

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Evaluación de aplicación foliar de Nanopartículas de Cobre en rendimiento y calidad en el fruto del Melón (*Cucumis melo* L.)

Por:

Víctor Jesús Montemayor Villegas

TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Torreón, Coahuila, México
Octubre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Evaluación de aplicación foliar de Nanopartículas de Cobre en rendimiento y calidad en el fruto del Melón (*Cucumis melo* L.)

Por:

Víctor Jesús Montemayor Villegas

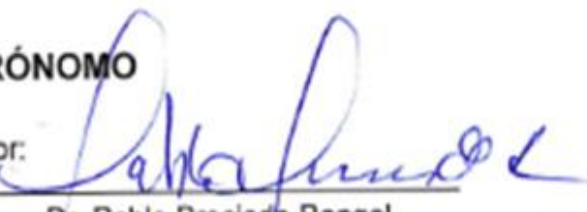
TESIS

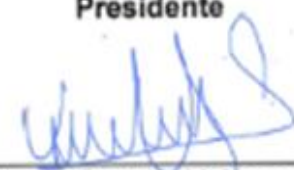
Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

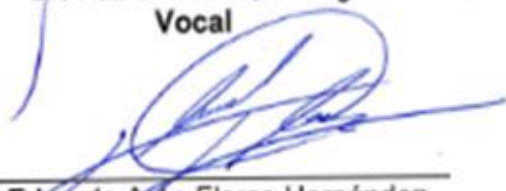
INGENIERO AGRÓNOMO

Aprobado por:


Dr. Alain Buendía García
Presidente


Dr. Pablo Preciado Rangel
Vocal


Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela García
Vocal


Dr. Eduardo Arón Flores Hernández
Vocal suplente


MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Octubre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Evaluación de aplicación foliar de Nanopartículas de Cobre en rendimiento y calidad en el fruto del Melón (*Cucumis melo* L.)

Por:

Víctor Jesús Montemayor Villegas

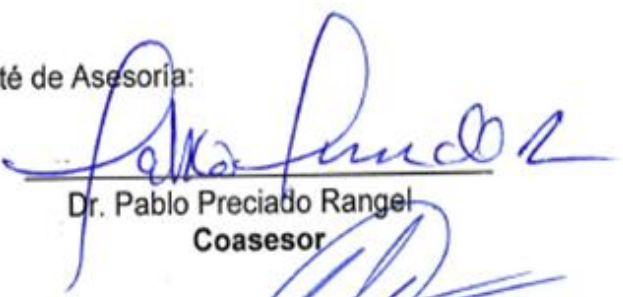
TESIS

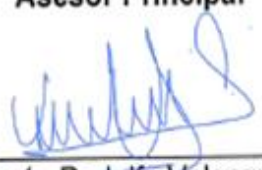
Presentado como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

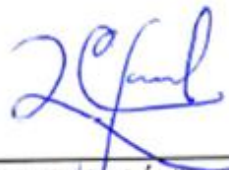
Aprobado por el Comité de Asesoría:


Dr. Alain Buendía García
Asesor Principal


Dr. Pablo Preciado Rangel
Coasesor


Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela García
Coasesor


Dr. Eduardo Arón Flores Hernández
Coasesor


MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



*Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas*

Torreón, Coahuila, México
Octubre 2025

AGRADECIMIENTOS

Gracias a los profesores que fueron parte de mi formación académica a todos los que, forman parte de la UAAAN–UL que permitieron la conclusión de mi carrera, a los compañeros de la generación 2014–2018 gracias a su amistad por tantos momentos, los mejores de mi etapa como estudiante. Gracias a la UAAAN por la oportunidad de formar parte de esta comunidad y de conocer diferentes partes de la república con los viajes de estudio.

Para el Dr. Alain Buendía García por su gran ayuda en este trabajo de investigación esperando continuar con la investigación en bien del campo mexicano.

DEDICATORIAS

Dedicado principalmente **a mis padres Víctor Manuel Montemayor González y Ma. Elena Villegas Galván.** Por su gran apoyo incondicional, por sus sabios consejos, y por siempre querer lo mejor para mí y mis hermanos. Por enseñarnos a ser personas de bien.

A mi hermana Mariela Montemayor Villegas y su familia gracias por sus consejos y siempre ayudarme espero poder visitarlos pronto.

A mi hermano Edwin Eleazar Montemayor Villegas, espero que concluyas con éxito tu carrera y que juntos logremos cosas grandes para el bien de la familia y de la alimentación humana.

A mi pareja de vida y mi hijo, Fernanda Patricia De la Cruz Godoy y Noah Montemayor De la Cruz, que en esta nueva etapa como padre he aprendido mucho de ustedes, gracias por su apoyo y paciencia en concluir mi tesis los amo.

INDICE

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo	4
1.2. Hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Cultivo del melón.....	5
2.2 Origen del Melón.....	5
2.3 Producción de melón en el mundo	6
2.4 Producción de melón en México	6
2.5 Morfología del melón.....	6
2.5.1 Raíz.....	6
2.5.2 Tallo	6
2.5.3 Hojas	7
2.5.4 Fruto.....	7
2.5.5 Estructura.....	7
2.6 Requerimientos climáticos.	8
2.7 Tipo de suelo	8
2.8 Nanotecnología.....	8
2.9 Síntesis verde de nanopartículas	9
2.10 Nanopartículas en la agricultura.....	9
2.11 Biofortificación.....	10
2.12 Biofortificación con micronutrientes.	10
2.13 Biofortificación agronómica en cultivos.....	11
2.14 Nutraceuticos.	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1 Localización geográfica de la comarca lagunera.....	14
3.2 Localización del área experimental	15
3.3 Análisis del suelo	15
3.4 Análisis de agua de riego.....	16
3.5 Tratamientos.....	18
3.6 Modelo estadístico y diseño experimental.....	18
3.7 Parcela experimental	19

3.8	Material vegetal.....	20
3.9	Control de plagas	20
3.10	Fertilización del cultivo	21
3.11	Variables agronómicas y calidad de fruto	23
3.12	Análisis de compuestos nutraceuticos.....	27
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1	Rendimiento y calidad comercial.....	30
4.2	Compuestos bioactivos en frutos	32
5.	CONCLUSIONES	36
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados de análisis de suelo.....	16
Cuadro 2. Análisis de agua de riego.....	17
Cuadro 3. Fertilización del cultivo de melón.	22
Cuadro 4. Rendimiento, peso de frutos, sólidos solubles totales y firmeza de frutos de melón sometidos a diferentes dosis de NPs CuO.....	30
Cuadro 5. Efectos de la aspersión foliar NPs CuO sobre compuestos bioactivos en frutos de melón.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Municipios que conforman la Región Lagunera.	14
Figura 2. Ubicación del lote donde se estableció la investigación.	15
Figura 3. Croquis de campo con la distribución de tratamientos de nanopartículas y su testigo.	19
Figura 4. Siembra del cultivo del melón con acolchado.	20
Figura 5. Aplicación de agroquímicos en el cultivo de melón.....	21
Figura 6. Peso del fruto del melón.	23
Figura 7. Medidas del diámetro polar y ecuatorial.	24
Figura 8. Determinación de grados Brix del fruto del melón.	25
Figura 9. Determinación de firmeza del fruto de melón.	26
Figura 10 Efecto de la aspersión foliar NPs CuO sobre su acumulación en pulpa de melón. Medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$); $n = 6 \pm$ desviación estándar.	35

RESUMEN

El uso de la nanotecnología permite mayor sustentabilidad en los sistemas agrícolas al minimizar el deterioro del medio ambiente por el uso de los agroquímicos. Dentro de los nanoproductos más destacados, las nanopartículas metálicas (NPs) se han sido aplicadas con el propósito de optimizar el rendimiento y modificarla producción de compuestos bioactivos en las plantas. Con el objetivo de evaluar el efecto de nanopartículas de cobre (NPs CuO) cinco dosis crecientes: 150, 200, 250, 300 y 350 mg L⁻¹ y un tratamiento testigo, fueron aplicadas foliarmente en el cultivo de melón. En la cosecha se determinó el rendimiento, calidad nutracéutica, actividad enzimática y su bioacumulación en frutos de melón. La aplicación foliar de NPs de CuO promovió un incremento tanto en el rendimiento como en la síntesis de compuestos bioactivos, además de favorecer su acumulación en la pulpa; no obstante, concentraciones elevadas generan el efecto opuesto debido a la acumulación excesiva de cobre. Las respuestas del cultivo de melón a las NPs CuO dependen de la dosis utilizada ya que pueden inducir efectos benéficos o negativos por lo que es necesario seguir realizando investigaciones al respecto.

Palabras clave: Antioxidantes, Cucumis melo L, Nano-biofortificación

1. INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones de las nanopartículas es su uso como nanofertilizantes y nanoplaguicidas, que facilitan el manejo de nutrientes, la mejora genética, el tratamiento de enfermedades en plantas y la promoción del crecimiento (De la Rosa et al., 2017). Las nanopartículas, que tienen un tamaño de 1-100 nanómetros (nm), se asemejan a las moléculas biológicas como las proteínas; las cuales permiten atravesar las membranas celulares. Este tamaño es crucial para su absorción, ya que favorece su movilidad.

