resultados similares encontraron Pérez-Labrada *et al.* (2019) al utilizar NP's de Cu a concentraciones de 250 mg L⁻¹ y bajo estrés salino, logrando obtener tomates con 33.56 mg kg⁻¹.

Materia seca

Las plantas que mostraron la mayor acumulación de materia seca fueron los tratadas con NP's individuales de Zn (244.87 g) y la combinación Zn+Cu+Fe (238 g), valores que son superiores a los registrados en las plantas del testigo en un 30.2% y 28.4%, respectivamente; por lo que la aplicación de NP's promovieron la acumulación de materia seca (Figura 4.12).

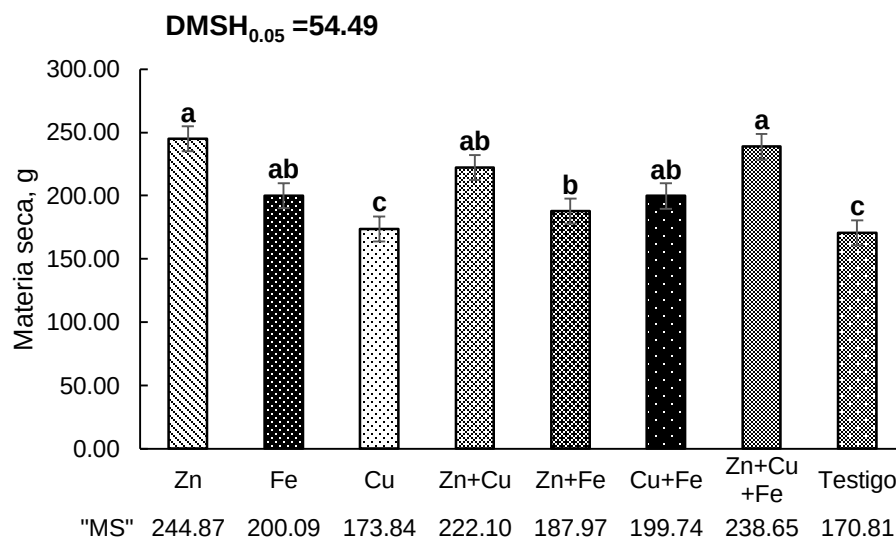


Figura 4.12 Producción de materia seca en función de la aplicación de NP's en plantas de tomate. DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad del error.

Resultados similares encontraron Zhao *et al.* (2014) al aplicar aspersiones foliares de NP's de ZnO a concentraciones de 10 mg kg⁻¹ en plántulas de garbanzo (*Cicer arietinum*), dando como resultados una mayor cantidad de biomasa seca, al igual que Tarafdar *et al.* (2014) y Taheri *et al.* (2015) en diferentes cultivos promovieron la producción de materia seca en un 12.4% y 39%. Mientras que Méndez *et al.* (2016) y Mohammad *et al.* (2021) promovieron la producción de materia seca al aplicar NPs de Zn bajo estrés por sodio en tomate (*Lycopersicon esculentum*).

Vigor de planta

El cuadro 4.17 observamos que al suministrar nanopartículas de Zn se registraron 80% plantas con buen vigor y se extiende hasta un 90% al considerar plantas de vigor medio; con el suministró de Zn+Cu+Fe se observaron hasta 70% de plantas de buen vigor y 20% de plantas de vigor medio, con respecto al testigo, solo se registró 50% de plantas vigorosas.

Cuando se aplicó Cu+Fe solo se obtuvieron 50% de plantas de buen vigor.

Cuadro 4.17 Medidas de posición de las características de vigor en plantas de tomate.
Nota: Las características se mencionan en el cuadro 19.

	Zn	Fe	Cu	Zn+Cu	Zn+Fe	Cu+Fe	Zn+Cu+Fe	Testigo
Moda	1	3	3	3	1	4	1	1
Mediana	1.5	2	3	3	2	3	2	2
Máximo	3	5	5	5	4	5	5	5
Mínimo	1	1	1	1	1	1	1	1
Cuartil (0.25)	1	1	2	1	1	2	1	1
Cuartil (0.50)	1.5	2	3	3	2	3	2	2
Cuartil (0.75)	2	3	3	3	3	4	3	3
Percentil (0.80)	2	3	4	3	3	4	3	3
Percentil (0-90)	3	3	5	4	4	5	3	3

Si comparamos el nivel de vigor de las plantas con el rendimiento de fruto, las plantas en donde se suministró solo NP's de Zn son las más vigorosas, pero no lograron el mayor rendimiento de fruto (1.791 kg/planta), mientras que con

Zn+Cu+Fe se obtuvo la mayor producción (2.876 kg/planta); aunque con este tratamiento se comportó similar el vigor de planta al testigo.

Por lo que la respuesta del incremento del rendimiento económico está en función de los procesos metabólicos que se activan por medio de la aplicación de nanopartículas. se puede destacar que el vigor de las plantas también está en función de factores abióticos, como en el caso de las altas temperaturas en la casa malla sombra (Figura 4.13) que oscilaron de 38.5 – 41 °C, por lo que las plantas donde se suministraron nanopartículas de manera individual Zn, todas las plantas se mantuvieron con un buen vigor.

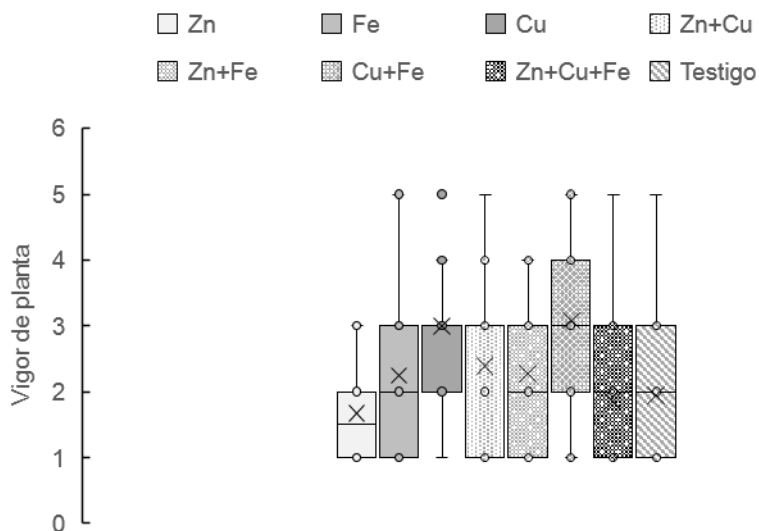


Figura 4.13 Respuesta del vigor de las plantas derivado de la aplicación foliar de Nanopartículas.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Abdul Kareem *et al.* (2022), quienes mencionan que la aplicación de NP's de Zn protege a los cultivos por daños causados por estrés de altas temperaturas, condición en la cual, los cultivos alteran sus procesos morfológicos y fisicoquímicos, reducen el rendimiento y alteran la homeostasis celular debido a la producción excesiva de oxígeno reactivo, tales como: peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y malondialdehído (MDA), lo que se manifiesta por una alta permeabilidad y el aumento de lípidos peroxidación. Por

lo que las plantas activan su sistema antiestrés, que consiste en la activación de enzimas antioxidantes que eliminan las especies reactivas de oxígeno como dismutasa (SOD), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT). Esto puede explicar el bajo rendimiento de frutos de las plantas del testigo.

Los resultados registrados en plantas con nanopartículas de Zn+Cu+Fe, concuerdan con Nechitailo *et al.* (2021), quienes mencionan que al utilizar nanopartículas de Fe, Cu y Zn se promueve el desarrollo y crecimiento en plantas cultivadas en el espacio como una alternativa para consumir el CO₂ y proveer de oxígeno a los astronautas, ya que las nanopartículas poseen características ideales para fertilizar las plantas.

Análisis económico

Con la finalidad de abordar el tercer objetivo específico que corresponde al análisis de la rentabilidad financiera y económica de la producción de tomate usando la combinación de NP's Zn+Cu+Fe con el que se registró el mayor rendimiento de fruto de tomate, se utilizó la utilidad neta y el indicador de relación costo/beneficio (B/C) (Cuadro 4.18), usando la metodología de Mundo *et al.* (2019) en tomate bajo invernadero (Ver Anexo 1).

Cuadro 4.18 Utilidad y Beneficio-Costo en la producción de tomate con nanopartículas en plantas tratadas con NP's Zn+Cu+Fe.

Costos incurridos	MNX
<u>Costos preoperativos (CP)</u>	
Preparación de suelo	\$ 0.00
Alcoholado	\$ 1232.00
Sistema de riego	\$ 1,187.68
<u>Subtotal</u>	\$ 2,419.68
<u>Costos fijos (CF)</u>	
Renta	\$ 0.00
Mantenimiento infraestructura	\$ 43.00
Mantenimiento equipo	\$ 0.00
Agua	\$ 43.12
Energía eléctrica	\$ 11.47
<u>Subtotal</u>	\$ 97.59
<u>Costos Variables (CV)</u>	
Análisis de suelo	\$ 545.50
Análisis de agua	\$ 382.50
Plantilla	\$ 700.00
Material de tutorado	\$ 2,030.00
Control de maleza	\$ 0.00
Control de plagas, enfermedades y nutrición foliar	\$ 1,441.22
Nanopartículas	\$ 23.86
Fertiirrigación	\$ 645.86
Combustible de transporte	\$ 4,200.00
Mano de obra	\$ 0.00
<u>Subtotal</u>	\$ 9,968.94
Costos de producción (CP+CF+CV)	\$12,486.21
Ingresos por ventas (2.87 kg planta ⁻¹)	\$12,942.00
Utilidad neta (Costos producción – utilidad)	\$ 455.79
Beneficio-costo	1.036

Por tanto, se puede concluir que hubo una utilidad neta de \$455.79 MXN y el indicador beneficio-costo es de 1.03, esto nos indica que los ingresos son mayores de los costos de producción lo que significa que es rentable.

