

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



IMPACTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE COBALTO EN EL CONTENIDO DE
COMPUESTOS BIOACTIVOS EN FRUTOS DE TOMATE

Tesis

Que presenta KARINA MARGARITA DE LOS SANTOS VÁZQUEZ
Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Octubre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



IMPACTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE COBALTO EN EL CONTENIDO DE
COMPUESTOS BIOACTIVOS EN FRUTOS DE TOMATE

Tesis

Que presenta KARINA MARGARITA DE LOS SANTOS VÁZQUEZ
Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Firma manuscrita en azul del Dr. Antonio Juárez Maldonado.

Dr. Antonio Juárez Maldonado
Director UAAAN

Firma manuscrita en azul de la Dra. Yolanda González García.

Dra. Yolanda González García
Co-Director

Firma manuscrita en azul del Dr. Antonio Flores Naveda.

Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de posgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Octubre 2025

IMPACTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE COBALTO EN EL CONTENIDO DE
COMPUESTOS BIOACTIVOS EN FRUTOS DE TOMATE

Tesis

Elaborada por KARINA MARGARITA DE LOS SANTOS VÁZQUEZ como requisito
parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión
y aprobación de Comité de Asesoría



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Director de Tesis



Dra. Yolanda González García
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Dr. Gregorio Cadenas Pliego
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de posgrado
UAAAN

Saltillo Coahuila

Octubre 2025

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme las puertas y brindarme las herramientas necesarias para mi preparación académica y permitirme formar parte del núcleo de profesionistas.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico otorgado durante el curso de la maestría.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, asesor principal de tesis, por su confianza y asesoramiento durante este trayecto de elaboración de la presente tesis; para el Dr. Alberto Sandoval Rangel, Dr. Marcelino Cabrera de la fuente, Dr. Gregorio Cadenas Pliego y Dra. Yolanda González García, por su valiosa colaboración en la evaluación del proyecto.

A la Mtra. Lorena Silvestre Castañeda por su ayuda y asesoramiento en diferentes actividades requeridos para el desarrollo del proyecto.

DEDICATORIAS

A mi persona, por cada esfuerzo y cada obstáculo logrado, porque a pesar de todo sigue motivándose a ser mejor cada día.

A mi madre, Sra. María Teresa por estar incondicionalmente para mí y ser mi pilar día a día.

A mis hermanos especialmente a Reyna Marilit y Elidia Guadalupe por ser mi apoyo incondicional en todas mis decisiones en esta vida y a mi hermano Rodolfo por su apoyo y hacer equipo en cada reto que nos afrontamos juntos. A mi cuñada Verónica García por estar presente y brindarme su ayuda en diversas situaciones.

A mis sobrinos, especialmente Brisa C., Carlos E., Aledis D. y Sofia por darme su amor y compartir momentos que me hacen crecer como persona.

A esas personas que considero mis amigos Ing. Gabriel A. Barrios López, Ing. Héctor Castillo Soto, Dra. Eneida A. Pérez Velasco, Ing. Alejandra Sánchez y Ing. Yoni Gudiel, que durante este camino profesional coincidimos para sumar y disfrutar de este recorrido.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1.1 Nutrientes esenciales en el cuerpo humano.....	4
1.1.1 Importancia del cobalto en la salud humana.....	5
1.2 Métodos para incrementar la ingesta de elementos esenciales.....	5
1.2.1 Biofortificación de los Cultivos Agrícolas	6
1.2.2 Impacto del cobalto en las plantas	8
1.3 Importancia del consumo del tomate en la salud humana.....	9
1.3.1 Biofortificación en el cultivo de tomate	10
1.4 Nanotecnología y nanomateriales	11
1.4.1 Biofortificación con Nanomateriales	13
MATERIALES Y MÉTODOS	14
1.5 Desarrollo del experimento bajo invernadero	14
1.6 Descripción de tratamientos	14
1.7 Análisis de Parámetros Agronómicos	15
1.8 Muestreo para análisis bioquímicos y calidad de frutos.....	15
1.9 Determinación de minerales	16
1.10 Análisis de compuestos bioactivos.....	16
1.11 Análisis de propiedades fisicoquímicas de frutos	16
1.12 Análisis estadísticos	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
1.13 Parámetros agronómicos de las plantas de tomate	18
1.14 Contenido de minerales	19
1.15 Compuestos bioactivos.....	27
1.16 Propiedades fisicoquímicas de los frutos del tomate.....	29

CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	42

LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Concentración de macro (mg g^{-1} PS) y micro ($\mu\text{g g}^{-1}$ PS) nutrientes en hojas de tomate	22
Tabla 2. Concentración de macro (mg g^{-1} PS) y micro ($\mu\text{g g}^{-1}$ PS) nutrientes en frutos de tomate	25
Tabla 3. Parámetros de calidad de frutos de tomate cosechados a los 80 días después del trasplante (DDT) y almacenados a temperatura ambiente (22 ± 1 °C).	31
Tabla 4. Parámetros de calidad de frutos de tomate colectados a los 100 días después del trasplante (DDT) y almacenados a temperatura ambiente (22 ± 1 °C).	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parámetros agronómicos de plantas de tomate tratadas con diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de cobalto (NPs CoO).....	18
Figura 2. Parámetros agronómicos de plantas de tomate tratadas con diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de cobalto (NPs CoO).....	19
Figura 3. Contenido de Co en hojas de tomate de la primera etapa (A) y segunda etapa (B) y contenido de Co en frutos de tomate de la segunda etapa (C). Tratadas vía foliar con diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de cobalto (NPs CoO).....	20
Figura 4. Contenido de compuestos antioxidantes en frutos de tomate recolectados a los 80 DDT y 100 DDT de plantas tratadas vía foliar con diferentes concentraciones de NPs CoO.....	28
Figura 5. Contenido de compuestos antioxidantes (ABTS) en frutos de tomate recolectados a los 80 DDT y 100 DDT de plantas tratadas vía foliar con diferentes concentraciones de NPs CoO.....	29

RESUMEN

IMPACTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE COBALTO EN EL CONTENIDO DE COMPUESTOS BIOACTIVOS EN FRUTOS DE TOMATE

Por

KARINA MARGARITA DE LOS SANTOS VÁZQUEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ANTONIO JUAREZ MALDONADO – ASESOR

Saltillo, Coahuila

Octubre 2025

La biofortificación es una estrategia viable para mejorar el valor nutricional de los cultivos, por ello surge el interés del uso de nanopartículas (NPs) en plantas de tomate. El objetivo de este estudio es determinar el impacto de la aplicación foliar de NPs de óxido de cobalto (CoO) en el contenido de compuestos bioactivos en los frutos de tomate. En una etapa preliminar se evaluaron diferentes concentraciones de NPs CoO. Se observó que a 500 mg L^{-1} de NPs CoO las plantas no reducen su crecimiento, ni presentan síntomas de toxicidad. De acuerdo con esto, se seleccionaron tres concentraciones de NPs CoO (250 mg L^{-1} , 500 mg L^{-1} , 1000 mg L^{-1}), una de sulfato de cobalto (Co SO_4) (500 mg L^{-1}) y un control sin aplicación. En la segunda etapa no se observaron efectos negativos en el crecimiento. Se detectó presencia de Co en tejido foliar y frutos de los primeros racimos, siendo más efectivo al aplicar Co SO_4 . La aplicación de Co mejoró el contenido de Co, S, Zn, Mo y Na (tejido foliar) y P, Mg, S, Co y B (frutos). También se observó un aumento en los compuestos bioactivos como licopeno, fenoles, flavonoides, antocianinas y capacidad antioxidante lipofílica, sugiriendo una mejora en la capacidad antioxidante de la planta.

Palabras claves: Compuestos bioactivos, frutos, nanotecnología, sulfato de cobalto, óxido de cobalto, toxicidad, tejido foliar.