En la actualidad, se ha adoptado el uso de nanopartículas en cultivos hortícolas como una estrategia para mejorar la calidad nutricional, la actividad enzimática y el rendimiento de las plantas. Las nanopartículas de cobre (NPsCu) se aplican en el ámbito agrícola por sus propiedades antimicrobianas y por su capacidad de favorecer el crecimiento, la actividad fotosintética y la respuesta antioxidante en diversas especies vegetales. A pesar de esto, son escasos los estudios que investigan cómo estos nanomateriales metálicos influyen en el rendimiento y la calidad de los frutos de melón.

El melón (*Cucumis melo* L.) es una fruta altamente nutritiva que pertenece a la familia de las cucurbitáceas, caracterizada por un alto contenido de proteínas, lípidos, vitamina C, beta carotenos, antioxidantes y polifenoles bioactivos (Mosquera-Vivas et al., 2019; Rivera-Gutiérrez et al., 2021). También contiene otros fitoquímicos que son relevantes para la prevención de enfermedades (Manchali et al., 2021; Guo et al., 2023).

En la comarca lagunera, se cultivan anualmente 4,424 hectáreas de melón, en todo México, la superficie dedicada a este cultivo asciende a 19,076 hectareas, con una producción total de 543.651 toneladas (Rodríguez-Luna et al., 2022). A escala mundial, la producción de melón alcanza cerca de 27 millones de toneladas (Kubo et al., 2021; Davidson et al., 2023).

Por otro lado, la actual dieta de la población ha llevado a una deficiencia común de oligoelementos como el hierro, cobre, yodo, selenio y zinc, representando un problema de salud a nivel mundial (Gío-Trujillo et al., 2022). El Cobre, es un microelemento esencial, pero tanto la deficiencia como el exceso de cobre pueden impactar negativamente la salud humana (Raha et al., 2020). Una ingesta insuficiente de este mineral puede provocar afecciones severas como anemia y neutropenia (Wahab et al., 2020), mientras que niveles elevados se asocian con daños hepáticos, enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y alteraciones en el sistema nervioso (Taylor et al., 2020). En el caso de las plantas, el cobre interviene en reacciones de oxidoreducción y en diversos procesos celulares y moleculares, entre ellos la formación de clorofila, la fotosíntesis, la respiración y el metabolismo de proteínas y carbohidratos (Gaytan-Aleman et al., 2021).

No obstante, en muchas regiones predominan los suelos arenosos con escaso contenido de materia orgánica y altos niveles de pH, lo que acentúa la deficiencia de cobre (Shabbir et al., 2020). Por lo tanto, es crucial implementar prácticas adecuadas en el manejo de los cultivos para prevenir dicha deficiencia tanto en plantas como en seres humanos. La biofortificación se presenta como una estrategia para elevar la concentración de cobre en la fracción comestible de los

cultivos y, con ello, contribuir a una mejor nutrición humana, al enfocarse en potenciar su valor nutricional en las plantas, ayudando a satisfacer las necesidades de este oligoelemento, especialmente para aquellos que no pueden acceder a suplementos minerales comerciales (Dhaliwal et al., 2022).

La nanotecnología representa un avance tecnológico que promueve la sostenibilidad en los sistemas agrícolas al disminuir el impacto ambiental derivado del uso de agroquímicos (Gutiérrez-Ruelas et al., 2021). Las nanopartículas metálicas (NPs) son uno de los principales nanoproductos utilizados para optimizar el rendimiento y modular los compuestos bioactivos en los cultivos (Kalisz et al., 2021). Dentro de las nanopartículas metálicas, las de CuO sobresalen por sus propiedades ópticas, catalíticas, mecánicas y eléctricas (Amer y Awwad, 2021).

Se ha evidenciado que la aplicación de cobre tiene un efecto estimulante en especies como *Arabidopsis thaliana*, *Capsicum annuum*, *Solanum lycopersicum* L., aumentando la acumulación de compuestos bioactivos, así como la firmeza y calidad de los frutos (López-Vargas et al., 2018). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar el impacto de la aspersión foliar de NPs CuO en el cultivo de melón, analizando sus efectos sobre el rendimiento y su calidad.

1.1. Objetivo

Evaluar el impacto de la aspersión foliar de NPs CuO en el cultivo de melón, analizando sus efectos sobre el rendimiento y su calidad.

1.2. Hipótesis

La aplicación de NPs CuO incrementa significativamente la calidad nutracéutica y capacidad antioxidante de los frutos del melón.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cultivo del melón

La Comarca Lagunera, situada en el norte-central de México, abarca diez municipios del noreste de Durango y cinco del suroeste de Coahuila. La agricultura en esta región es diversa, incluyendo cultivos como forrajes, algodón, frutales perennes y hortalizas, siendo el melón tipo cantaloupe, conocido también como “chino”, “rugoso” o “reticulado”, uno de los más destacados. Esta área se considera la principal productora de melón en el país, con un aproximada de 5,000 hectáreas y una producción cercana a las 134,000 toneladas, lo que representa alrededor del 23% del total nacional (SIAP-SAGARPA, 2016). Las importaciones de melón han aumentado notablemente, pasando de 13,184 toneladas en 2003 a 27,930 toneladas en 2016, lo que indica un crecimiento superior al 100% en ese periodo (SIAVI, 2017).

2.2 Origen del Melón

Investigaciones sugieren que el melón tiene su origen en el oeste de África, y es probable que existan variedades silvestres de *Cucumis melo* en la región tropical del este de África, al sur del Sahara. Estas formas silvestres habrían llegado a la India y Pakistán, donde fueron domesticadas, dando lugar a las variedades de frutos dulces (Vallejo y Estrada, 2004).

2.3 Producción de melón en el mundo

El cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) es una de las principales hortalizas producidas en diversas regiones alrededor del mundo, con 1,039,691 hectáreas reportadas en 2019. Los principales países productores son China, Irán y Turquía, (FAOSTAT, 2020).

2.4 Producción de melón en México

En México, la producción de melón se localiza predominantemente en regiones caracterizadas por temperaturas elevadas y precipitaciones reducidas. En 2019, se registraron alrededor de 20,000 hectáreas cultivadas (SIAP, 2021). En el norte del país, el estado de Coahuila destaca, donde aproximadamente de 1,800 productores establecieron más de 6,000 hectáreas, caracterizadas por un alto grado de especialización, calidad e inocuidad, lo que ha favorecido su exportación (Arellano et al., 2017).

2.5 Morfología del melón

2.5.1 Raíz

La raíz ramificada de tipo pivotante, capaz de penetrar el suelo hasta 1.2 metros de profundidad (Cleves J et al., 2012).

2.5.2 Tallo

El tallo es piloso, acanalado y puede ser rastrero o trepador, dependiendo de sus zarcillos. Su estructura es delicada y su tejido tierno, desarrollando típicamente tres ramas secundarias a partir de los tres nudos basales del tallo principal (Cleves J et al., 2012).

2.5.3 Hojas

Las hojas son comúnmente vellosas, simples y pecioladas, con una forma y tamaños variables, que pueden tener entre tres y siete lóbulos con márgenes dentados. (Cleves J *et al.*, 2012).

2.5.4 Fruto

El fruto maduro presenta una cascara de color amarillo que predomina sobre el verde, una forma redonda que tiende a ser elíptica. La pulpa es de color naranja o salmón, predominando sobre el verde. (Vallejo y Estrada., 2004).

2.5.5 Estructura

Según Parsons D. (2011), se puede describir la estructura de la planta de *Cucumis melo* de la siguiente manera:

- **Tallo:** duro y anguloso.
- **Hojas:** lobulada, con 3 a 7 lóbulos, y un diámetro que varia según la variedad, de 8 a 15 cm.
- **Pecíolo:** longitud es de 4 a 10 cm.
- **Zarcillo:** sencillo, con un zarcillo en cada axila de la hoja.
- **Flores masculinas:** brotan en grupos desde la axila.
- **Flores femeninas:** comúnmente solitarias.
- **Flor femenina:** se distingue por el abultamiento en su base, donde se encuentra el ovario. En algunas especies, también se presentan flores hermafroditas.
- **Frutos:** de forma redonda, con una cascara alargada y grandes gajos pronunciados.

2.6 Requerimientos climáticos.

El cultivo de melón presenta una exigencia térmica elevada, requiriendo que tanto la temperatura del suelo como la del aire se mantengan preferentemente en un rango óptimo de 18 y 26°C. La temperatura del suelo influye en la germinación, mientras que la temperatura del aire afecta el crecimiento y desarrollo de la planta (Roosevelt., 2002). Para una producción optima, se necesitan temperaturas promedio entre 23°C a 30°C, en un ambiente seco con humedad relativa inferior al 70%. Un aumento en la temperatura y una disminución en la humedad relativa mejoran la calidad del fruto, incrementando su aroma y azúcares, además de reducir la incidencia de enfermedades (Pinto et al., 2011).