Producción sin nanopartículas

El análisis económico en la producción de tomate sin el uso de tecnología se muestra en el Cuadro 4.19.

Cuadro 4.19 Utilidad y Beneficio-Costo en la producción de tomate sin nanopartículas (testigo).

Costos incurridos	MNX
<u>Costos preoperativos (CP)</u>	
Preparación de suelo	\$ 0.00
Alcoholado	\$ 1232.00
Sistema de riego	\$ 1,187.68
<u>Subtotal</u>	\$ 2,419.68
<u>Costos fijos (CF)</u>	
Renta	\$ 0.00
Mantenimiento infraestructura	\$ 43.00
Mantenimiento equipo	\$ 0.00
Agua	\$ 43.12
Energía eléctrica	\$ 11.47
<u>Subtotal</u>	\$ 97.59
<u>Costos Variables (CV)</u>	
Análisis de suelo	\$ 545.50
Análisis de agua	\$ 382.50
Plantilla	\$ 700.00
Material de tutorado	\$ 2,030.00
Control de maleza	\$ 0.00
Control de plagas, enfermedades y nutrición foliar	\$ 1,441.22
Nanopartículas	\$ 0.00
Fertiirrigación	\$ 645.86
Combustible de transporte	\$ 4,200.00
Mano de obra	\$ 0.00
<u>Subtotal</u>	\$ 9,287.08
Costos de producción (CP+CF+CV)	\$12,486.21
Ingresos por ventas (1.729 kg planta ⁻¹)	\$ 7,780.50
Utilidad neta (Costos producción – utilidad)	(\$ 4,730.07)
Beneficio-costo	0.62

La utilidad neta es negativa, esto manifiesta que los costos de producción supera a los ingresos por ventas, por lo que no es rentable. Además, el indicador beneficio-costo es menor que la unidad, lo que corrobora que en este caso de estudio en la producción de tomate en malla sombra sin nanopartículas no presenta retribución económica.

CONCLUSIONES

- La aplicación foliar de la combinación de nanopartículas metálicas de óxido de zinc (ZnO, 67 nm), óxido de hierro (Fe₂O₃, 27 nm) y óxido de cobre (CuO, 40 nm) en tomate (*Solanum lycopersicum*) fue el mayor rendimiento de frutos, atribuido al incremento en la altura de planta, el número de flores, número de racimos, número de frutos por planta, tallos productivos, materia seca. Así mismo se Incrementó el valor nutricional del fruto en Fe, Zn, Mn y Cu, Ni y Mo, además de mayor síntesis de Licopeno
- El uso de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO, 67 nm), óxido de hierro (Fe₂O₃, 27 nm) y óxido de cobre (CuO, 40 nm) en tomate (*Solanum lycopersicum*) favorece la rentabilidad del cultivo de tomate bajo condiciones de malla sombra.
- Es una tecnología sustentable, amigable con el medio ambiente.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Monnem, S. K., Alaa, Y. G., Tawfiq M, A. A., Ibrahim A. Alshomali and Hassan, M. A. 2020. "Effects of Nanotechnology Liquid Fertilizer on Certain Vegetative Growth of Broad Bean (*Vicia Faba L.*)". *Fressenius Environmental Bulletin*, 29(6): 4763 - 4768.
- Abdul-Kareem, H., Farrukh-Saleem, M., Saleem, S., Rather, S. A., Hussain-Wani, S., Siddiqui, M. H., Alamari, S., Kumar, R., Gaikwad, N.B., Guo, Z., Niu, J. and Wang., Q. (2022). "Zinc Oxide Nanoparticles Interplay With Physiological and Biochemical Attributes in Terminal Heat Stress Alleviation in Mungbean (*Vigna radiata L.*)". *Front Plant Sci.*, 18: 1-15.
- Adrees, M., Ali, S., Iqbal, M., Bharana, S. A., Siddiqi, Z., Farid, M. and Rizwan, M. 2015. "Mannitol Alleviates Chromium Toxicity in Wheat Plants in Relation to Growth, Yield, Stimulation of Anti-Oxidative Enzymes, Oxidative and Cr Uptake in Sand and Soil Media". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122: 1-8.
- Ahmed, R., Abd-Samad, M. Y., Kamal-Uddin, M. and Abdul-Quddus, A. 2021. "Recent Trends in the Foliar Spraying of Zinc Nutrient in Tomato Production". *Agronomy*, 11(10): 2074.
- Alba-Sandoval, V., Finot, V. L., Wilckens, R. and López-Sepúlveda, P. 2014. "Efectos de la Disminución de Temperatura Sobre el Desarrollo de la Pared de la Antera y el Grano de Polen en *Oryza Sativa L. Gayana*". *Botánica*, 71(2): 199-215.
- Altieri, M. y Nicholls, C. 2012. "Agroecología: Unica Esperanza para la Soberanía Alimentaria y la Resiliencia Socioecológica". *Sociedad científica*. [En línea]. URL. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182861>. (Consultado el 03 de mayo de 2022).
- Álvarez-Hernández, J. C., Castellanos-Ramos, J. Z. and Aguirre-Mancilla, C. L. 2019. "Adaptation of a Grafting Method for *Carica papaya* Based on Seedling Behavior". *HortSiciencie*, 54(6): 982-987.

- Apel, K., and Hirt, H. 2004. "Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction". *Annu. Rev. Plant Biol.*, 55: 373-399
- Balcinde, Y., Hung, R., Blanca, Marrero, A., Tirado, S., Pérez, C., Falero, A., Martí, E., Águila, B., Fonseca, M. and Lightbourne, E. 2005. "Comparación de Diferentes Métodos de Extracción para la Obtención de una Fracción Rica en Filosteroles a Partir de la Cachaza de Caña de Azúcar. *CENIC.*, 36(1): 6-8.
- Banik, S. and Perez-de-Luque, A. 2017. "In Vitro Effects of Copper Nanoparticles on Plant Pathogens, Beneficial Microbes and Crop Plants. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(2): 1-15.
- Barraza, F. V. and Fisher, G. y Cardona C. E. 2004. "Proceso del Crecimiento del Cultivo del Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Vañne de Sinú medio, Colombia". *Agronomía Colombiana*, 22(1): 81-90.
- Bedi, P. and Kaur, A. 2015. "Overview on Uses of Zinc Oxide Nanoparticles". *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 4 (12): 1177 - 1196.
- Bharadwaj, D. N. 2016. "Sustainable Agriculture and Plant Breeding. In: Al-Khayri, J., Jain, S., Johnson, D. (eds) *Advances in Plant Breeding Strategies: Agronomic, Abiotic and Biotic Stress Traits*. Springer: 3 – 34.
- Bhattacharya, P. T., Misra, S.R. and Hussain, M. 2016. "Nutritional Aspects of Essential Trace Elements in Oral Health and Disease". *Scientifica*: 2016.
- Boutchuen, A., Zimmerman, D., Aich, N., Masud, A.M., Masud, A., Arabshahi, A. and Palchoudhury, S. 2019. "Increased Plant Growth with Hematite Nanoparticle Fertilizer Drop and Determining Nanoparticle Uptake in Plants Using Multimodal Approach". *Journal of Nanomaterials*, 11.
- Brandt, S., Pék, Z., Barna, E., Lugasi, A. and Helyes, L. 2005. "Lycopene Content and Colour of Ripening Tomatoes as Affected by Environmental Conditions". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(4): 568-572.