ABSTRACT

IMPACT OF COBALT NANOPARTICLES ON THE CONTENT OF BIOACTIVE COMPOUNDS IN TOMATO FRUITS

By

KARINA MARGARITA DE LOS SANTOS VÁZQUEZ

MASTER OF SCIENCE IN HORTICULTURE

ANTONIO NARRO AUTONOMOUS AGRICULTURAL UNIVERSITY

DR. ANTONIO JUAREZ MALDONADO – ADVISER

Biofortification is a viable strategy to improve the nutritional value of crops, therefore, there is growing interest in the use of nanoparticles (NPs) in tomato plants. The objective of this study was to determine the impact of foliar application of cobalt oxide (CoO) nanoparticles on the content of bioactive compounds in tomato fruits. In a preliminary phase, different concentrations of NPs CoO were evaluated. It was observed that at 500 mg L⁻¹, the plants did not show reduced growth or symptoms of toxicity. Based on these results, three concentrations of NPs CoO were selected (250 mg L⁻¹, 500 mg L⁻¹, 1000 mg L⁻¹), along with one treatment using cobalt sulfate (CoSO₄) at 500 mg L⁻¹, and a control group with no application. In the second phase, no negative effects on plant growth were observed. Cobalt was detected in foliar tissue and in fruits from the first clusters, with CoSO₄ showing greater effectiveness in cobalt accumulation. The application of Co enhanced the concentration of Co, S, Zn, Mo and Na in foliar tissue, and P, Mg, S, Co, and B in fruits. Additionally, there was an increase in bioactive compounds such as lycopene, phenols, flavonoids, anthocyanins, and lipophilic antioxidant capacity, suggesting an improvement in the antioxidant capacity of the plant.

Keywords: bioactive compounds, cobalt sulfate, cobalt oxide, fruits, foliar tissue, nanotechnology, toxicity.

INTRODUCCIÓN

El cuerpo humano es un sistema biológico complejo que necesita de macronutrientes, micronutrientes, fitonutrientes, aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas, minerales, prebióticos, probióticos y otros compuestos bioactivos para mantener la homeostasis metabólica. Una forma de adquirirlos es a través de los alimentos de la dieta humana que la naturaleza provee como frutas, verduras, carnes, legumbres, entre otros (Xia et al., 2022).

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) contiene compuestos que promueven la salud como vitaminas, carotenoides y compuestos fenólicos, representa la principal fuente de licopeno en la dieta humana. Además, presenta propiedades antiinflamatorias, antialérgicos, antimicrobianos, vasodilatadores, antitrombóticos, cardioprotectores y antioxidantes (Quinet et al., 2019; Włodarczyk et al., 2023).

Algunos micronutrientes son esenciales para determinados procesos del cuerpo, un ejemplo de ello es el cobalto (Co) que actúa como cofactor de la vitamina B₁₂ y en la formación de aminoácidos y proteínas en las células del sistema nervioso (Thiel et al., 2024). Dentro del cuerpo humano puede encontrarse en órganos como el corazón, hígado, riñón y bazo en cantidades de 1 a 2 mg, y considerablemente menores en el páncreas, cerebro y suero. La deficiencia de este micronutriente puede causar anemia e hipofunción de la tiroides, su consumo es a partir de la ingesta de pescado, cereales, partes verdes de plantas y agua (Jomova et al., 2022).

Por otra parte, el Co es un elemento que se considera no esencial para las plantas, aunque puede aportar algunos beneficios al crecimiento. Sin embargo, su función en el metabolismo aún no se comprende completamente (Bidast et al., 2022). En el cultivo de tomate a un nivel de 0.5 mM se desarrolla efectos visibles de toxicidad como manchas necróticas, quemadura de los márgenes y pérdida de la lámina, además, disminución de la biomasa, restricción en la absorción y translocación de nutrientes esenciales, reducción de la concentración de clorofila, fotosíntesis y alteración del metabolismo del hierro (Fe) (Gopal et al., 2003). No obstante, las plantas pueden acumular Co en concentraciones normalmente entre 0.05 a 5 mg kg⁻¹ de peso seco (PS) en partes comestibles de la planta

como frutas, granos y semillas. Aunque su baja movilidad restringe su transporte desde las raíces a los brotes (Hu et al., 2021; Mahey et al., 2020).