2.7 Tipo de suelo

El cultivo de melón exhibe un desempeño óptimo en suelos ligeros, francos o franco arenoso, con excelente capacidad de drenaje y un pH cercano a la neutralidad (6-7). Debido a su alta demanda de nutrientes, este cultivo requiere suelos con elevada y un contenido sustancial de materia orgánica (Vallejo y Estrada., 2004).

2.8 Nanotecnología

En la actualidad, se han desarrollado técnicas que permiten fabricar, caracterizar y manipular partículas a escalas nanométricas. Estas entidades, conocidas como nanopartículas (NPs), presentan propiedades físicas significativamente diferentes a la de los sólidos macroscópicos con igual composición química. La interacción y unión molecular dentro de en estas partículas es determinante para mantener su

integridad estructural y evitar fenómenos de precipitación o aglomeración, asegurando la conservación sus propiedades funcionales (Grande., 2007).

2.9 Síntesis verde de nanopartículas

Si bien la síntesis nanopartículas se ha logrado tradicionalmente mediante métodos físicos y químicos, hallazgos recientes evidencian el papel significativo de microorganismos y sistemas biológicos en su producción biosintética. La biosíntesis de nanopartículas metálicas es un método que favorece el medio ambiente (química verde) al evitar el uso de productos químicos agresivos y costosos (Iravani., 2011).

2.10 Nanopartículas en la agricultura

Dentro del ámbito de la agricultura, las nanopartículas (NPs) investigadas comprenden aquellas de carácter metálico, polimérico y los correspondientes óxidos metálicos. En particular, las nanopartículas de óxido de zinc han suscitado interés por su capacidad de mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos. Se han aplicado en diferentes especies para mejorar la germinación, crecimiento y producción, además de poseer propiedades antimicrobianas y antioxidantes que protegen semillas y plantas de enfermedades y estrés oxidativo. Su escala nanométrica contribuye a optimizar la capacidad de nutrientes y agua a nivel (Lira, 2016).

El uso de nanopartículas metálicas en la agricultura ha demostrado ser muy beneficioso, especialmente en cultivos sometidos a condiciones de sequía, ya que favorecen el crecimiento, aumentan la productividad y mejoran la calidad comercial de los frutos (Prasad et al., 2014).

2.11 Biofortificación

La biofortificación se refiere al proceso de aumentar la concentración y/o la disponibilidad de nutrientes esenciales en los cultivos durante su desarrollo (De Valença et al., 2017). La biofortificación agronómica se configura como una estrategia sostenible y de bajo costo destinada a la mitigación de deficiencias de micronutrientes en la población (De Groote et al., 2021). Su objetivo principal es optimizar las características agronómicas aplicación estos elementos al suelo, de forma foliar o a través de soluciones nutritivas (Jha y Warkentin, 2020). Los cultivos biofortificados ofrecen una forma de proporcionar alimentos enriquecidos a comunidades con acceso limitado, especialmente a poblaciones desnutridas en áreas rurales y de difícil acceso (Nestel et al., 2006).

2.12 Biofortificación con micronutrientes.

Incorporar micronutrientes en los cultivos es una práctica valiosa, ya que no solo incrementa la disponibilidad de estos elementos esenciales, sino que también favorece la biosíntesis de compuestos con actividad biológica (Gaucin et al., 2020). La deficiencia de minerales como calcio (Ca) y cobre (Cu) afecta a aproximadamente a un tercio de la población mundial, especialmente en países en desarrollo (White y Broadley, 2005). En este contexto, Prasad et al. (2015) señalan que la eficacia de la biofortificación depende de la interacción del nutriente tanto en el suelo y en la planta, destacando al zinc como uno de los microelementos más adecuados, siendo más eficiente cuando se aplica de manera foliar en forma de ZnSO_4 .

Además, la estrategia más efectiva para aumentar la concentración de zinc en el grano de trigo combina aplicaciones edáficas y foliares (Cakmak et al., 2010).

Para que los programas de biofortificación realmente contribuyan a mejorar la ingesta diaria de nutrientes en humanos y animales, es necesario implementarlos en cultivos que sean fundamentales en la dieta, como cereales y leguminosas (Travajrah et al., 2010).

2.13 Biofortificación agronómica en cultivos.

Desde la perspectiva de la nutrición humana, Finlandia implementó un modelo de biofortificación con selenio (Se), que ha destacado como una estrategia eficaz para abordar un problema de salud pública (Ríos et al., 2013). Estudios de Schiavon et al. (2013) y Costa de Oliveira et al. (2018) indican que la aplicación foliar de Se en forma de selenato y en dosis bajas genera efectos positivos en los cultivos, aumentando la biomasa final y elevando los niveles de antioxidantes como los flavonoides naringenina, calcona y kaempferol.

En un ensayo con zanahoria (*Daucus carota*), se observó una disminución del 26% en la concentración de potasio (K) en la parte aérea (Costa de Oliveira et al., 2018). De manera similar, Drahonovsky et al. (2016) reportaron una reducción de K en plantas silvestres y en trigo cultivado en solución nutritiva. En otro experimento que evaluó diferentes concentraciones de Se, tanto en forma de selenato como de selenito, se registró una reducción de hierro (Fe) en las raíces y en la parte

aérea (Guerrero et al., 2014). Zembala et al. (2010) también documentaron una disminución de Fe en raíces tras la aplicó selenato en el suelo.

En cuanto al zinc (Zn), la biofortificación de cultivos se lleva acabo comúnmente mediante sulfato u óxido, ya sea de manera foliar o edáfica. Sin embargo, la aplicación al suelo ha demostrado ser menos efectiva para acumular Zn en las partes comestibles, aunque contribuye en mayor medida al incremento del rendimiento en comparación con la aplicación foliar (Cakmak et al., 2010). Por ello, se sugiere utilizar una estrategia combinada de aplicación foliar y al suelo para optimizar tanto el rendimiento como la concentración de Zn en las fracciones comestibles de los cultivos (Poblaciones y Rengel, 2016).

2.14 Nutraceuticos.

Los nutraceuticos son compuestos derivados de principios activos de fuentes naturales, como organismos vivos y minerales. Se caracterizan por su alto contenido de nutrientes específicos, impactando directamente la salud nutricional. Su origen natural los hace atractivos, ya que generalmente se presentan en formas altamente biodisponibles y pueden consumirse a largo plazo sin efectos secundarios (Pérez, 2010).

Estos compuestos se dividen en tres categorías principales: **nutrientes**, que incluyen azúcares y grasas; **compuestos químicos**, como fibras, antioxidantes, carotenos, ácidos grasos y Omega-3; y **probióticos**, que son microorganismos benéficos, principalmente de origen lácteo (Neff y Holman, 1997; Pérez, 2020).

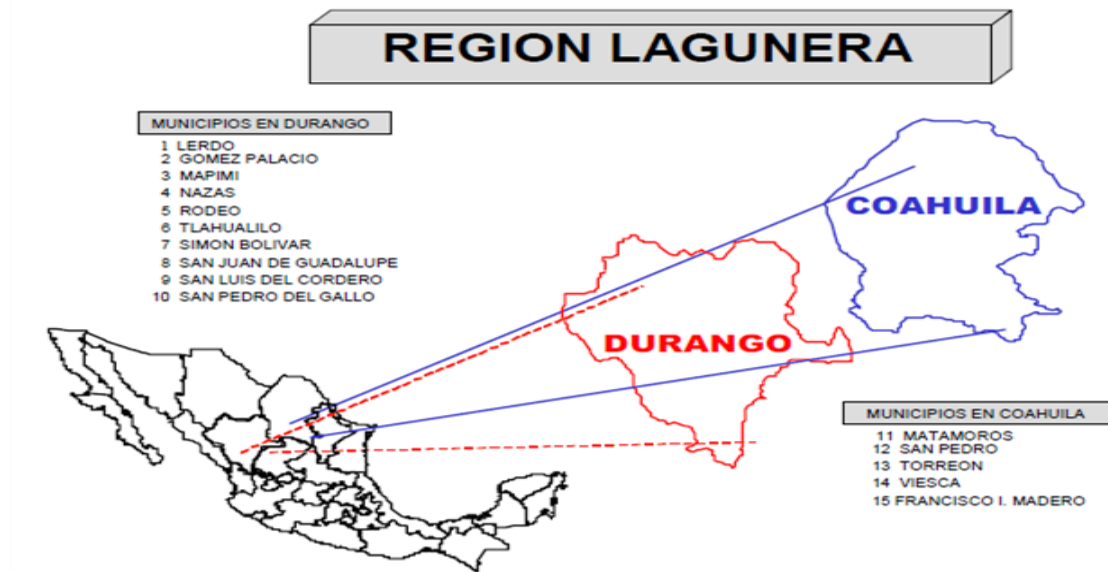
En cuanto a sus funciones biológicas, destacan por su capacidad para combatir el estrés oxidativo, regular de la función genética, modular procesos hormonales e inmunológicos, así como su participación en el metabolismo carcinogénico y en diversas rutas metabólicas mediante la inducción de enzimas (Waliszewski y Blasco, 2015).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización geográfica de la comarca lagunera

La Comarca Lagunera se ubica en el centro-norte de México, integrada por diez municipios del estado de Durango y cinco del estado de Coahuila (Figura 1). Su denominación se debe a las trece lagunas que existieron en la región, siendo la Laguna de Mayrán la más extensa de América Latina, alimentada por los ríos Nazas y Aguanaval. Esta área se delimita entre los meridianos 102° 22' y 104° 47' de longitud oeste, y los paralelos 24° 22' y 26° 23' de latitud norte, con una altitud media de 1,139 metros sobre el nivel del mar.