- Brouwer, C. 2006. "El Tomate, sus Datos e Historia". *Harris County Cooperative Extension*: 1 - 2.
- Cantwell, M. S. 2007. "UCCE Fresh Market Tomato Variety Trials: Postharvest Evaluations for 2006". *Report to the California Tomato Commission*:1-16
- Carvajal-Carvajal, C. 2019. "Especies Reactivas del Oxígeno: Formación, Función y Estrés Oxidativo. *Meg leg Costa Rica*, 36(1): 91-100.
- Castellanos R. y Okodeagua, J. L. 2009. Formulación de la Solución Nutritiva. *Manual de producción hortícola en invernadero*, 142.
- Castillo-González, J., Ojeda-Barrios, D.L., Hernández-Rodríguez, López-Ochoa, G.R. 2018. Zinc Metalloenzymes in Plants. *Interciencia*, 43 (4): 242-248.
- Chemonics International Inc. (2008). "Manual de Cultivo de Tomate". [En línea] <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENF01CH517t.pdf> (consultado el 11 de septiembre, 2022).
- CONAPO. Consejo Nacional de Población. [En línea] <http://www.gob.mx/conapo> (Consultado el 01 de julio, 2022).
- Dávila-Aviña, J. E., González-Aguilar, G. A., Ayala-Zavala, J. F., Sepúlveda, D. R. y Olivas, G. I. 2011. Compuestos Volátiles Responsables del Sabor del Tomate. *Revista fitotecnia mexicana*, 34(2): 133-143.
- Delices, G., Leyva, O. O. R., Mota-Vargas, C., Nuñez, P. R., Gámez, P. R., Andrés, M. P. y Serna-Lagunes, R. 2019. "Biogeografía del tomate *Solanum lycopersicum* var. cerasiforme (Solanaceae) en su centro de origen (sur de América) y de domesticación (México)". *Rev. Biol. Trop.*, 67(4): 1023-1036.
- Delgado-Alvarado, A. y Luna-Guevara, 2014. "Importancia, Contribución y Estabilidad de Antioxidantes en Frutos y Productos de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)". *Avances de Investigación Agropecuaria*, 18(1): 51-66.
- Dimkpa, C. O., Singh, U., Bindraban, P. S., Elmer, H., Gardea-Torresdey, J. L. and White, J. C. 2019. "Zinc Oxide Nanoparticles Alleviate Drought-Induced

- Alterations in Sorghum Performance, Nutrient Acquisition, and Grain Fortification". *Science of The Total Environment*, 688: 926 – 934.
- Duarte-Trujillo, A. S., Jimenéz-Forero, J. A., Pineda-Insuasti, J. González-Trujillo, C.A., and García-Juárez, M. 2020. "Extracción de Sustancias Bioactivas de *Pleurotus Ostreatus* (*Pleurotaceae*) por Maceración Dinámica". *Act Biol. Colomb.*, 25(1): 61-74.
- El-Raie, A., Hassan, El-Rahman, A. A. and Arafat, A. A. 2015. "Response of Tomato Plants to Different Rates of Iron Nanoparticles Spraying as Foliar Fertilization". *Biological Engineering*, 32(3): 1295 - 1312.
- El-Saadony, M. T., El-Hack, M. E., Taha, A. E., Fouda, M. M., Ajarem, J. S., Maodaa, S. N., Allam, A.A. and Elshaer, N. 2020. "Ecofriendly Synthesis and Insecticidal Application Copper Nanoparticles against the Storage Pest *Tribolium castaneum*". *Nanomaterials*, 10(3): 587.
- El-Desouky, H., Islam, K. R., Bergefurd, B., Gao, G., Harker, T., Abd-El-Dayem, H., Ismail, F., Mohamed, M. and Reda, M. 2020. "Nano iron fertilization significantly increase tomato yield by increasing plants' vegetable growth and photosynthetic efficiency". *Journal of Plant Nutrition*, 44(11):1649-1663.
- Fageria, N. K., Barbosa-Filho, M. P., Moreira, A. and Guimarães, C. M. 2009. "Foliar Fertilization of Crop Plants". *Journal of Plant Nutrition*, 32(6): 1044 - 1064.
- Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). "Noticias". [En línea] <http://fao.org/mexico/noticias/detail-events/es/c/12744318>. (Consultado el 22 de junio, 2022).
- FAOSTAT. "Crops and Livestock Products. [En línea] <http://www.fao.org/faostat/en#data/QC> (consultado 20 de julio, 2022).
- FAOSTAT. 2022. "Pesticides Trade". [En línea] <https://www.fao.org/faostat/en/?#data/RT> (Consultado el 11 de septiembre, 2022).

- Faraz, A., Faizan, M., Hayat, S. and Alam, P. 2022. "Foliar Application of Copper Oxide Nanoparticles Increases the Photosynthetic Efficiency and Antioxidant Activity in *Brassica juncea*. *Journal of Food Quality*: 1-10.
- Fernández, C., Pitre, A., Llobregat, A. and Rondon, Y. 2007. "Evaluación del Contenido de Licopeno en Pastas de Tomate Comerciales". *Información tecnológica*, 18(3): 31-38.
- Fernández, V. and Brown, P. H. 2013. "From Plant Surface to Plant Metabolism: the Uncertain Fate of Foliar-Applied Nutrients". *Frontiers in Plant Science*, 4: 1 - 5.
- Fernández, V., Ebert, G. and Winkelmann, Günther, W. 2005. "The Use of Microbial Siderophores for Foliar Iron Application Studies". *Plant soil*, 272: 245 - 252.
- Fertilab. 2022. "Deficiencias de Micronutrientes y las condiciones de suelo (Fe, Mn, Cu, Zn y B)". [En línea] <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/Micronutrientes%20y%20las%20condiciones%20del%20suelo.pdf>
- Fleischer, A., O'Neill, M. A. and Ehwald, R. 1999. "The Pore Size of Non-gramicaceous Plant Cell is Rapidly Decreased by Borate Ester Cross-linking of Pectic Polysaccharide Rhamnogalacturonan II". *Plant Physiology*, 121(3): 829 – 838.
- Food Standards Scotland. "Healthy Eating". [En línea] <https://www.foodstandards.gov.scot/consumers/healthy-eating/nutrition/vitamins-minerals/nickel>. (Consultado el 18 de julio, 2022).
- Franco-Bodek, D. y Castillo-Blum, S. E. 2013. "Ferredoxinas". *Educ. Quím.* 24(4): 426-430.
- García, E. 1964. "Modificaciones al sistema de Clasificación Climática de Köppen". Mexico, D. F.: *Talleres Offset Larios, S.A.*
- García, E. 1974. "Distribución de la Precipitación en la República Mexicana". *Scielo*, p. 47.

- Górecka, D., Wawryniak, A., Jedrusek-Golinska, A., Dziedzic, K., Hamutka, J., Lukasz-Kowalczeski, P. and Walkowiak, J. 2020. "Lycopene in tomatoes and tomato products". *Open Chemistry*, 18(1), 752 - 756.
- Gutiérrez, J., González-Pérez, S., García-García, F., Daly, C. T., Lorenzo, O., Revuelta, J. L., McCabe, P. F. and Arellano, J. B. 2014. "Programmed Cell Death Activated by Rose Bengal in *Arabidopsis thaliana* Cell Suspension Cultures Requires Functional Chloroplasts". *J Exp Bo.*, 65(12): 3018-95.
- Hafeez, A., Razzaq, A., Mahmood, T. and Muhammad-Jhanzab, H. 2015. "Potential of Copper Nanoparticles to Increase Growth and Yield of Wheat". *Journal of Nanosciencie with Advanced Technology*, 1(1): 1 – 6.
- Hongda, L., Shi-Yang, T., Guolin, Y., Haiyue, L., Yuxin, Z., Ruirui, Q. and Weihua, L. 2020. "Modular and Integrated Systems for Nanoparticle and Microparticle Synthesis". *Biosensors*, 10(11): 165.
- Horticultivos. "59 mil has. Bajo Agricultura Protegida en México". [En línea] <https://www.horticultivos.com/agricultura-protegida/59-mil-has-bajo-agricultura-protegida-en-mexico/> (consultado el 8 de julio, 2021).
- Husen, A., Siddiqi, K. S. 2014. "Phytosynthesis of Nanoparticles: Concept, Controversy and Application". *Nanoscale Res Lett.*, 9: 229
- HydroEnviroment. "Obtenido de Plástico para Invernadero y Campo". [En línea] https://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=advanced_search_result&keyword=acolchado&gclid=CjwKCAjw7SWBhAnEiwAx8ZLarel7cwjbErgjCDNkZfUI9CJeJfW4Xbl0T6w-KJ4wXftMBsud0z0yRoCqJAQAvD_BwE (consultado el 12 de julio, 2022).
- Ibukun, T. A. and Morgan, K. T. 2020. "Increasing Air Temperatures and its Effects on Growth and Productivity of Tomato in South Florida". *Plants*, 9(9): 1245.
- Infoagro. (2017). "Uso de la Nanotecnología para el Mejoramiento de la Agricultura". [En línea] <https://mexico.infoagro.com/uso-de-la-nanotecnologia-para-el-mejoramiento-de-agricultura/> (consultado el 23 de enero, 2021)

- Infoagro. “Labores Culturales en el Cultivo de Tomate”. [En línea] <https://mexico.infoagro.com/labores-culturales-en-el-cultivo-de-tomate/> (consultado el 18 diciembre, 2019).
- Inforural. “Exportaciones de tomate en México crecieron 6.7% de enero a julio de 2021”. [En línea] <https://www.inforural.com.mx/exportaciones-de-tomate-de-mexico-crecieron-6-7-de-enero-a-julio-de-2021/> (consultado el 27 de abril, 2022).
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2017. “Manual de Cultivo del tomate al aire libre. Santiago”: *Ministerio de Agricultura*.
- Intagri. 2017. “Soluciones nutritivas para el cultivo de Tomate”. *Serie Horticultura Protegida*, 33: 5.
- Intagri. “La Importancia del Zn en las Plantas y su Dinamica en el suelo”. [En línea] <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/la-importancia-del-zinc-en-las-plantas-y-su-dinamica-en-el-suelo> (consultado el 27 de junio, 2022).
- Intagri. 2018. “Funciones del Molibdeno en la Nutrición de los Cultivos”. *Serie Nutrición Vegetal*, 121: 6.
- Janmohammadi, M., Amanzadeh, T., Sabaghnia, N. and Ion, V. (2016). “Effect of Nano-Silicon Foliar Application on Safflower Growth under Organic and Inorganic Fertilizer Regimes”. *Botanica Lithuanica*, 22(1): 53-64.
- Jawad-Kadhim, F., Hakim, R. A. and Mijwel, A. 2021. “Response of Tomato, Eggplant, and Pepper to Nano Fertilizers and the Method of their Addition”. *Plant Archives*, 21(1): 55 - 58.
- Jitao, L., Christie, P. and Zhang, S. 2019. Uptake, Translocation, and Transformation of metal-based Nanoparticles in Plants: Recent Advances and Methodological Challenges. *Environmental Science: Nano*, (1): 41-59.
- Jonapá-Hernández, F., Ruiz-Lau, N., Ruiz-Valdivieso, V. M. y Gutiérrez-Miceli, F. A. 2020. “Síntesis de Fitopartículas de Cobre, una Opción Amigable con el Medio Ambiente. *Bio Tecnología*, 24(2): 58-68.