Durante la última década, la nanotecnología se ha aplicado en la salud pública, medicina, industria y agricultura, en esta última provee técnicas innovadoras para mejorar la productividad de los cultivos (Malik et al., 2023; Saritha et al., 2022). Dicha ciencia hace uso de materiales con un tamaño entre 1 a 100 nanómetros (nm) (Salem, 2023). Las nanopartículas (NPs) a base de Co poseen propiedades únicas debido a su tamaño y tienen potencial para eliminar radicales libres, almacenar energía, como cofactor para la vitamina B₁₂ y nano pesticida (Wang et al., 2025).

En la actualidad se requiere mejorar los cultivos para aumentar su valor nutricional, a través del proceso de biofortificación se ha logrado satisfacer la demanda de nutrientes del cuerpo humano (Kiran, 2020). Como alternativa innovadora, la nanotecnología ha permitido el uso de NPs a base de Co en el tomate, un cultivo modelo por su fácil manejo, importancia económica y su valor en la dieta humana.

Esta herramienta será útil para biofortificar los frutos de tomate con este elemento e inducir una mayor acumulación de compuestos bioactivos en los frutos, así como influir positivamente en la fisiología y metabolismo de la planta. Por ello, se plantea los siguientes objetivos e hipótesis:

Objetivo general:

Determinar el impacto de la aplicación de Co NPs en el contenido de compuestos bioactivos en los frutos de tomate.

Objetivos específicos:

- Evaluar el impacto de las Co NPs en el crecimiento y desarrollo las plantas de tomate.
- Determinar los cambios en el contenido de los compuestos bioactivos en los frutos de tomate por efecto de la aplicación de Co NPs.
- Determinar los cambios el contenido de Co y otros elementos en los frutos de tomate por efecto de la aplicación de Co NPs.

Hipótesis:

La aplicación de Co NPs en la producción de tomate favorecerá la calidad de los frutos de tomate, incrementará el contenido de compuestos bioactivos y presentará un mayor contenido de cobalto (biofortificación).

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Nutrientes esenciales en el cuerpo humano

El cuerpo humano requiere de nutrientes esenciales (carbohidratos, proteínas, grasas, vitaminas, sales inorgánicas y oligoelementos) y no esenciales. Los nutrientes esenciales suministran energía al cuerpo y regulan el metabolismo a través de funciones fisiológicas específicas (Tu et al., 2024). Mientras que los nutrientes no esenciales ayudan a respaldar una estructura o función en el cuerpo y pueden ser sintetizados de manera endógena a partir de otros precursores de nutrientes que dependen de la tasa de conversión o de los procesos metabólicos internos (Townsend et al., 2023).

La naturaleza a través de los diversos alimentos provee estos nutrientes esenciales y otros compuestos bioactivos que contribuyen a mejorar la salud humana. Además, en la dieta ingerimos metales esenciales como hierro, zinc y magnesio también conocidos como micronutrientes u oligoelementos. Estos micronutrientes son fundamentales para la actividad enzimática, transporte de oxígeno y señalización celular. Su ausencia puede llegar afectar de manera considerable los procesos fisiológicos esenciales, sin embargo, son requeridos en pequeñas cantidades inferiores a 100 mg/día para un funcionamiento fisiológico adecuado, de lo contrario pueden llegar a ser tóxicos para el organismo (Frag et al. 2023; Milanković et al. 2024).

El tomate es un fruto presente significativamente en la dieta humana, contiene minerales, incluidos macroelementos (calcio, potasio, sodio, magnesio), micronutrientes (cobre, manganeso, zinc, hierro, flúor, cobalto, cromo, níquel) y oligoelementos (cobalto, boro y manganeso) benéficos para la salud (Vélez-Terreros et al., 2024). El hierro y el Co son micronutrientes esenciales para mantener la homeostasis en el cuerpo. El hierro participa en el transporte de oxígeno como para de la hemoglobina, mientras que el Co forma parte del anillo de hidroxicobalamina (vitamina B₁₂) implicada en la producción de glóbulos rojos. La deficiencia de estos puede dar origen a anemia microcítica y macrocítica, respectivamente. Por lo general estos elementos se encuentran en los mismos niveles de oxidación (2⁺, 3⁺) y comparten propiedades similares generando una competencia entre sí, aunque el Co puede promover la absorción de hierro en la mucosa intestinal y acelerar el almacenamiento del hierro en la médula ósea (Cwiertnia et al., 2022).