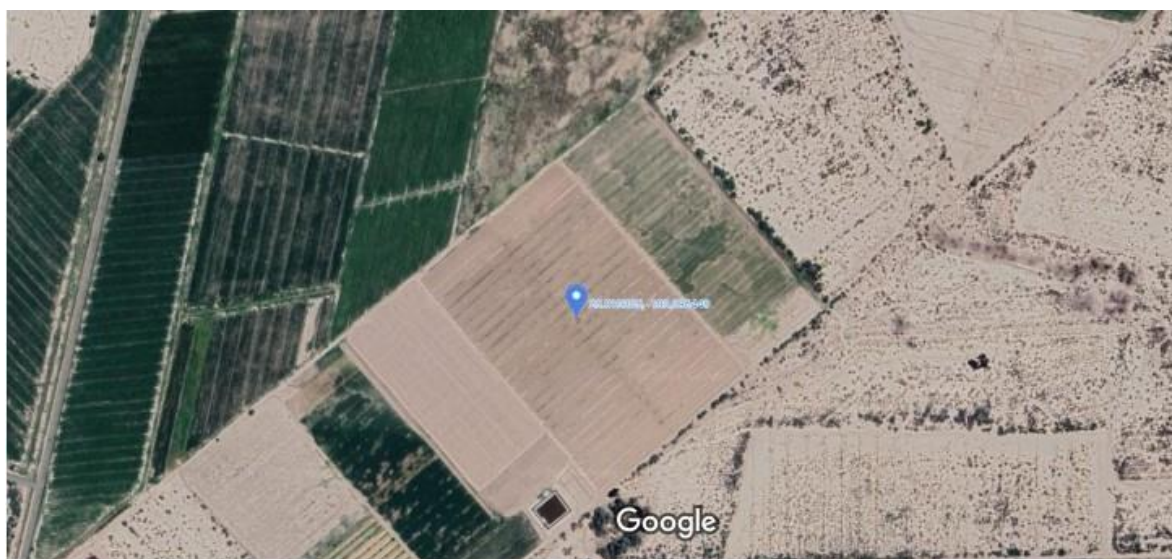
Figura 1. Municipios que conforman la Región Lagunera.



3.2 Localización del área experimental

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo primavera 2022 en el ejido Concordia, Municipio de San Pedro, Coahuila, ubicado a $25^{\circ} 48'37''$ de latitud norte y $103^{\circ} 46''$ de longitud oeste, en parcelas de la empresa Hermanos Montemayor SPR de RL.

Figura 2. Ubicación del lote donde se estableció la investigación.



3.3 Análisis del suelo

El suelo presenta una textura media y un pH en pasta saturada de 7.67, clasificándose como medianamente alcalino. Su conductividad eléctrica es de 4.06, lo que indica que es un suelo salino, una condición que limita el rendimiento de la mayoría de los cultivos. En términos de sodicidad, los valores estimados de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) son de 5.85 y 7.95, respectivamente, lo que sugiere que el suelo puede ser

salino, aunque con baja probabilidad de generar problemas relacionados con la sodicidad (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resultados de análisis de suelo.

Parámetros	Resultados	Interpretación	Rango
Materia Orgánica (MO, %):	0.88	Bajo	0.80 – 4.00
Nitrógeno (N-NO ₃ , ppm):	4.82	Muy Bajo	6.7 - 66.8
Fosforo disponible (P, ppm):	4.27	Bajo	4.0 – 36.00
Potasio Extraíble (K, ppm):	603.06	Alto	1.00 – 1000
Calcio Extraíble (Ca, ppm):	6181.93	Muy Alto	500 – 6000
Magnesio Extraíble (Mg, ppm):	202.74	Medio	50 – 1200
Cobre (Cu, ppm):	0.82	Medio	0.20 – 2.50
Fierro (Fe, ppm):	5.03	Moderado Bajo	3.0 – 50.00
Zinc (Zn, ppm):	0.93	Moderado Bajo	0.30 – 8.00
Manganeso (Mn, ppm):	8.53	Medio	2.0 – 50.0
Azufre (S, ppm):	2913.41	Muy Alto	3.0 – 25.0
Boro (B, ppm):	1.62	Moderado Alto	0.30– 3.00

3.4 Análisis de agua de riego

El análisis de agua de riego indica que el pH se encuentra dentro del rango normal; según su conductividad eléctrica, se clasifica como restricción moderada. En relación con los valores de RAS y CE, el agua puede clasificarse como: sin restricción de uso por problemas de infiltración; con restricción para uso con riego por aspersión; y en cuanto al contenidos de bicarbonatos, se clasifica como con

restricción ligera para riego por aspersión. Con respecto a la toxicidad a iones específicos, el contenido de sodio, según el valor de RAS y/o RAS ajustado, se presenta con restricción ligera; el contenido de cloruros no presenta restricción; y el contenido boro está clasificado como sin restricción y/o no analizado (Cuadro 2).

Valores de rango tomados de la guía para “Water quality for agriculture”

Cuadro 2. Análisis de agua de riego.

Parámetros	Resultados	Interpretación	Rango
Conductividad Eléctrica (dS/m):	2.88	Moderado	0 – 3.00
Sólidos totales disueltos (ppm):	1840.00	Moderado	0 - 2000
Potencial de Hidrogeno:	6.98	Medio	6.0 – 8.5
RAS:	3.19	Bajo	0 – 15
RAS Ajustado:	4.32	Bajo	0 – 15
Calcio (meq/L):	20.77	Alto	0 – 20
Magnesio (meq/L):	0.97	Muy Bajo	0 - 5
Sodio (meq/L):	10.52	Bajo	0 – 40
Potasio (meq/L):	0.08	Alto	0 – 0.5
Carbonatos (meq/L):	0.00	Medio	0 – 0.1
Bicarbonatos (meq/L):	2.40	Medio	0 – 10
Cloruros (meq/L):	2.52	Bajo	0 – 30
Sulfatos (meq/L):	28.50	Alto	0 – 20

3.5 Tratamientos

Las nanopartículas las cobre fueron obtenidas por síntesis verde y su caracterización es reportada por Ortega-Ortiz *et al.* (2022). Se prepararon cinco dosis en un matraz con capacidad de un litro, en el que se añadieron cinco dosis crecientes de NPs CuO: 150, 200, 250, 300 y 350 mg L⁻¹. En el tratamiento control se utilizó únicamente agua destilada.

3.6 Modelo estadístico y diseño experimental

El diseño experimental empleado fue bloques completos al azar con seis repeticiones y el modelo estadístico fue:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_j + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$$I = 1, 2, 3 \dots, a$$