- Juárez-Maldonado, A., de Alba-Romenus, K., Zemeño-González, A., Ramírez, H. y Benavides-Mendoza, A. 2015. "Análisis de Crecimiento del Cultivo de Tomate en Invernadero". *Rev Mex Cien Agr.* 6(5): 943-954
- Kaiser, B. N., Gridley, K. L., Brady, J. N., Phillips, T. and Tyerman, S. D. 2005. "The Role of Molybdenum in Agricultural Plant Production". *Ann Bot.*, 96(5): 745 – 754.
- Kanhed, P., Birla, S., Gaikwad, S., Gade, A., Seabra, A. B., Rubilar, O., Duran, N. and Rai, M. 2014. "In Vitro Antifungal Efficacy of Copper Nanoparticles against Selected Crop Pathogenic Fungi". *Materials Letters*, 115: 13 - 17.
- Karuppanapandian, T., Moon, J. C., Kim, C., Manoharan, K. and Kim, W. 2011. Reactive Oxygen Species in Plants: Their Generation, Signal Traduction, and Scavenging Mechanisms. *Aust. J. Crop Sci.*, 5(6): 709-725.
- Kim, C., Meskauskiene, K., Apel, K. and Laloi, C. 2008. "No Single Way Understand Singlet Oxygen Signalling in Plants". *EMBO Reports*, 9: 435 – 439.
- Koopmans, G., Hiemstra, T., Vaseur, C., Chardon, W. J., Voegelin, A. and Groenenberg, J. 2020. "Use Iron Oxide Nanoparticles for Immobilizing Phosphorous in-situ: Increase in Soil Reactive Surface Area and Effect on Soluble Phosphorus". *Science of The Total Environment*, 711: 135220.
- Kyrkby, E. and Römheld, V. 2008. "Micronutrients in plant physiology: Functions, Uptake and Mobility". *Informaciones Agronomicas*, (68): 3 - 4.
- Lee, D., Choi, K. S., Kim, D., Park, S., Kim, W., Jang, K., Lim, K., Hoon, C. and Kim, J. 2017. "Iron Oxide Nanoparticle-Incorporated Alginate Capsules as Magnetic Field-Assisted Potential Delivery Platforms for Agriculture Pesticides and Biocontrol agent". *Journal of Biosystems Engineering*, 44(4): 232 – 329.
- Li, C., Wang, P., Lombi, E., Cheng, M., Tang, C., Howard, D. L., Menzies, N. W. and Kopittke, P. M. 2018. "Absortion of Foliar-Applied Zn Fertilizaer by Trichomes in Soybean and Tomato. *Journal of experimental Botany*, 69(10): 2717 - 2729.

- Liang, Y., Urano, D., Liao, K. L., Hedrick, T. L., Gao, Y. and Jones, A. M. 2017. "A Nondestructive Method to Estimate the Chlorophyll Content of *Arabidopsis* seedlings. *Plant Methods*, 13(26): 1-10.
- Lira-Saldivar, R., Méndez-Argüello, B., Santos-Villareal, G. y Vera-Reyes, I. 2018. "Potencial de la nanotecnología en la agricultura". *Acta Universitaria*, 28(2): 9-24.
- Lopez-Santiago, J. 2018. "Validación de híbridos de hortalizas de las principales empresas comerciales en Sinaloa". *CIDH*: 1-59.
- López-vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Romenus, K. A., 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". *Appl. Sci.*, 8(7): 1020.
- Ma, X., Wang, Q., Rossi, L. and Zhang, W. 2016. "Cerium Oxide Nanoparticles and Bulk Cerium Oxide Leading to Different Physiological and Biochemical Responses in *Brassica rapa*. *Environ. Sci. Technol.*, 50(13):6793 – 6802.
- Mahmoud, A. W, Abdelaziz, S. M, El-Mogy, M. M. and Abdeldaym, E. A. 2019. "Effect of Foliar ZnO and FeO Nanoparticles Application on Growth and Nutritional Quality of Red Radish and Assessment of their Accumulation on Human Health". *Agriculture (Polnohospodárstvo)*, 65(1): 16-29.
- MAPA. "Hoja Técnica de Tomate". [En línea] https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/tomate_tcm30-102712.pdf . (consultado el 16 de julio, 2022).
- Margenot, A. J., Rippner, D. A., Dumlao, N. S., Nezani, S., Green, P. G., Parikh, S. J. and McElrone, A. 2018. "Copper oxide nanoparticle effects on root growth and hydraulic conductivity of vegetable crops". *Plant and Soil*, 431: 333 - 345.
- Martin-Hernández, C., Ordaz-Chaparro, C., Sánchez-García, P., Colinas-Leon, B., Maria, T. y Gómez, L. 2012. "Calidad de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

- Producido en Hidroponia con Diferentes Granulometrías de Tezontle”. *Agrociencia*, 46(3): 243 - 254.
- Mattiello, A. and Marchiol, L. 2017. “Aplication of Nanotechnology in Agriculture: Assessment of TiO₂ Nanoparticle Effects on Barley”. *Intech*: 23-39.
- Mehrnaz, H., Kariman, K. and Ghorbanpour, M. 2017. “Engineered Nanomaterial-Mediated Changes in the Metabolism of Terrestrial Plants”. *Sciencie of The Total Enviroment*, 571(15): 275-291.
- Mendez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., Puente-Urbina, B. A., and Lira-Saldívar, R. H. 2016. “Promocion de Crecimiento en Plantas *Capsicum annuum* por Nanopraticulas de Óxido de Zinc. *Nova Scientia*, 8(17): 140-156.
- Mengmeng, R., Chuanxin, M., Yi, Hao, Y., Guo, J., Rui, Y., Tang, X., Zhao, Qi, Fan, X., Zhang, Z., Hou, T. and Zhu, S. 2016. “Iron Oxide Nanoparticles as a Potential Iron Fertilizer for Peanut (*Arachis hypogaea*)”. *Frontiers in Plant Sciencie*, 7: 815.
- Mittal, D., Kaur, G., Singh, P., Yadav, K. and Ali, S. A. 2020. “Nanoparticle-Based Sustainable Agriculture and Food Sciencie: Recent Advances and Future Outlook”. *Front. Nanotechnol.* 4: 1-38.
- Mohammad, F., Bhat, J. A., Chen, C., Mohammed, N. A., Wijaya, L., Ahmad, P. and Yu, F. 2021. “Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) induce salt tolerance by improving the antioxidant system and photosynthetic machinery in tomato”. *Plant Physiol. Biochem.*, 161: 122-130.
- Montana State University. 2022. “Iron Deficiency”. [En línea] <https://landresources.montana.edu/soilfertility/nutrientdeficient/irondeficiency.html> (20 de octubre, 2022).
- Murillo-Castillo, R. G., Piedra-Marín, G. y G. León, R. 2013. “Absorción de Nutrinetes a través de la Hoja. *UNICIENCIA*, 27(1): 232-244.