1.1.1 Importancia del cobalto en la salud humana

El Co es un oligoelemento esencial para las procariotas, animales y seres humanos, constituye un componente clave de la vitamina B₁₂ (cobalamina) (Genchi et al., 2023). Regula el metabolismo de los ácidos grasos y aminoácidos, promueve la síntesis de hemoglobina, aumenta glóbulos rojos y activa el sistema inmunológico para defensa de enfermedades infecciosas (Y. Ma et al., 2022).

La deficiencia de este micronutriente está relacionada con alteraciones en la biosíntesis de compuestos bioactivos provocando deficiencia de ácido fólico, desregulación de la glándula pituitaria y una mayor incidencia de malformaciones congénitas y discapacidades en recién nacidos (Islam et al., 2023). Por el contrario, la exposición excesiva al Co provoca pérdida auditiva neurosensorial, deterioro cognitivo, pérdida de visión y neuropatía periférica (Li et al., 2024).

El contenido de Co en el cuerpo humano es de 1.0 mg (Lan et al., 2024) e ingresa a través de la ingesta de alimentos, por el sistema respiratorio y por la piel. El 85% del Co presente en el cuerpo es en forma de vitamina B₁₂ derivada principalmente de beber o comer alimentos (Farag et al., 2021).

Las principales fuentes de Co son las verduras (brocoli, coliflor, legumbres, entre otros) y cereales (avena y cebada) frescos que presentan cantidades entre 0.2 a 0.6 mg kg⁻¹ de PS, no obstante, puede encontrarse en productos como lácteos, cereales refinados y azúcar en cantidades menores entre 0.01 a 0.03 mg kg⁻¹ de peso seco (PS), también puede consumirse a través del agua, humo de tabaco, pescado y legumbres (Aquilina et al., 2009; Wahlqvist et al., 2020).

México no ha establecido una ingesta diaria recomendada, sin embargo, Reino Unido considera segura una suplementación de hasta 1400 µg/día, mientras que la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria sugiere un límite de 600 µg/día (Tvermoes et al., 2014).

1.2 Métodos para incrementar la ingesta de elementos esenciales

La fertilización elemental es el método más común para suministrar directamente los nutrientes con el fin de promover su acumulación en partes comestibles, sin embargo, existen factores que evita una acumulación eficiente (Hernández et al., 2024). En cambio,

la fortificación adiciona al menos una vitamina o mineral durante su producción o procesamiento, lo cual permite mejorar la disponibilidad de algunos nutrientes reduciendo las deficiencias de micronutrientes. Este proceso puede generarse a partir de métodos de fortificación convencional es decir directa o sintética y consiste en diluir, emulsionar o espolvorear el mineral o vitamina en las plantas (semilla, foliar, directamente al suelo) o en el procesamiento de los productos alimenticios (J. Han et al., 2025; Kaur et al., 2022).

La aplicación de biofertilizantes contribuye a la activación de procesos metabólicos favoreciendo la acumulación de nutrientes. Estos productos contienen microorganismos promotores del crecimiento vegetal que interactúan de forma simbiótica con las plantas, solubilizando nutrientes, fijando nitrógeno atmosférico, produciendo sideróforos, sintetizando fitohormonas y ácidos orgánicos (Guardiola-Márquez et al., 2023).

Por otra parte, el enfoque transgénico se considera una alternativa para incrementar los micronutrientes en las plantas. A partir del desarrollo de nuevos cultivares con rasgos específicos a través de la transferencia de nuevos genes, sobreexpresión de los genes presentes o bien mediante el bloque de genes, permitiendo la adición de múltiples micronutrientes en poco tiempo a diferencia del mejoramiento convencional (Koç y Karayiğit, 2022).