$$J = 1, 2, 3, \dots, b$$

μ = Media general

α_j = Efecto del tratamiento i

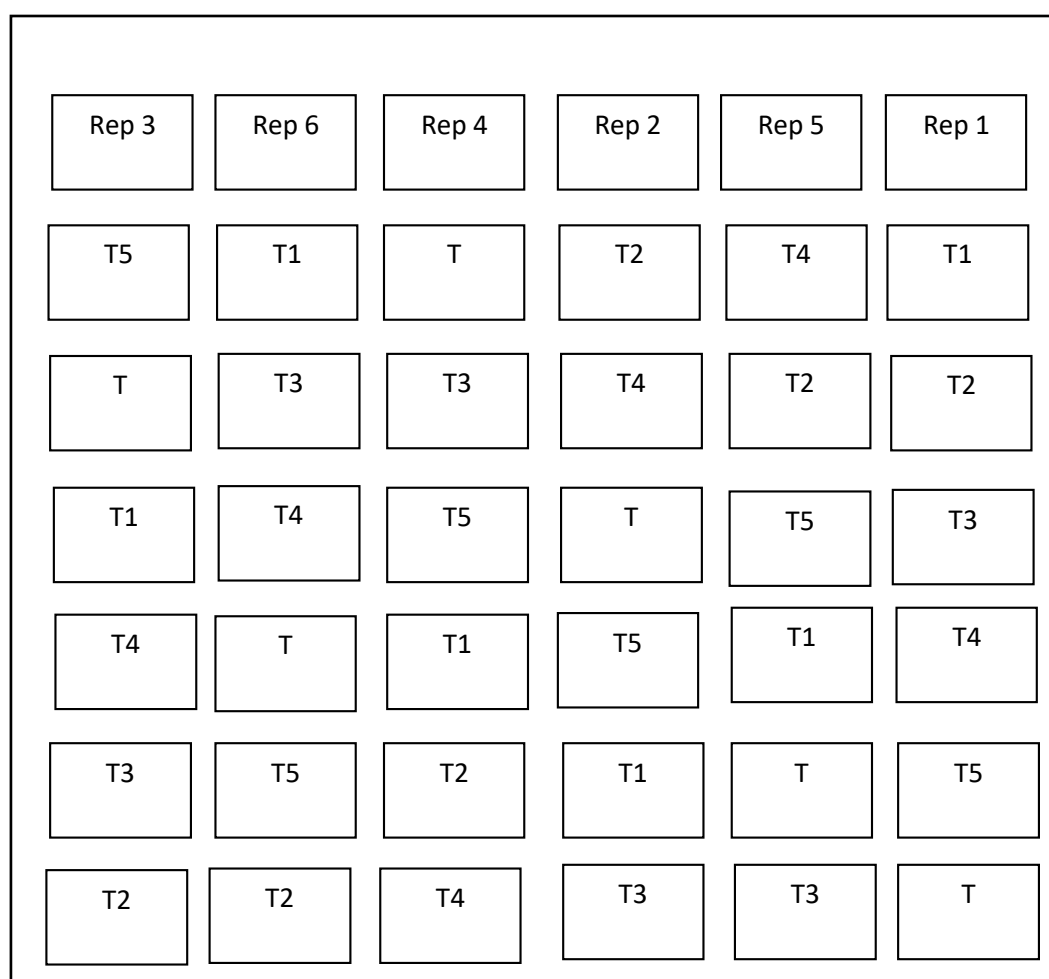
β_j = Efecto del bloque j

ε_{ij} = Efecto aleatorio debido a la observación ij.

3.7 Parcela experimental

El área experimental consto de 6 camas de melón, con una distancia de 2.10 m entre camas y una longitud de 100 m; en cada cama se establecieron los tratamientos y el testigo, con una densidad de población de 4 plantas por metro lineal. La distribución de tratamientos en el campo se muestra en la figura 3.

Figura 3. Croquis de campo con la distribución de tratamientos de nanopartículas y su testigo.



Tratamiento 1: 150 mg L⁻¹

Tratamiento 2: 200 mg L⁻¹

Tratamiento 3: 250 mg L⁻¹

Tratamiento 4: 300 mg L⁻¹

Tratamiento 5: 350 mg L⁻¹

3.8 Material vegetal

Se utilizó el híbrido de melón (*Cucumis melo* L) cv Crusier (Harris Moran®).

La siembra directa se realizó el 20 de marzo de 2022.

Figura 4. Siembra del cultivo del melón con acolchado.



3.9 Control de plagas

Se aplicó un insecticida foliar Abamectina para combatir el gusano minador en las primeras hojas verdaderas y cotiledones, utilizando una concentración de 275

mililitros por hectárea en 200 litros de agua. El 24 de abril se realizó una aplicación contra la mosquita blanca con 150 ml de insecticida Sivanto y se repitió la aplicación de Sivanto el 29 de abril.

Figura 5. Aplicación de agroquímicos en el cultivo de melón.



3.10 Fertilización del cultivo

La fertilización se llevó a cabo como se describe en el Cuadro 3 y se expresa en litros ha^{-1} de cada producto.

Cuadro 3. Fertilización del cultivo de melón.

Etapa	Semana	Ultra N	Ultra P	Ultra K	Ultra Ca	Ultra Mg	Ultra Radix	HB K	Hyper Zn	Hyper RFZ
Emergencia	1a	-	-	-	-	-	-	5.0	-	-
2 HV	2a	5.0	2.0	-	-	-	2.0	5.0	0.5	-
5 HV	3a	10.0	2.0	3.0	3.0	-	-	5.0	-	-
Inicio guía	4a	10.0	2.0	3.0	3.0	-	-	-	-	-
Desarrollo guía	5a	5.0	2.0	3.0	3.0	-	-	-	-	-
Inicio flor	6a	5.0	3.0	3.0	3.0	-	2.0	5.0	5.0	1.0
Flor hembra	7a	5.0	3.0	3.0	3.0	4.0	-	-	-	-
Amarre	8a	10.0	2.0	3.0	3.0	4.0	-	-	-	-
Crecimiento fruto	9a	10.0	2.0	3.0	3.0	4.0	2.0	5.0	5.0	-
Inicio de malla	10a	10.0	2.0	4.0	4.0	4.0	-	-	-	-
Enmalle fruto	11a	10.0	-	5.0	5.0	4.0	-	-	-	-
Enmalle maduración	12a	10.0	-	5.0	5.0	4.0	2.0	5.0	5.0	-
Cosecha	13a	10.0	-	5.0	5.0	6.0	-	-	-	-

3.11 Variables agronómicas y calidad de fruto

3.11.1 Peso de fruto y rendimiento (kg ha^{-1})

Los frutos de todos los tratamientos fueron cosechados a madurez comercial (malla bien formada y cuando el pedúnculo se desprendía fácilmente). Todos los frutos recolectados fueron pesados en una báscula digital marca Santul con capacidad de 5 kg. El rendimiento por hectárea se calculó a partir del peso total obtenido en cada unidad experimental.

Figura 6. Peso del fruto del melón.



3.11.2 Diámetro polar y diámetro ecuatorial

El diámetro polar y ecuatorial se midieron con un vernier digital (Truper®, México) y los resultados se registraron en cm. Se le midió cada fruto cosechado.

Figura 7. Medidas del diámetro polar y ecuatorial.



3.11.3 Sólidos solubles totales

Para cada tratamiento y repetición, se seleccionaron tres frutos, los cuales fueron perforados cuidadosamente para extraer una gota de jugo. La muestra obtenida se depositó en un refractómetro manual (Master Refractometer Automatic Atago), registrando los valores en grados Brix ($^{\circ}\text{Brix}$) como indicador del contenido de sólidos solubles.

Figura 8. Determinación de grados Brix del fruto del melón.



3.11.4 Firmeza del fruto

La firmeza de los frutos se evaluó utilizando un penetrómetro modelo FH20000 (ExtechMaster 2311) equipado con una puntilla de 8 mm de diámetro. La cáscara de cada fruto fue retirada y se colocó sobre una superficie rígida y plana. Se realizaron cuatro mediciones de penetración por fruto y se calculó el promedio de las mismas. Los resultados se expresaron como la fuerza máxima de compresión en Newton (N).

Figura 9. Determinación de firmeza del fruto de melón.



3.12 Análisis de compuestos nutraceuticos

3.12.1 Preparación de extractos para antioxidantes no enzimáticos

Para la cuantificación de antioxidantes no enzimáticos, se seleccionó al azar un melón de cada tratamiento y repetición. Se tomaron dos gramos de pulpa fresca mezclada en 10 ml de etanol al 80% en un tubo de plástico con tapa rosca, que se colocó en un agitador rotatorio (ATR Inc., USA) durante 6 horas a 5°C y 20 rpm. Luego, los tubos se centrifugaron a 3,000 rpm durante 5 minutos y se eliminó el sobrenadante para realizar las pruebas analíticas.

3.12.2 Fenoles totales

Los fenoles totales se midieron utilizando una modificación el método Folin-Ciocalteu (Esparza *et al.*, 2006). Se mezclaron 30 µl muestra con 270 µl de agua destilada en un tubo de ensayo y se añadió 1.5 ml de reactivo Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich) diluido (1:15), agitando en vortex durante 10 s. Después de 5 min se añadieron 1.2 ml de carbonato de sodio (7.5% p/v) agitándose durante 10 s. La solución fue colocada en baño maría a 45°C durante 15 minutos y luego se dejó enfriar a temperatura ambiente. La absorbancia fue medida a 765 nm en un espectro fotómetro HACH 4000 y el contenido fenólico se calculó mediante una curva patrón ácido gálico (Sigma), reportándose los resultados en mg de ácido gálico (AG) equivalente por g de muestra base fresca (mg equiv AG g⁻¹ BF).

3.12.3 Flavonoides

El análisis de flavonoides se realizó siguiendo la metodología de Zhishen *et al.* (1990). Los compuestos fueron extraídos con metanol. Se homogenizaron 0.5 g

con 5 mL de metanol y se centrifugo a 400 rpm durante 10 minutos a 4°C. Se colocaron 250 µL de la alícuota en un tubo de ensayo, seguido de la adición de 75 µL de NaNO₂, se agito con vortex. Después de cinco minutos, se añadieron 150 µL de ALCL₃; luego, se incorporó 500 µL de NaOH, más un volumen final de 2.025 de H₂O. La absorbancia fue medida al instante por espectrometría A510 y los flavonoides fueron cuantificados en base a una curva estándar de catequina.