- Mundo-Coxca, M., Jaramillo-Villanueva, J. L. y Morales-Jiménez, J. 2019. Rentabilidad Financiera y Económica de las Unidades de Producción de Jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) Bajo Invernadero en Puebla, México”. [En línea] https://www.researchgate.net/publication/342148391_Rentabilidad_financiera_y_economica_de_las_unidades_de_produccion_de_jitomate_Lycopersicum_esculentum_Mill_bajo_invernadero_en_Puebla_Mexico.
- Nájera-Ruiz, R. E.; Ruiz-Nájera, J. A.; Guzmán-Gonzalez, S. y Pérez-Luna, E. J. 2011. Manejo y control del cultivo de tomate en Cintalapa, Chipas, Mexico. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, (27): 129-137.
- Nechitailo, G.S., Lu, J., Liu, M., Li, H. and Chen, Y. 2021. “Application of Metal Nanoparticles in Space Plant Cultivation. *3rd COSPAR Scientific Assembly*: 2036.
- NIH. “*National Institutes of Health – Health Information*”. [En línea] <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Iron-DatosEnEspanol/> (consultado el 16 de julio, 2022).
- Núñez-Ramírez, F., Grijalva-Contreras, R. L., Robles-Contreras, F., Macías-Duarte, R., Escobosa-García, M. I. y Santillano-Cázares, J. 2017. “Influencia de la Fertirrigación Nitrogenada en la Concentración de Nitratos en el Extracto Celular de Peciolo, el Rendimiento y la Calidad de Tomate de Invernadero”. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo*, 49(2): 93-103.
- Official Methods of Analysis. 2005. *18th Ed., AOAC INTERNATIONAL, Method 2006.03*. Gaithersburg, MD.
- Ortiz-Jiménez, B., Jiménez-Sánchez, L., Morales-Guerra, M., Quispe-Limaylla, A., Turrent-Fernández, A., Rendón-Sánchez, G. y Rendón-Medel, R. 2013. “Nivel de Adopción de Tecnologías para la Producción de Jitomate en Productores de Pequeña Escala en el Estado de Oaxaca”. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(3): 447-460.

- Palchoudhury, S., Jungiohann, K., Weerasena, L., Arabshahi, A., Gcharge, U., Albattah, A., Miller, J., Patel, K. and Holler, R. A. 2018. "Enhanced legume root growth with pre-soaking in α -Fe₂O₃ nanoparticle fertilizer". *RSC Adv.* 8: 24075 – 24083.
- Panwar, J., Jain, N., Bhargava, A., Akhtar, M. S. and Yeoung-Sang, Y. 2012. "Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards developing nano-fertilizer". *International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT)*.
- Paramo, L. A., Feregrino-Pérez, A., Guevara, R., Mendoza, S. and Esquivel, K. 2020. "Nanoparticles in Agroindustry: Applications, Toxicity, Challenges, and Trends". *Nanomaterials*, 10(9): 18-33.
- Pejam, F., Oraghi-Ardebil, Z., Ladan-Moghadam, A. and Danaee, E. 2021. "Zinc Oxide Nanoparticles Mediated Substantial Physiological and Molecular Changes in Tomato". *PloS One*, 16(3): e0248778.
- Peng, C., Duan, D., Xu, C., Chen, Y., Sun, L., Zhang, H., Yuan, X., Zheng, L., Yang, Y., Yang, J., Zhen, X., Chen, Y., Shi, J. 2015. "Translocation and Biotransformation of CuO Nanoparticles in Rice (*Oryza sativa* L.) Plants. *Environmental Pollution*, 197: 99 - 107.
- Peñaloza, E. 2022. "El Zn en las Plantas y su Relación con otros Elementos Esenciales en la Nutrición Vegetal. [En línea] <https://phloem.cl/el-zinc-en-las-plantas-y-su-relacion-con-otros-elementos-esenciales-en-la-nutricion-vegetal/> (consultado el 11 de julio, 2022).
- Peñaloza, E. 2022. "Estrés Oxidativo en Plantas, una Consecuencia Inevitable del Metabolismo Aeróbico". [En línea] <https://phloem.cl/estres-oxidativo-en-plantas-una-consecuencia-inevitable-del-metabolismo-aerobico/> (consultado el 11 de julio, 2022).
- Peñaranda, M. I. (2021) La Esencialidad del Hierro en la Nutrición Vegetal. [En línea] <https://www.metroflorcolombia.com/la-esencialidad-del-hierro-en-la-nutricion-vegetal/> (consultado el 11 de julio, 2021).

- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, and Juárez-Maldonado, A. 2019. Responses of Tomato Plants unde Saline Stress to Foliar Application of Copper Nanoparticles. *Plants*, 8(6): 151.
- Pérez-Leal, F. 2022. “Fisiologia Vegetal II”. [En línea] <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3201/000026081L.pdf?sequence=5&isAllowed=y> (consultado el 27 de abril, 2022).
- Pérez-Velazco, E., Betancourt-Galindo, R., Valdez Aguilar, L. A., Gonzáles Fuentes, J. A., Puente-Urbina, B. A., Lozano-Morales, S. A. and Sánchez-Valdés, S. 2020. Effects of the Morfphology, Surface Modification and Application Methods of ZnO-NPs on the Growth and Biomas of Tomato Plants. *Molecules*, 25(6): 1282.
- Pestovsky, Y. and Martínez-Antonio, A. 2017. “The use of Nanoparticles and Nanoformulations in Agriculture”. *Journal of nanosciencie and nanotechnology*, 17(12): 8700-8699.
- Proain tecnologia agricola. 2020. “Frecuencia y Tiempos de Riego para los Cultivos Agrícolas”. [En línea] <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/frecuencia-y-tiempos-de-riego-para-los-cultivos-agricolas> (consultado el 24 de julio,2021)
- PROSISUR-IIICA. 2014. “Caracterización del valor nutricional de los alimentos”. Montevideo: Imprenta boscana S.R.L.
- Pukird, S., Chmaninok, P., Samran, S., Kasiam, P., Noipa, K. and Chow, L. 2017. “Synthesisi and Characterization of SiO₂ Nanowires Prepared from Rice Husk Ash”. *Jouenal of metals, Materials and Minerals*, 19(2): 33-87.
- Rahman, M. M., Khan, S. B., Jamal, A., Faisal, M. and Aisiri, A. M. 2011. “Iron Oxide Nanoparticles”. *Nanomaterials*, 43-66.
- Rahmatizadeh, R., Javad-Arvin, S. M., Jamei, R., Mozaffari, H., Nejhad, F.R. 2019. “Response of Tomato Plants to Iteration Effects of Magnetics (Fe₂O₃)

- Nanoparticles and Cadmium Stress". *Journal of Plant Interactions*, 14(1):474 - 481.
- Rajput, V., Minkina, T., Ahmed, B., Sushkava, S., Singh, R., Soldatov, Laratte, B., Fedorenko, A., Mandzhieva, S., Blicharska, E., Musarrat, J., Saquib, Q, Flieger, J. and Gorovtsov, A. 2019. "Interaction of Copper-Based Nanoparticles to Soil, Terrestrial, and Aquatic System: Critical Review of the State of the Science and Future Perspectives. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 252: 51 - 96.
- Rajput, V. D., Minkina, T., Suskova, S., Mandzhieva, S., Tsitsuashvili, V., Chaplugin, V., and Fedorenko, A. 2018. "Effects of Copper Nanoparticles (CuO NPs) on a Mini Review. *BioNanoSci*, 8: 36-42.
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W., AND Biswas, P. 2015. "Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant". *Metallomics*, 7(12): 1 - 11.
- Ramírez-Barraza, B. A., González-Estrada, A., Valdivia-Alcalá, R., Salas-González, J. M. y García Salazar, J. A. (2019). "Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3): 539-550.
- Rámirez-Hernández, J., Bonete, M. J. y Martínez-Espinosa, R. M. 2015. "Propuesta de una Nueva Clasificación de los Oligoelementos para su Aplicación en Nutrición, Oligoterapia, y otras Estrategias Terapéuticas". *Nutr. Hosp.*, 31(3): 1020-1033.
- Ramos-Muñoz, L. G., Contreras-Martínez, Carranza-Téllez, J. y Carranza-Concha, J. 2017. "Capacidad Antioxidante, Contenido en Licopeno y Fenoles Totales en Tomate de Huerto Familiar".[En línea] <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=7234>.
- Rao, A. V., Ray, M. R. and Rao, L. G. 2006. "Lycopene". *Adv Food NutrRes*, 51: 99 -164.

- Rao, S. and Shekhawat, G. S. 2014. "Toxicity of ZnO Engineered Nanoparticles and Evaluation of their Effect on Growth, Metabolism and Tissue Specific Accumulation in *Brissica juncea*. *J. Environ.Chem. Eng.*, 2(1): 105-114.
- Rodríguez Mendoza, Ma. de las Nieves, Alcántar-González, G., Aguilar-Santelises, A., Etchevers-Barra, J. D. y Santizó-Rincón, J. A.1998. "Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila". *Terra Latinoamerica*, 16(2): 135 - 141.
- Rodríguez-Fernández, O. 2016. "Desarrollo de la Investigación Sobre Nanotecnología en el Centro de Investigación en Química Aplicada". *Agronano Tecnología*: 7-30.
- Rodríguez-Jiménez, T. J., Ojeda-Barrios, D. L., Blanco-Macías, F., Valdez-Cepeda, R., y Parra-Quezada, R. A. 2016. Ureasa y Níquel en la Fisiología de las Plantas. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 22(2): 69-82.
- Rodríguez-Ramírez, L., Juárez-Rosete, C. R. y Aguilar-Castillo, J. A. 2018. "Tecnología de la Horticultura en el Estado de Nayarit, México". [En línea] <http://revistabiociencias.uan.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/374>.
- Rojas, M. C. y Pérez-de-Luque, A. 2020. "Nanotecnología: Buscando Agroquímicos más Eficientes y Respetuosos con el Medio Ambiente". Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica: 1-16
- Ruttkay-Nedecky, B. K., Krystofova, O., Nejd, L. and Vojtech, A. 2017. "Nanoparticles Based on Essential metal and their phytotoxicity". *Journal of nanbiotechnology*, 15(33): 1 – 19.
- Tomato Anatomy. 2022. "Leaves: Leaf Anatomy". [En línea] <https://labs.plb.ucdavis.edu/rost/tomato/Leaves/leafanat.html> (20 de octubre, 2022).