Otro método eficaz es la biofortificación en la cual se cultivan alimentos para mejorar su valor nutricional mediante el fitomejoramiento o agronómicamente al adicionar fertilizantes minerales (Olson et al., 2021; Schiavon et al., 2020).

En la actualidad la nanotecnología permite el desarrollo de alimentos enriquecidos que incorporan nutrientes esenciales sin alterar las propiedades organolépticas del producto como el sabor o la textura. Además, se puede mejorar la calidad nutricional de los cultivos mediante nanofertilizantes lo cual contribuye no solo a una agricultura más sostenible, sino también a una mejor nutrición humana desde la base de la cadena alimentaria (Nongbet et al., 2022).

1.2.1 Biofortificación de los Cultivos Agrícolas

El término biofortificación fue creado para describir una estrategia de mejoramiento vegetal enfocada en aumentar la concentración de micronutrientes en los cultivos básicos.

En el año 2003, se lanzó el programa HarvestPlus, gestionado por los centros del Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), para implementar esta estrategia (Bouis et al., 2024). La creciente amenaza a la seguridad nutricional provocada por el aumento de la población destaca la importancia de aplicar estrategias viables y económicas en el sistema alimentario global. La biofortificación se ha planteado como una estrategia prometedora para combatir la desnutrición, debido a que facilita la incorporación de nutrientes específicos en la parte comestible de un cultivo, permitiendo su consumo tanto por humanos como por animales (Dhaliwal et al., 2022).

Los micronutrientes, como minerales y vitaminas, son los principales objetivos nutricionales de las estrategias de biofortificación. Sin embargo, también se busca mejorar la composición de ácidos grasos, así como aumentar los niveles de aminoácidos esenciales y antioxidantes (Medina-Lozano y Díaz, 2022).

El principal desafío que enfrenta la biofortificación es la acumulación de nutrientes en el tejido comestible de una forma no tóxica (Jaiswal et al., 2022; Shahzad et al., 2021), para ello se ha propuesto hacer uso de la nanotecnología (Naik et al., 2024).

Existen diversas técnicas de biofortificación, pero en general se pueden dividir en biofortificación agro técnica, mejoramiento vegetal convencional y mejoramiento basados en métodos de ingeniería genética con el fin de suministrar adecuadamente los micronutrientes y lograr una bioacumulación óptima en los tejidos (Bhardwaj et al., 2022; Białow et al., 2024).

La biofortificación realizada con una técnica convencional consiste en aplicar fertilizantes minerales mediante la aspersión al suelo o de manera foliar o bien usar microorganismos para mejorar la absorción de nutrientes. También se puede hacer un cruce convencional de plantas para obtener la combinación genética que favorezca una biodisponibilidad equilibrada y la absorción de nutrientes (Naik et al., 2024).

La técnica genética mejora el contenido de micronutrientes esenciales como vitaminas y minerales en cultivos básicos. Esto se logra a partir de la identificación de genes responsables de los rasgos nutricionales deseados y su incorporación a las variedades de cultivos mediante técnicas de ingeniería genética o mejoramiento tradicional,

manteniendo sus propiedades nutricionales durante el cultivo y la cosecha (Mmbando y Missanga, 2024).

En el año 2016 la Organización Mundial de la Salud (OMS) reviso la evidencia sobre el impacto nutricional de la biofortificación, sin embargo, falta pruebas convincentes de los beneficios a la salud (van Ginkel y Cherfas, 2023).

1.2.2 Impacto del cobalto en las plantas

El Co favorece la absorción de otros macro y micronutrientes, sin embargo, en exceso puede alterar diversos procesos fisiológicos, bioquímicos y metabólicos dentro de la planta. En las legumbres favorece la absorción de nitrógeno, produce metabolitos secundarios como la betaina y aumenta los exudados de las raíces (Elshamly et al., 2024; Qiao et al., 2021; Sarraf et al., 2023).