3.12.4 Capacidad antioxidante

Se seleccionan tres melones al azar y se extrajo la pulpa, que se colocó en bolsas ziplock con su respectiva identificación. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Ciencias Básicas de la UAAAN UL, evaluándose la capacidad antioxidante según el método *in vitro* DPPH⁺, utilizando una modificación del método publicado por Brand-Williams (1995). Para la determinar la capacidad antioxidante, se mezclaron 50 µl de muestra con 950 µl de solución DPPH⁺, y después de 3 minutos de reacción, se leyó la absorbancia de la mezcla a 515 nm. Se construyó una curva estándar con Trolox (Aldrich), y reportándose los resultados como capacidad antioxidante equivalente, expresada en micromolar (µM) de Trolox por gramo de base fresca (µM equiv Trolox g⁻¹ BF)

3.12.5 Vitamia C

La concentración de vitamina C en el fruto se evaluara empleando el método de titulación (Padayatt et al., 2001). Se tomaron muestras frescas del fruto de 10 g cada una, triturándolas con 10 ml de ácido clorhídrico 2%. Se filtró y se aforo a 100 ml con agua destilada en un matraz Erlenmeyer. Se tomaron 10 ml de la muestra

diluida y se titularon con una solución de 2.6 diclorofenolindofenol (1×10^{-3} N) determinándose el contenido de vitamina C mediante la fórmula:

Vitamina C (mg 100g PF) = (ml de diclorofenolindofenol) (0.088) (volumen total)(100)/(volumen de la alícuota)(peso de la muestra).

Para que la titulación sea válida, el color rojizo debe persistir durante unos segundos. Al alcanzarse dicho color, se detuvo la adición del reactivo y el cálculo se efectuó con el volumen consumido. Los resultados se expresaron en mg g^{-1} BF.

3.12.6 Contenido de Cu en pulpa

La concentración de cobre en la pulpa de melón se determinó según la AOAC (1990) mediante espectrofotometría de absorción atómica con llama de aire-acetileno (Varian-Spectr AA 3110, Palo Alto, CA, EE. UU.), los resultados se reportaron en microgramos por kilogramo de peso seco ($\mu\text{g kg}^{-1}$ PS).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Rendimiento y calidad comercial

El rendimiento y peso de los frutos de melón fueron afectados por las distintas dosis de NPs CuO asperjadas ya que a medida que aumentó la concentración de NPs aplicadas, existe una disminución en estas variables (Cuadro 5). El peso de los frutos expuestos a la dosis más alta de NPs CuO presento una reducción del 11% en comparación con control. En el caso del melón, el peso de los frutos varia entre 0.5 a 4 kg (Espinoza-Arellano et al., 2023). Los resultados encontrados en el presente estudio se encuentran dentro de este rango.

Cuadro 4. Rendimiento, peso de frutos, sólidos solubles totales y firmeza de frutos de melón sometidos a diferentes dosis de NPs CuO.

NPs CuO (mg L ⁻¹)	Rend. (t ha ⁻¹)	Peso fruto (kg)	Grados Brix	Firmeza (N)
Control	19.77±1.4 c	1.81 ± 0.3 a	12.77 ± 0.79 ab	17.08 ± 1.4 ab
150	23.78 ± 1.7 a	1.63 ± 0.2 ab	13.49 ± 0.54 a	17.83 ± 2.0 ab
200	24.09 ± 1.09 a	1.62 ± 0.4 b	12.52 ± 0.31 ab	19.64± 1.6 a
250	23.15 ± 1.4 ab	1.62 ± 0.73 ab	12.62 ± 0.17 ab	16.34± 1.1 b
300	19.92 ± 1.3 abc	1.55 ± 0.2 b	12.69 ± 0.19 ab	18.41 ± 2.2 b
350	17.58± 1.5 c	1.53 ± 0.1 b	10.66 ± 0.67 c	12.24 ± 1.4 c

*= medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$); n= 6 ± desviación estándar.

En contraste, los rendimientos de las plantas tratadas con 150 y 200 mg L⁻¹, fueron superiores en un 16 y 18%, respectivamente, respecto al control. Diversos estudios han señalado que la aplicación de NPs CuO pueden favorecer el aumento en la productividad de los cultivos (Rajput et al., 2018); no obstante, concentraciones elevadas de este metal alteran la cinética de reparación del ADN (Shabbir et al.,

2020), afectan de manera negativa la morfología, fisiología y bioquímica de las plantas (Da-Costa et al., 2016) generan fitotoxicidad en los cultivos (AlQuraidi, et al., 2019). Desde la perspectiva comercial, se requiere que los frutos presenten un contenido mínimo de 10 °Brix y mantengan firmeza, características que incrementan su aceptación por parte de los consumidores. Los resultados obtenidos muestran que dosis bajas de NPs CuO mejoran la firmeza y los sólidos solubles totales (SST), mientras que dosis elevadas ocasionan una disminución en estos parámetros (Cuadro 5).

Similares resultados fueron encontrados por López-Vargas et al. (2018) informaron que concentraciones elevadas de NPs CuO reduce los sólidos solubles totales (SST) y la firmeza de frutos. Da-Costa y Sharma. (2016), explican que la disminución de los SST es debido a la disminución en el contenido de pigmentos fotosintéticos en las hojas, trayendo consigo una menor producción de fotosintatos y , en consecuencia, una reducción en la acumulación de azúcares en los frutos. Por otro lado, el aumento en la firmeza de los frutos provocado por las NPs CuO podría deberse a la lignificación de la pared celular (López-Vargas et al., 2018), este efecto se asocia con el incremento de la actividad de la enzima Fenilalanina Amonio Liasa, dado que la fenilalanina actúa como precursor de la síntesis de lignina (Wang et al., 2013). No obstante, concentraciones elevadas de NPs CuO provocan una marcada disminución en la firmeza de los frutos (Hong et al., 2016).

La variedad de respuestas frente a las NPs depende de la dosis aplicada, pueden generar efectos positivos, negativos o incluso no producir ningún efecto, fenómeno conocido como hormesis, reportado en aplicaciones de NPs como

bioestimulantes en los cultivos (Juárez-Maldonado et al., 2019). Por esta razón, es necesario continuar investigando sobre la dosis adecuada, la especie y etapa vegetativa vegetativa de los cultivos.

4.2 Compuestos bioactivos en frutos

La obtención de alimentos ricos en compuestos bioactivos es favorable, ya que estos pueden contribuir a la prevención de enfermedades crónicas degenerativas y favorecer las funciones fisiológicas del organismo. Los resultados obtenidos muestran que la aspersión foliar con NPs CuO, afectaron el contenido de compuestos bioactivos en la pulpa de melón (Cuadro 6). La aplicación foliar de 150 mg L⁻¹ aumento los compuestos bioactivos en un 28,10 y 43% (flavonoides, fenoles y capacidad antioxidante, respectivamente), en comparación con los frutos de plantas no tratadas. Juárez-Maldonado et al. (2018) reportan que las NPs Cu ejercen un efecto positivo sobre la acumulación de compuestos bioactivos y elevan la capacidad antioxidante en *M. oleífera*.

Cuadro 5. Efectos de la aspersión foliar NPs CuO sobre compuestos bioactivos en frutos de melón.

NPs CuO (mg L ⁻¹)	Flavonoides (mg QE 100 g ⁻¹ BF)	Fenoles (mg AG 100 g ⁻¹ BF)	Capacidad	
			antioxidante (mg equiv Trolox 100 g ⁻¹ BF)	Vitamina C (mg 100 g ⁻¹ BF)
Control	73.32±1.7 c	184.87±1.8 c	53.38±1 c	40.48±4.1 b
150	101.97±1.9 a	206.51±2.8 a	93.76±6 a	54.3±1.6 a
200	85.77±1.5 b	187.26±1.4 bc	71.67±4 b	42.82±2 b
250	77.82±3.7bc	192.29±6 bc	63.65±2.9 b	32.98±0.57 c
300	77.21±1.2bc	188.28±8.4 bc	64.38±0.51 b	31.2±1 c

350	71.68±4 c	165.84±6.1 d	52.07±15.1 c	20.6±1.9 d
-----	-----------	--------------	--------------	------------