- SADER. Producción de jitomate en invernadero. [En línea] <https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/produccion-de-jitomate-en-invernadero?idiom=es> . (consultad el 27 de abril, 2022).
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., Figueroa-Hernández, E. y Pérez-Soto, F. (2017). Rentabilidad en la producción de hortalizas en ambientes controlados. [En línea] https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Economia%20y%20Agronomia%20T-I/HCEA_TI_1.pdf
- Santos-Coello, B. and Ríos-Mesa, D. 2016. *Calculo de Soluciones nutritivas en suelo y sin suelo*. Tenerife: Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Saz, P. Gálvez, J. J., Ortiz, M. y Saz, S. 2012. "Oligoterapia-Fundamentos". *Salud Integral*, 29(6): 86-91.
- Sbartai, H., Djebbar, M. R., Rouabhi, R., Sbartaï, I. and Berrebbah, H. 2011. "Antioxidant Response in Tomato Plants *Lycopersicon esculentum* L. Roots and Leaves to Zinc". *American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences*, 3(1): 41-46.
- Scarpeci, T. E., Carrillo-Barral, N. and Valle, E.M. 2009. "El Oxígeno de las Plantas: Las Dos Caras de una Misma Molécula". *Ciencia hoy en línea*, 19(112): 30 - 33.
- Shahid, A., Mehmood, A. and Naeem, K. 2021. "Uptake, Translocation and Consequences on Nanomaterials on Plant Growth and Stress Adaption". *Journal of Nanomaterials*, 2: 1-17.
- Sheykhanglou, R., Sedghi, M. and Fathi-Achachlouie, B. 2018. "The Effect of Ferrous Nano-oxide Particles on Physiological Traits and Nutritional Compounds of Soybean (*Glycine max* L.) Seed". *An Acad Bras Cienc.*, 90(1): 485-494.
- Shiva, V. 2016. "The Violence of Green Revolution: Third World Agriculture, Ecology, and Politics". *Lexington, KY: Universitu Press of kentucky*.

- Shyla, K. K. and Natarajan, N. 2014. Customizing Zinc Oxide, Silver and Titanium Dioxide Nanoparticles for Enhancing Ground Seed Quality. *Indian Journal of Sciencia and Technology*, 7(9): 1376 - 1381.
- SIAP. "Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera". [En línea] <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-progra,as/producción-agricola-33119> (consultado el 22 de septiembre, 2021).
- SIAPb. "Anuario Estadístico de la Producción Agrícola". [En línea] <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (consultado el 27 de abril, 2022).
- SicarFarms. "Hoja tecnica de Tomate Roma". [En línea] <https://sicarfarms.com.mx/tomate-roma/> (consultado el 8 de julio, 2022).
- Simonin, M., Cantarel, A., Crouzet, A., Gervais, J., Martins, J., and Richaume, A. 2018. "Negative Effects of Copper Oxide Nanoparticles on Carbon and Nitrogen Cycle Microbial Activities in Contrasting Agricultural Soils and in Presence of Plants". *Front in Microbiol*, 13(9): 3102.
- Sing, A., Singh, N. B., Hussain, I., Singh, H. and Singh, S. C. 2015. Plant-Nanoparticle Interaction: An Approach to Improve Agricultural Practices and Plant Productivity. *International Journal Pharmaceutical Science Invention*, 4(8): 25-40.
- Singh Duhan, J., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P. Nehra, K. and Duhan, S. 2017. "Nanotechnology: The New Perspective in Precision Agriculture". *Biotechnology*, 15: 11-23.
- Singh, S. 2020. "Covariation of Zinc Deficiency with COVID-19 Infections and Mortality in European Countries: Is Zinc Deficiency a Risk Factor for COVID-19?". [En línea] <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.12.20105676v2.full.pdf+html>.

- Stevens, P., Baker, E. A. and Anderson, N. H. 1988. "Factors Affecting the Foliar Absorption and Redistribution of Pesticides. 2. Physicochemical Properties of the Active Ingredient and the Role of Surfactant". *Pestic. Sci.*, 19: 265-282.
- Taheri, M., Ataiei-Qarache, H. and Yoosefi, M. 2015. "The Effects of Zinc-Oxide Nanoparticles on Growth Parameters of Corn". *STEM Fellowship Journal*, 1(2):17-20.
- Tarafdar, J. C., Raliya, R. and Mahawar, H. 2014. "Development of Zinc Nanofertilizer to Enhance Crop Production in Pearl Millet (*Pennisetum americanum*)". *Agricultural Research*, 3(3): 267-262.
- Tawfik, M. M., Mohamed, M. H., Sdak, M. S. and Thalooth, A. T. 2021. "Iron Oxide Nanoparticles Effect on Growth, Physiological Traits and Nutritional contents of Moringa Oleifera Grown in Saline Enviroment. Bulletin of National Research Centre, 45(177): 1 - 9.
- Terrazas-Mendoza, L., Nikolskii-Gavrilov, L., Herrera-Gómez, S. S., Castillo-Álvarez, M., y Exebio-García, A. An. 2010. "Alteración de la Fertilidad del Suelo, y Vulnerabilidad de Maíz y Trigo Bajo Riego Debido al Cambio Climático. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(1): 87-102.
- Torres, A. 2017. "Manual de Cultivo del tomate bajo invernadero". *Instituto de desarrollo agropecuario*: 16-17.
- USDA. *FoodData Central Search Results*. Obtenido de Tomatoes, raw. [En línea] <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/1103276/nutrients> (consultado el 16 de julio, 2022).
- Van-Nguyen, D., Mai-Nguyen, H., Thanh-Le, N., Huu-Nguyen, K., Thi-Nguyen, H., Mai-Le, H., Trung-Nguyen, A. Thu-Dinhm N. H., Anh-Hoang, S. and Van-Ha, C. 2022. "Copper Nanoparticle Enhances Plant Growth and Grain Yield in Maize Under Drought Stress Conditions". *J. Plant Growth Regul.*, 41: 364 – 375.

- Vargas-Hernandez, M., Macias-Bobadilla, I., Guevara-Gonzalez, R. G., Rico-Garcia, E., Ocampo-Velazquez, R. V., Avila-Juarez, L. and Torres-Pacheco, I. 2020. "Nanoparticles as Potential Antivirals in Agriculture. *Agriculture*, 10(10): 444.
- Vázquez-Olmos, A. R., Vega-Jiménez, A. L. y Paz-Díaz, B. 2018. "Mecanosíntesis y Efecto Antimicrobiano de Óxidos Metálicos Nanoestructurados. *Mundo Nano*, 11(21): 29-44.
- Wang, Y., Lin, Y., Xu, Y., Yin, Y., Guo, H., Du, W. 2019. "Divergence in Response of Lettuce (*var. ramosa Hort.*) to Copper Oxide Nanoparticles/Microparticles as Potential Agricultural Fertilizer". *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 31(1): 80-84.
- Wei, H. and Wang, E. 2013. "Nanomaterials with Enzyme-like Characteristics (Nanoenzymes): Next Generation Artificial Enzymes. *Chem Soc. Rev.*, 14: 6060-6093.
- Weinbaum, S., Brown, P. and Johnson, R. S. 2002. "Application of Selected Macronutrients (N, K) in Deciduous Orchards: Physiological and Agro technical Perspectives". *ISHS Acta Horticulturae*, 594: 59-64.
- Su, Y., Ashworth, V., Kim, C., Adeleye, A.S., Rolshausen, P., Roper, C., White, J. and Jassby, D. 2019. Delivery, Uptake, Fate and Transport of Engineered Nanoparticles in Plants: A Critical Review and Data Analysis. *Environmental Science: Nano*, 6(8):2311-2331.
- Yuan, J., Chen, Y., Li, H., Lu, J., Zhao, H., Lui, M., Nechitaylo, G. S. and Glushchenko, N. N. 2018. New Insights Into the Cellular Responses to Iron Nanoparticles in *Capsicum Annuum*. *Scientific Reports*, 8(1): 3228.
- Yusuf, M., Fariduddin, Q. and Hayat, S. and Ahmad, A. 2011. "Nickel: An Overview of Uptake, Essentiality and Toxicity in Plants". *Bull Environ Contam Toxicol*, 86(1): 1-17.
- Zafar, H., Azis, T., Khan, B., Mannan, A., Rehman, R. and Zia Muhammad. 2020. "CuO and ZnO Nanoparticle Application in Synthetic Soil Modulates

- Morphology, Nutritional Contents, and Metal Analysis of *Brassica nigra*". *ACS Omega*, 5(23): 13566-13577.
- Zanella, R. 2012. "Metodologías para la Síntesis de Nanopartículas: Controlando Forma y Tamaño". *Mundo Nano*, 5(1): 69-81.
- Záyago-Lau, E. and Foladori, G. 2010. "La Nanotecnología en México: un Desarrollo Incierto". *Economía, sociedad y territorio*, 10(32): 143 - 178.
- Zhao, L., Ortiz, L., Adelene, A., Hu, Q., Zhou, H., Huang, Y. and Keller, A. A. 2016. "Metabolomics to Detect Response of Letuce (*Lactuca sativa*) to Cu(OH)₂ Nanopesticides: Oxidative Stress Response and Detoxification Mechanisms". *Environmental Science & Technology*, 50(17): 9697-9707.
- Zhao, Q., Wu, Y., Gao, L., Ma, J., Li, C. Y. and Xiang, C. B. 2014. Sulfur Nutrient Availability Regulates Root Elongation by Affecting Root indole-3-acetic acid Levels and the Stem Cell Niche. *Integr. Plant. Biol.*, 56(12): 1151-1163.
- Zhuo, Y. and Zhang, F. (2011). Soil and Crop Management Strategies to Prevention Deficiency in Crops. *Plant Biology*, 339: 83-95.