Entra a la planta en forma de Co^{2+} a través del canal del hierro (Fe), su disponibilidad aumenta cuando hay presencia de óxidos hidratados de hierro (Fe) y manganeso (Mn) y su absorción es mayor cuando el suelo presenta un pH ácido (Wa Lwalaba et al., 2017). El Co al carecer de transportadores específicos utiliza los transportadores reguladores de hierro (IRRT) y las ferroportinas (FPN1 y FNP2) para trasladarse de la raíz a los brotes (Abreu-Junior et al., 2023; Morrissey et al., 2009). Una reducción de Fe en la planta puede provocar desequilibrio en varios procesos, por ejemplo, restringe la actividad de la enzima Catalasa (CAT) esto podría estar relacionada con el desplazamiento del Fe en los sitios activos, tomando su lugar este metal en la porfirina de la enzima (Chatterjee y Chatterjee, 2000).

El Co mitiga el estrés abiótico por salinidad, sequia, exceso de cadmio y neutraliza especies reactivas. Para ello, aumenta el ácido abscísico y hormonas como giberelina, auxinas y etileno para reducir la pérdida de agua, mejorando el uso del agua dentro de la planta, además, disminuye tasas de fotosíntesis y respiración, como consecuencia aumenta el contenido de agua cuando las plantas se encuentran en condiciones de salinidad (Brengei et al., 2022; Gad N. y Abdelhamid, 2019; Hareem et al., 2024; Inayat et al., 2024).

Una concentración elevada puede ser tóxica y promover la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), radicales de hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), peróxido de hidrogeno (H_2O_2),

elevar el contenido de MDA (malondialdehído), prolina y alteraciones de las enzimas antioxidantes. También genera deficiencias en el fotosistema II e interrumpe la cadena de electrones (Lwalaba et al., 2020). Las plantas han desarrollado mecanismos de defensa como protección al estrés oxidativo permitiendo que la planta continúe con su crecimiento, sin embargo, este mecanismo no es suficiente cuando hay una exposición a concentraciones mayores (Salam et al., 2024).

H.-Y. Han et al. (2008) encontró que el Co influye en la eficiencia de la peroxidasa al unirse a ciertos aminoácidos cercanos a la zona de acción de la enzima, siendo un proceso delicado dependiente de muchos factores como la concentración de Co y el entorno en que se encuentre el organismo (Brenzi et al., 2024).

1.3 Importancia del consumo del tomate en la salud humana

El género del tomate incluye 13 especies y miles de variedades que se distribuyen a nivel global, pueden presentar una variedad de colores y tamaños; aunque los más comunes son los tomates rojos, también existen en tonalidades amarillas, verdes e incluso moradas (Włodarczyk et al., 2022). Es un fruto carnoso de tipo baya, compuesto en su mayoría por agua (>90%), contiene una cantidad mínima de proteínas y grasas, alrededor de un 3% de carbohidratos, como glucosa y fructosa (Campbell et al., 2022). El tomate maduro contiene entre 3% y 8.88% de materia seca, compuesta principalmente por azúcares como fructosa (25%) y glucosa (22%), junto con ácidos orgánicos (cítrico 9% y málico 4%), minerales (8%), proteínas (8%), pectina (7%), celulosa (6%), hemicelulosa (4%), lípidos (2%). Además, contiene alrededor de un 4% de otros compuestos como aminoácidos, vitaminas, pigmentos y compuestos fenólicos. La proporción de estos varía según el genotipo del tomate, las condiciones de cultivo y el grado de madurez del fruto (Alsina et al., 2022).

Es la segunda verdura más consumida en México, representa el 19% del consumo total siendo ingrediente principal en la dieta humana, por su consumo en fresco o en productos procesados (Mejía-Ramírez et al., 2023; Raza et al., 2022). Al ser rico en aminoácidos esenciales, antioxidantes, carotenoides y compuestos polifenólicos, contribuye a una menor incidencia de cáncer y enfermedades crónicas como gastritis, diabetes, obesidad y enfermedades cardiovasculares (Choe U. et al., 2021; Faraone et al., 2021). Los

carotenoides y tocoferoles actúan como antioxidantes en el cuerpo humano y algunos fitoesteroles, como el β -sitosterol relacionados con la disminución del colesterol (Meza et al., 2021).