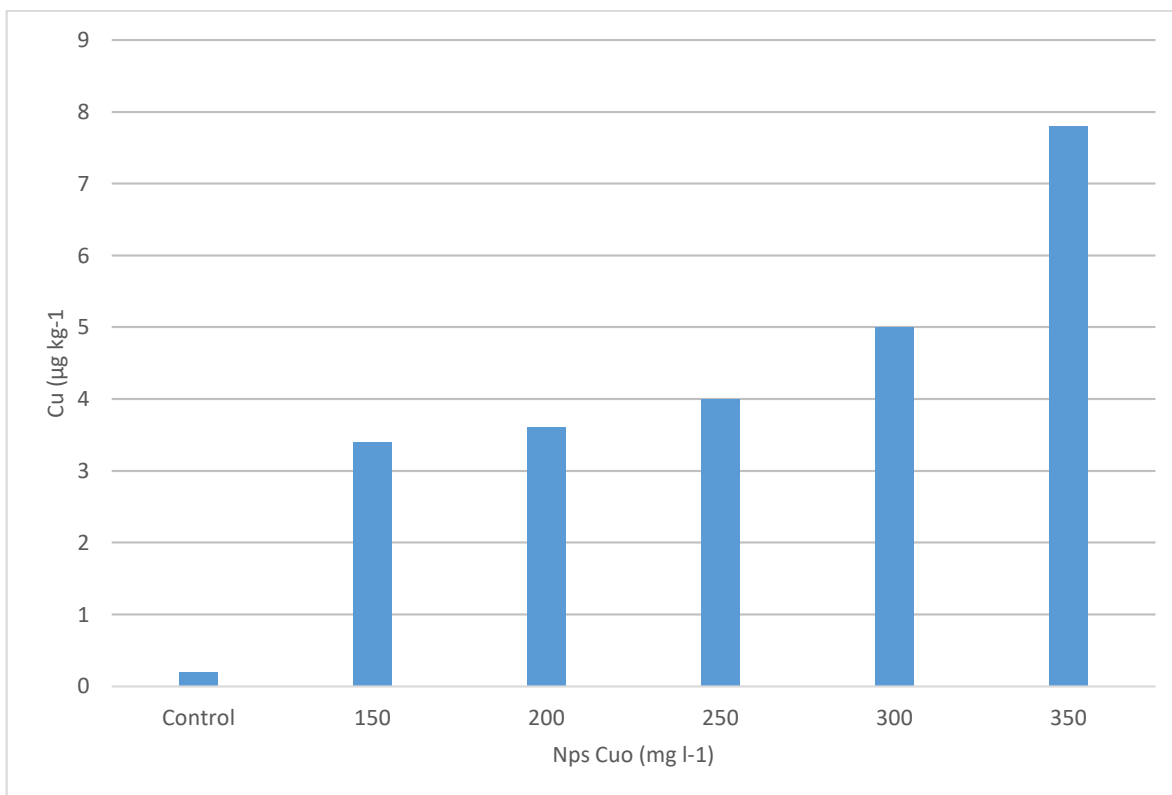
*= medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$);
n= 6 ± desviación estándar.

Sin embargo, la mayor dosis causó una drástica disminución de: 29, 19 y 44%, con relación al mejor tratamiento (150 mg L^{-1}). La aplicación de NPs CuO genera especies reactivas de oxígeno, las cuales alteran la actividad de los antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos como respuesta al estrés inducido (Ma et al., 2010; Ahmed et al., 2018). Las especies reactivas de oxígeno desempeñan una función dual, ya que a concentraciones bajas actúan como señalizadores, generando una respuesta moderada de estrés en las plantas, de este modo, se activa la biosíntesis de compuestos bioactivos, sin embargo, a concentraciones elevadas se interrumpe la homeostasis celular, provocando daños en las estructuras celulares, proteínas, ADN y lípidos (Kumar et al., 2016).

Respecto a la Vitamina C con la aplicación foliar de 150 mg L^{-1} se encontró un incremento del 25% en comparación al control. López-Vargas et al. (2018), han reportado similares resultados con la aplicación de $50\text{-}250 \text{ mg L}^{-1}$; sin embargo, una concentración mayor (500 mg L^{-1}) disminuye su contenido. La vitamina C actúa como cofactor en reacciones redox de diversas enzimas. Por ejemplo, el ácido ascórbico juega un papel vital en las células de las plantas, especialmente en el ciclo ácido ascórbico-glutatión, que se encarga de la donación de electrones. Durante este ciclo, la enzima ascorbato peroxidasa utiliza dos moléculas de ácido ascórbico para convertir el H_2O_2 que puede ser dañino, en agua y monodehidroascorbato (MDA) (Hernández-Hernández et al., 2019).

Por lo tanto, un aumento en la disponibilidad de cobre podría potencialmente elevar la actividad de la enzima deshidroascorbato deshidrogenasa. En cuanto a las nanopartículas de óxido de cobre, estas podrían permitir que la entrega de cobre a la planta sea más eficaz y regulada, limitando la toxicidad del cobre cuando se aplica en cantidades excesivas (Juárez-Maldonado et al., 2018). Contenido de Cu en pulpa: El Cu, es uno oligoelementos esencial para el ser humano, este se absorbe a nivel del intestino delgado y se distribuye rápidamente en la circulación, uniéndose a proteínas de alto peso molecular que participan en la función y el mantenimiento del sistema inmunitario (Raha et al., 2020). Los resultados obtenidos muestran que el contenido de cobre en la pulpa de los frutos de melón aumentó a medida que aumentaron las dosis aplicadas (Figura 10).

Figura 10 Efecto de la aspersión foliar NPs CuO sobre su acumulación en pulpa de melón. Medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$); $n = 6 \pm$ desviación estándar.



Debido a que las NPs de CuO pueden penetrar al interior de la planta y moverse a través del floema y transportarse a otros órganos (Pérez-de-Luque, 2017). Los requerimientos de Cu en la dieta de la población fluctúan entre 1 a 3 mg día⁻¹ para evitar alguna deficiencia, con una dosis media recomendada de 1 200 µg día⁻¹ (Al-Hakkani, 2020), por lo cual bajo las condiciones de este estudio no existe riesgo al consumir y podría ser una alternativa efectiva para enriquecer con Cu a los frutos de melón (Al-Hakkani, 2020).

5. CONCLUSIONES

La aspersión de foliar de 150 mg L⁻¹ de NPs CuO mejora el rendimiento e induce una acumulación de compuestos bioactivos y de Cu en la pulpa de los frutos de melón. Altas dosis de NPs CuO reducen el rendimiento y la síntesis de compuestos fitoquímicos como consecuencia de la acumulación de cobre en los frutos. No se recomienda la aplicación de dosis altas de NPs CuO, ya que se provoca una sobreproducción especies reactivas de oxígeno provocando un estrés celular afectando el rendimiento y la calidad nutraceútica.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official Methods of Analysis, 15th ed.; Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC, USA, 1990.
- Ahmed, B.; Saghir, M.K.; Musarrat, J. 2018. Toxicity assessment of metal oxide nano-pollutants on tomato (*Solanum lycopersicon*): A study on growth dynamics and plant cell death. *Environ. Pollut.* 240, 802–816.
- Al-Hakkani, M. F. 2020. Biogenic copper nanoparticles and their applications: A review. *SN Applied Sciences*. 2(3): 1–20. doi.org/10.1007/s42452-020-2279-1
- AlQuraidi, A.O.; Mosa, K.A.; Ramamoorthy, K. Phytotoxic and Genotoxic Effects of Copper Nanoparticles in Coriander (*Coriandrum sativum*—Apiaceae). *Plants*, 2019, 8, 19.
- Arellano, M.; Blundell, R. y Bonhomme, S. 2017. Dinámica de ingresos y consumo: un marco de datos de panel no lineal. *Econometría*. 85(3):693-734. 10.3982/ecta13795
- Amer, M. W., & Awwad, A. M. 2021. Green synthesis of copper nanoparticles by Citrus limon fruits extract, characterization and antibacterial activity. *International Scientific Organization*. 7(1): 1–8. doi.org/10.5281/zenodo.4017993
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science* 28(1):25-30. doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

- Cleves, J; Fonseca, J; Jarma, A.2012.Manual para el cultivo de frutales en el trópico. Universidad nacional de Colombia, Bogotá.3p
- Da Costa, M.V.J.; Sharma, P.K. 2016. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*. 54(1): 110–119.
- David M, Munaswamy V, Halappa R, Marigoudar S. 2008. Impact of sodium cyanide on catalase activity in the freshwater exotic carp, *Cyprinus carpio* (Linnaeus). *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 92(1):15-18.
doi.org/10.1016/j.pestbp.2008.03.013
- Davidson, K. H., Pillai, S. S., Nagashima, Y., Singh, J., Metrani, R., Crosby, K. M., Jifon, J., Patil, B., Niyakan, S., Qian, X., & Koiwa, H. 2023. Melon (*Cucumis melo*) fruit-specific monoterpene synthase. *Molecular Horticulture*. 3(1): 1–4.
doi.org/10.1186/s43897-023-00051-6
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Verma, V., Kaur, M., Ondrisik, P., & Hossain, A. 2022. Biofortification — A Frontier Novel Approach to Enrich Micronutrients in Field Crops to Encounter the Nutritional Security. 27(4): 1–38.
- Esparza, RJR; Stone, MB; stushnoff, CE; pilon, SP; kendall, A. 2006. Effects of ascorbic acid applied by two hydrocooling methods on physical and chemical properties of green leaf lettuce stored at 5°C. *Journal of Food Science* 71(3): 270-276.
- Faostat. 2020. Food and Agriculture Organization the United Nations Statistics.2020 p. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.