ANEXOS

Memoria de cálculo para determinar la utilidad y Beneficio-Costo

Se determina la utilidad neta y Beneficio-costo de acuerdo a la metodología de Mundo-Coxca *et al.* (2019).

Utilidad neta: es el beneficio económico efectivo resultante luego de descontar de los ingresos por la organización, todos los gastos.

$$\text{Utilidad Neta} = \text{Ingresos por ventas} - \text{Costos de producción}$$

Relación Beneficio Costo: es un indicador que resulta de dividir las ventas generadas entre el valor de los costos de producción, la relación beneficio costo, expresa los beneficios obtenidos por unidad monetaria total invertida durante el ciclo de producción, si la relación es menor que 1, quiere decir que existen pérdidas.

La ecuación para establecer la relación Beneficio Costo calculada al año actual es la siguiente:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Ingresos por ventas}}{\text{Costos de producción}}$$

Para calcular los costos de producción es la suma de los costos fijos más los costos variables,

$$\text{Costos de producción} = \text{Costos preoperativos} + \text{Costos fijos} + \text{Costos variables}$$

En los costos preoperativos se consideran los gastos en preparación de suelo (rastreado y desinfección), acolchado, acondicionamiento del sistema de riego.

Se consideran los costos fijos aquellos gastos empleados en: valor de la renta de tierra, mantenimiento de infraestructura, mantenimiento de equipo utilizado en la unidad, agua, energía eléctrica, costo de equipos adicionales al sistema de riego, cajas de plástico utilizadas en la cosecha.

En los costos variables se consideran los gastos de análisis de suelo y agua, adquisición de plantilla, materiales para tutorado, insumos para control de malezas, plagas y enfermedades, mano de obra, combustibles de transporte y mano de obra.

Cálculo de los costos preoperativos

Costo de preparación de suelo: se considera una superficie de 200 m², la cual se preparó de manera manual con talacho, azadón y pala, por lo que no generó costos.

\$ 0.00 mxn

Costos de acolchado: se acolcharon 8 camas con una distancia de 20 m, en total se adquirieron 160 m de acolchado blanco, el costo unitario es de \$7.70 mxn (HydroEnviroment, 2022).

\$ 1,232 mxn

Acondicionamiento del sistema de riego: se colocó una cintilla de riego por cama, fueron 8 camas de 20 metros de largo, se utilizaron 160 m de cintilla a un costo unitario de \$6.40 mxn.

\$ 1,024 mxn

Se utilizaron 8 válvulas inicial y goma a cintilla con un costo unitario de \$20.46 mxn.

\$ 163.68 mxn

Costos Preoperativos = \$2,419.68 mxn

Costos Fijos

Renta: las instalaciones fueron prestadas por parte de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UMSNH.

\$ 0.00 mxn

Mantenimiento de infraestructura: el mantenimiento de la infraestructura comprendió en tapar agujeros alrededor de la nave realizadas por cuiniques (*Spermophilus adocetus*), tlacuaches (*Didelphis virginiana*) u otro animal, se parcho la malla antiafido con material proporcionado por la facultad, solo se compró silicón para parchas las roturas identificadas.

\$43.00 mxn

Mantenimiento de equipo utilizado: No se ocupó equipo, todas las labranzas se realizaron de manera manual.

\$0.00 mxn

Agua: El agua utilizada es bombeada de pozo profundo, de acuerdo a investigaciones realizadas por Ramírez-Barraza *et al.* (2019), los costos de bombeo son de \$1.56 m⁻³ para bombeo, le aplicamos un índice de inflación de 7.65 % (INEGI, 2022) al 2022 el costo del agua es de \$1.679 mxn. La frecuencia de riego fue cada tercer día en los meses fríos y conforme aumento la radiación solar se dieron riegos diarios (Cuadro 1), por cada riego se utilizó 225 litros por cada planta se utilizó 780 ml de agua en las primeras etapas del cultivo y en etapas posteriores se utilizó 1.56 litros por planta,

Cuadro 1. Costos del agua utilizada en los meses del cultivo.

	dic, 2021	ene, 2022	feb, 2022	mar, 2022	abr, 2022
Días de riego	3	11	10	31	10
Agua utilizada por riego, L	225	225	450	450	450
Agua utilizada mensual, L	675	2475	4500	13950	4500
m ³ de agua utilizada	0.675	2.475	4.5	13.95	4.5
Costo agua bombeo m ⁻³	\$1.652	\$1.652	\$1.652	\$1.652	\$1.652
Costo mensual	\$1.12	\$ 4.09	\$7.43	\$23.05	\$7.43

Por lo tanto, los costos totales durante el tiempo que se estableció el cultivo de tomate fueron de:

\$43.12

Energía eléctrica: El costo de energía eléctrica solo se le atribuye a una bomba centrífuga de 0.75 Hp (0.56 kw), marca EVANS, la cual se prendía cuando se regaba o se administraba solución nutritiva al cultivo, en el cuadro 2 de muestran los días de operación y el consumo de electricidad, el costo de kw de electricidad es de acuerdo a la tarifa por CFE, el tiempo de vaciado del tanque de 450 litros fue de 20 minutos, las válvulas de suministro a un 30% de abertura,

Cuadro 2. Costos de operación de la bomba del sistema de fertirrigación.

	dic, 2021	ene, 2022	feb, 2022	mar, 2022	abr, 2022
Días de riego	3	11	10	31	10
Electricidad usada, min.	60	220	200	620	200
Horas de electricidad	1.00	3.67	3.33	10.33	3.33
Kw bomba	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
Kw utilizados	0.56	2.05	1.87	5.79	1.87
Costo kw (120V)	\$0.95	\$0.95	\$0.95	\$ 0.95	\$0.95
Costo total electricidad	\$0.53	\$1.94	\$1.76	\$5.47	\$1.76

Los costos totales de electricidad es la sumatorias de los costos de la electricidad utilizada en los meses del cultivo:

\$11.47 mxn

Costos Fijos = \$97.59 mxn

Costos Variables

Análisis de suelo: se tomó un análisis de suelo de la investigación pasada, por lo que el costo de \$1,091 se dividió entre dos:

\$545.50 mxn

Análisis de agua: se compartieron costos con otra investigadora de \$765, por lo cual se dividió entre dos:

\$382.50 mxn

Adquisición de plantilla: se compró dos charolas de 242 plantillas de tomate a los productores de la región a \$350 cada una, por tanto, es costo es

\$700 mxn

Material para tutorado: se utilizaron estacas de madera y rafia agrícola para darle soporte a la planta (Cuadro 3),

Cuadro 3. Costos de materiales de tutoreo para el cultivo de tomate.

Material	Cantidad	Precio unitario, mxn	Costo total, mxn
Estaca de madera	130	\$8.00	\$1,040
Rafia agricola	3	\$330	\$990

Costo material de tutorado = \$2,030 mxn

Control de maleza: El control de maleza se realizó con azadón, actividades que se presentó muy poco,

\$0.00 mxn

Control de plagas, enfermedades y fertilización foliar: el control de plagas y enfermedades se llevó de manera preventiva, de tal manera que combino moléculas químicas y extractos vegetales, por lo que solo se considera los costos unitarios de cada producto para poder calcular los costos generados (Cuadro 4).

Cuadro 4. Resumen de los costos involucrados en el control de plagas y nutrición foliar en tomate.

Productos	Aplicación	Ingrediente activo	Dosis	Consumo		Costo del producto	Costo Unitario mg / ml	Costo total
				Suma	u			
Tratamientos experimentales								
NP's Fe	Foliar	Fe	10 ppm	70	mg	\$3,066.75	\$0.06	\$4.29
NP's Cu	Foliar	Cu	10 ppm	70	mg	\$ 3,007.30	\$0.12	\$8.42
NP's Zn	Foliar	Zn	10 ppm	70	mg	\$3,979.96	\$0.16	\$11.14
							Subtotal	\$23.86
Control de enfermedades en suelo								
Star Tall 240 CE	suelo	Metalaxil	5 ml·L ⁻¹	525	ml	\$520.00	\$0.52	\$273.00
							Subtotal	\$273.00
Control de plagas								
Confidor	Foliar	Imidacloprid	2 ml·L ⁻¹	56	ml	\$1,519.00	\$1.52	\$85.06
Sivanto	Foliar	Flupyradifurone	1.5 ml·L ⁻¹	36	ml	\$2,450.00	\$2.45	\$88.20
Movento	Foliar	Spirotetramat	1 ml·L ⁻¹	56	ml	\$3,920.00	\$3.92	\$219.52
Garsol	Foliar	Extracto ajo	6 ml·L ⁻¹	144	ml	\$220.00	\$0.22	\$31.68
Cinnanicide	Foliar	Extracto ajo	6 ml·L ⁻¹	144	ml	\$170.00	\$0.17	\$24.48
Clorpirifos-etil granulado	Voleo	Clorpirifos-etil	NA	1	kg	\$325.00	\$25.00	\$325.00
Carioca Max	Foliar	Clorpirifos-etil + permetrina	2 ml·L ⁻¹	100	ml	\$500.00	\$0.50	\$50.00
							Subtotal	\$823.94
Control de enfermedades foliares								
Star Tall 240 CE	Foliar	Metalaxil	1 ml·L ⁻¹	112	ml	\$520.00	\$0.52	\$58.24
Gluconato de cobre	Foliar	Cu	3 ml·L ⁻¹	48	ml	\$260.00	\$0.26	\$12.48
Terramicina agrícola	Foliar	oxitetraciclina	2 gr·L ⁻¹	64	g	\$250.00	\$0.63	\$40.00
							Subtotal	\$110.72
Fertilización Foliar								
Fosfacel-800	Foliar	N, P, Aminoacidos	10 gr·L ⁻¹	480	g	\$280.00	\$0.28	\$78.40
Ca-Bo	Foliar	Ca-Bo	2 ml·L ⁻¹	128	ml	\$150.00	\$0.15	\$19.20
Haifa-protek	Foliar	P -K	2 gr·L ⁻¹	96	g	\$2,700.00	\$0.27	\$25.92
							Subtotal	\$123.52

<u>Coadyudantes suelo</u>								
Raizal	drench	N, P, K, Mg, S	2 gr·L ⁻¹	420	g	\$194.00	\$0.19	\$81.48
Nutrisorb L	drench	Ácidos carboxílicos	4 ml·L ⁻¹	240	ml	\$369.00	\$0.37	\$88.56
Ca-Bo	drench	Ca - B	2 ml·L ⁻¹	120	ml	\$150.00	\$0.15	\$18.00
							Subtotal	\$188.04
<u>Coadyudante Foliar</u>								
Inex A	foliar	Surfactante penetrante	1 ml·L ⁻¹	1000	ml	\$195.00	\$0.20	\$195.00
							Subtotal	\$195.00

Costo control de plagas, enfermedades y fertilización foliar = \$1,465.08 mxn

Costos de fertilización: Se fertilizó con solución Steiner, y para preparar la solución se requirió de comprar las fuentes del nutriente, al final se contabilizó las cantidades totales consumidas y se calcula el costo unitario y se calcula el costo generado por la nutrición (Cuadro 5).

Cuadro 5. Costos generados en fertilización en el cultivo de tomate.

Fertilizante	Consumo	Precio	Costo unitario	Costo
Ácido fosfórico, ml	0.66	\$1,450.00	\$72.50	\$48.12
Sulfato de magnesio, kg	1.92	\$1,000.00	\$40.00	\$77.00
Nitrato de calcio, kg	9.74	\$630.00	\$25.20	\$245.32
Nitrato de potasio, kg	0.78	\$980.00	\$39.20	\$30.75
Sulfato de potasio, kg	5.37	\$1,000.00	\$40.00	\$214.70
Urea, kg	1.03	\$1,450.00	\$29.00	\$29.97

Costos de fertilización = \$645.86 mxn

Combustibles de transporte: Para el transporte de insumos, herramientas de trabajo y de cosecha se requirió de un medio de transporte, por lo se generó un

gasto en gasolina durante 14 semanas y cada semana se hizo un gasto de \$300 pesos de gasolina,

Costo de combustible = \$4,200 mxn

Mano de obra: no hubo la necesidad de hacer contratación de mano de obra externa, ya que todas las actividades se hicieron de manera personal

Costo de mano de obra = \$0.00 mxn

Costos variables = \$9,968.94 mxn

Cálculo del costo de producción

Costo de producción = Costos fijos + Costos variables + Costos Preoperativos

Costo de producción = \$97.59 + \$9,968.94 + \$2,419.68 = \$12,486.21 mxn

Ingresos por ventas

Usando nanopartículas de Fe, Cu y Zn

La cosecha comenzó a partir del 24 de febrero del 2022, y se extendió hasta principio del mes de abril del 2022; considerando al mejor tratamiento el cual se obtuvo un rendimiento económico de 2,876 g planta⁻¹, y para una densidad de plantas en 200 m² en la casa malla sombra en donde se efectuó la investigación, se pueden tener 360 plantas, por tanto, la producción total es,

$$\text{Producción} = 360 \text{ plantas} \times \frac{2.876 \text{ kg}}{\text{planta}} = 1,035.36 \text{ kg}$$

El precio promedio en los meses de febrero a marzo en el mercado de abastos de Morelia con un precio frecuente de \$350 a \$364 pesos la caja de 28 kg,

por lo que el kg de tomate estuvo en un promedio de \$12.50 - \$13.00, por lo que se considera el precio mínimo ofertado,

$$\text{Ingresos por ventas} = 1035.36 \text{ kg} \times \frac{\$12.50}{\text{kg}} = \$12,942 \text{ mxn}$$

$$\text{Utilidad Neta} = \$12,942.00 \text{ mxn} - \$12,486.21 \text{ mxn} = \$455.79 \text{ mxn}$$

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Ingresos por ventas}}{\text{Costos de producción}} = \frac{\$12,942.00 \text{ mxn}}{\$12,486.21 \text{ mxn}} = 1.03$$

Por tanto, se puede concluir que hubo una utilidad neta de \$455.79 mxn y el indicador beneficio-coste es de 1.03, esto nos indica que los ingresos son mayores de los costos de producción lo que significa que es rentable.

Testigo

Para el cálculo de la producción se considera una densidad de 360 plantas en 200 m², y una producción de 1.729 kg por planta, por lo que la producción es,

$$\text{Producción} = 360 \text{ plantas} \times \frac{1.729 \text{ kg}}{\text{planta}} = 622.44 \text{ kg}$$

$$\text{Ingresos por ventas} = 622.44 \text{ kg} \times \frac{\$12.50}{\text{kg}} = \$7,780.50 \text{ mxn}$$

Los costos de producción (\$12,486.21 mxn) se le resta el costo de las NP's de Zn, Cu y Fe (\$23.86 mxn)

$$\text{Utilidad Neta} = \$7,780.50 \text{ mxn} - (\$12,486.21 \text{ mxn} - \$23.86) = \$ - 4,730.07 \text{ mxn}$$

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Ingresos por ventas}}{\text{Costos de producción}} = \frac{\$7,780.50 \text{ mxn}}{\$12,486.21 \text{ mxn} - \$23.86} = 0.62$$

La utilidad neta es negativa, esto manifiesta que los costos de producción supera los ingresos por ventas, lo que quiere decir que no es rentable; además el indicador beneficio-costos es menor que la unidad, lo que corrobora que en este caso de estudio en la producción de tomate en malla sombra sin nanopartículas no hay una retribución económica.

Considerando el potencial de Números de frutos

El ingreso por ventas se utilizó el rendimiento económico de 2.876 kg por planta, el cual corresponde a una planta que desarrolló aproximadamente 52 frutos, con un peso promedio de 65 gramos por fruto, y un 15 % de frutos que están por debajo del peso; el material utilizado produce frutos de 95 a 100 g, por lo que se podría tener una producción de 4.940 kg por planta, restando un 15 % de frutos que no logran el peso, se obtiene que una planta puede producir de una forma idealizada 4.199 kg planta⁻¹, entonces en 200 m² de la casa malla sombra podemos producir:

$$\text{Producción} = 360 \text{ plantas} \times \frac{4.199 \text{ kg}}{\text{planta}} = 1,511.64 \text{ kg}$$

Cálculo del ingreso por ventas y beneficio-costos de:

$$\text{Ingresos por ventas} = 1,511.64 \text{ kg} \times \frac{\$12.50}{\text{kg}} = \$18,895.50 \text{ mxn}$$

Considerando un incremento del 31.50 % en el rubro de fertilización, puesto se requiere nutrir más para poder alcanzar el rendimiento proyectado el costo de producción es,

$$\text{Costo de fertilización} = \$645.86 \times 1.315 = \$849.30 \text{ mxn}$$

Así que los costos de producción es el resultado de sumar los gastos generados en análisis de agua, análisis de suelo, adquisición de plantilla de tomate, adquisición de material de tutorado, análisis control de plagas, control de maleza, fertilización (ajustado), combustible de transporte, por lo que tenemos,

Costos de producción = \$12,665.79 mxn

Utilidad Neta = \$18,895.50 mxn – \$12,665.79 mxn = \$6,229.71 mxn

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Ingresos por ventas}}{\text{Costos de producción}} = \frac{\$18,895.50 \text{ mxn}}{\$12,665.79 \text{ mxn}} = 1.49$$