- García-Mendoza, V., Cano-Ríos, P., & Reyes-Carrillo, J. L. 2019. Harper-type melon hybrids have higher quality and longer postharvest life than commercial hybrids. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 25(3): 185-197.
- Gaytan-Aleman, L. R., Nava-Camberos, U., Mendoza-Pedroza, S. I., Veliz-Deras, F. G., & Arellano-Rodriguez, G. 2021. Biofortificación con cobre en el forraje verde de trigo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 1(1): 1-10. doi.org/10.19136/era.a8nII.2885
- Gío-Trujillo, J. A., Alvarado-López, C. J., Pacheco-López, A., Cristóbal-Alejo, J., & Reyes-Ramírez, A. 2022. Prespectivas futuras de la biofortificación de alimentos: la asociación con microorganismos del suelo. *Ra Himhai*. 18(4): 175-199. doi.org/10.35197/rx.18.04.2022.08.jg
- Gutiérrez-Ruelas, N. J., Palacio-Márquez, A., Sánchez, E., Muñoz-Márquez, E., Chávez-Mendoza, C., Ojeda-Barrios, D. L., & Flores-Córdova, M. A. 2021. Impact of the foliar application of nanoparticles, sulfate and iron chelate on the growth, yield and nitrogen assimilation in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 49(3): 12437. doi.org/10.15835/nbha49312437
- Guo, Y., Yu, Z., Li, R., Wang, L., Xie, C., & Wu, Z. 2023. Cut-wounding promotes phenolic accumulation in *Cucumis melo* L. fruit (cv. Yugu) by regulating sucrose metabolism. *Horticulturae*. 9(258): 1-15.
- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., De La Fuente, M. C., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. 2019. Impact of selenium and copper nanoparticles on

- yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*. 8(10): 1–17. doi.org/10.3390/plants8100355
- Hong, J.; Wang, L.; Sun, Y.; Zhao, L.; Niu, G.; Tan, W.; Rico, C.M.; Peralta-Videa, J.R.; Gardea-Torresdey, J.L. 2016. Foliar applied nanoscale and microscale CeO₂ and CuO alter cucumber (*Cucumis sativus*) fruit quality. *Sci. Total Environ.* 563(1): 904–911.
- IICA-COFUPRO. 2010. Programa de documentos de casos de éxito.
<https://www.redinnovagro.in/casosexito/14coahuilaforraje.pdf>.
- Juárez-Maldonado, A.; Ortega-Ortiz, H.; González-Morales, S.; Morelos-Moreno, Á.; Cabrera-de la Fuente, M.; Sandoval-Rangel, A.; Cadenas-Pliego, G.; Benavides-Mendoza, A. 2019. Nanoparticles and Nanomaterials as Plant Biostimulants. *Int. J. Mol. Sci.* 20(1):162–179.
- Kalisz, A., Húska, D., Jurkow, R., Dvořák, M., Klejdus, B., Caruso, G., & Šekara, A. 2021. Nanoparticles of cerium, iron, and silicon oxides change the metabolism of phenols and flavonoids in butterhead lettuce and sweet pepper seedlings. *Environmental Science: Nano*. 8(7): 1945–1959.
doi.org/10.1039/d1en00262g
- Kubo, K., Pritchard, B., & Phyto, A. S. 2021. How Chinese demand for fresh fruit and vegetables is creating new landscapes of rural development and vulnerability in Southeast Asia: Insights from the Myanmar melon frontier. *Geoforum*. 122(1): 32–40. doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.03.008
- Kumar, S.; Trivedi, P.K. 2016. Heavy metal stress signaling in plants. In *Plant Metal Interaction*; Elsevier Inc.: New York, NY, USA. 2, 585–597. ISBN 978-3-662-07747-4.

- Lopez-Lima, D.; Mtz-Enriquez, A.I.; Carrión, G.; Basurto-Cereceda, S.; Pariona, N. 2020. The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: Effective treatment for Fusarium wilt and plant growth promoter. *Sci. Hortic.* 277(1): 109810.
- López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Romenus, K. de A., de la Fuente, M. C., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. 2018. Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences (Switzerland)*. 8(7): 1020. doi.org/10.3390/app8071020
- Ma, X.; Geiser-Lee, J.; Deng, Y.; Kolmakov, A. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation. *Sci. Total Environ.* 408 (1): 3053–3061.
- Manchali, S., Murthy, K. N. C., Vishnuvardana, & Patil, B. S. 2021. Nutritional composition and health benefits of various botanical types of melon (*Cucumis melo* L.). *Plants*. 10(9): 1–21. doi.org/10.3390/plants10091755
- Mosquera-Vivas, E. S., Ayala-Aponte, A. A., & Serna-Cock, L. 2019. Ultrasonido y deshidratación osmótica como pretratamientos a la liofilización de melón (*Cucumis melo* L.). *Información Tecnológica*. 30(3): 179-188. doi.org/10.4067/S0718-07642019000300179
- Nickel K, Cunningham B. 1969. Improved peroxidase assay method using leuco 2, 3', 6-trichloroindophenol and application to comparative measurements of peroxidatic catalysis. *Analytical Biochemistry*. 27(2):292–299. doi.org/10.1016/0003-2697(69)90035-9

- Ortega-Ortiz, H., Gaucin-Delgado, J. M., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Hernández-Montiel, L. G., De la Cruz-Lazaro, E. 2022. Copper oxide nanoparticles biosynthesized improve germination and bioactive compounds in wheat sprouts. *Natulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 50(1): 1–16.
- Pérez-de-Luque, A. 2017. Interaction of nanomaterials with plants: What do we need for real applications in agriculture? *Front. Environ. Sci.* 5, 12.
- Pinto Zapata, M., Guzmán Rozo, N, Baquero Maestre., Rebolledo Podleski, N. y Páez Redondo, A. 2011 Modulo del cultivo del melón.
- Prasad, R.; Shivay, Y. S. and Kumar, D. 2014. Chapter two agronomic biofortification of cereal grains with iron and zinc. *In: Donald LS. (Ed) advances in agronomy. Academic Press.* 55-91 pp.
- Rajput, V.D.; Minkina, T.; Suskova, S.; Mandzhieva, S.; Tsitsuashvili, V.; Chaplugin, V.; Fedorenko, A. 2018. Effects of Copper Nanoparticles (CuO NPs) on Crop Plants: A Mini Review. *Bionanoscience*. 8(1): 36–42.
- Raha, S., Mallick, R., Basak, S., & Duttaroy, A. K. 2020. Is copper beneficial for COVID-19 patients? *Medical Hypotheses*. 142(1): 109814. doi.org/10.1016/j.mehy.2020.109814
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Yescas-Coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. 2021. Nanoparticulas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(5): 791–803.
- Rodríguez-Luna, D., Ruiz, H. A., González-Morales, S., Sandoval-Rangel, A., Cabrera de la Fuente, M., Charles-Rodríguez, A. V., & Robledo-Olivo, A.

2022. Recovery of melon residues (*Cucumis melo*) to produce lignocellulolytic enzymes. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 12(12): 5915–5922. doi.org/10.1007/s13399-020-01055-8
- Roosevelt H D. 2002. El cultivo de melón, disponible en <http://www.sica.gov.ec/agronegocios/biblioteca/ing%20Rizzo/perfilesproducts/melon.pdf>
- SIAP-SAGARPA. (2016). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. México, D.F. Sitio Web: <http://www.gob.mx/siap/> [[Links](#)]
- SIAP-SAGARPA. (2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Sistema de Información Arancelaria vía Internet (SIAVI). (2017). Sistema de Información de Comercio Exterior de México en base a la Fracción Arancelaria. Recuperado de: <http://www.economia-snci.gob.mx/> [[Links](#)]
- México, D.F. Sitio Web: <http://www.gob.mx/siap/> [[Links](#)]
- Shabbir, Z., Sardar, A., Shabbir, A., Abbas, G., Shamshad, S., Khalid, S., Natasha, Murtaza, G., Dumat, C., & Shahid, M. 2020. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere*. 259: 127436. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436
- Taylor, A. A., Tsuji, J. S., Garry, M. R., McArdle, M. E., Goodfellow, W. L., Adams, W. J., & Menzie, C. A. 2020. Critical Review of Exposure and Effects: Implications for Setting Regulatory Health Criteria for Ingested Copper. *Environmental Management*. 65(1): 131–159. doi.org/10.1007/s00267-019-01234-y
- Vallejo, F; Estrada, E.2004.produccion de hortalizas de clima cálido. Universidad nacional de Colombia.239, 244. pp.

- Wahab, A., Mushtaq, K., Borak, S. G., & Bellam, N. 2020. Zinc-induced copper deficiency, sideroblastic anemia, and neutropenia: A perplexing facet of zinc excess. *Clinical Case Reports*. 8(9): 1666–1671. doi.org/10.1002/ccr3.2987
- Wang, Y.; Chantreau, M.; Sibout, R.; Hawkins, S. 2013. Plant cell wall lignification and monolignol metabolism. *Front. Plant Sci*. 4 (1): 1–30.