En los tomates rojos maduros, el licopeno destaca por ser el carotenoide predominante representando entre el 59 al 91% del total, es responsable del color rojo característico (Piccolo et al., 2024). El cuerpo humano absorbe entre el 23 y 24% del licopeno ingerido acumulándose en la sangre, hígado y otros tejidos (Campbell et al., 2022). Además, la deficiencia de licopeno en el organismo se asocia con un mayor riesgo de desarrollar cáncer debido a la disminución de su efecto antioxidante protector (Salehi et al., 2019).

1.3.1 Biofortificación en el cultivo de tomate

El tomate es una de las frutas más consumidas a nivel mundial, en la actualidad las investigaciones realizadas se han enfocado en su potencial para prevenir diversas enfermedades gracias a sus propiedades y compuestos bioactivos que lo componen (Karnwal, 2023). Esta planta ha sido considerada como una especie modelo para diferentes estudios científicos debido a su importancia económica, su genoma completamente secuenciado y su facilidad para la manipulación genética. Además, presenta un ciclo de vida corto, una alta sensibilidad a factores ambientales y destaca por ser una excelente fuente de vitaminas, minerales, fibra dietética y compuestos antioxidantes. Estas características han despertado un notable interés para investigar sus rasgos agronómicos y desarrollar mejoras en la calidad del fruto (Liu et al., 2022).

Los programas de biofortificación se implementan con mayor frecuencia para mejorar el contenido de oligoelementos y macronutrientes en los cultivos que benefician a la salud humana (Pournavab Rahim et al., 2020). La calidad nutricional del tomate depende de diferentes genes que controlan procesos metabólicos regulados por señales fisiológicas, ambientales y del desarrollo. Por ello, los investigadores se concentran en identificar las partes del ADN relacionadas con la acumulación de nutrientes para cruzar plantas de forma selectiva y obtener tomates más nutritivos a partir de una biofortificación genética (Raiola et al., 2015).

La biofortificación mineral es una forma efectiva para mejorar la dieta humana, el tomate destaca como candidato para ser biofortificado con selenio con fines de suplementación dietética, en el mercado europeo ya están disponibles vegetales como papa, zanahoria, ajo y cebolla enriquecidos con selenio (Shiriaev et al., 2022). Además, se han realizado estudios donde confirma que pueden ser enriquecidos con micronutrientes esenciales como hierro y yodo que desempeñan papeles vitales en la nutrición y la salud humana. Algunos autores han coincidido que una concentración entre 0.5 y 1 mM de yoduro de potasio (KI) o yodato de potasio (KIO_3) es efectiva para obtener una biofortificación adecuada de yodo (Buturi et al., 2022; Ikram et al., 2024; Kiferle et al., 2013).

1.4 Nanotecnología y nanomateriales

En el año 1991 se establece el primer programa dedicado a las NPs por la fundación National Science Foundation (NSF), entre 1997 y 1998 se crea un programa interdisciplinario denominado “Partnerships in Nanotechnology”. En el año 2000 se crea la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI) de los Estados Unidos con el fin de identificar aplicaciones económicas y novedosas, además generan la descripción del concepto de Nanotecnología siendo la base los aportes realizados en 1999. La NNI define la nanotecnología como la comprensión y el control de la materia a escalas de 1 a 100 nm, donde las propiedades físicas, químicas y biológicas difieren significativamente de las de la materia a mayor escala. La nanotecnología implica la posibilidad de diseñar, caracterizar, producir y aplicar estructuras, dispositivos y sistemas mediante el control de forma y tamaño a escala nanométrica (Boholm y Larsson, 2019; Roco, 2011; Santos Aracena et al., 2024).

La nanotecnología ha sido utilizada en diversas áreas de la medicina, farmacéutica e industrial, debido a los resultados efectivos también se ha aplicado en el área agrícola para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y productividad de los cultivos. Sin embargo, la toxicidad de las NPs actualmente no se encuentra definida, pero puede ser un problema debido a sus propiedades específicas (Duhan et al., 2017).

El término "nanomateriales (NM)" surgió a finales del siglo XIX, utilizado y producido por civilizaciones antiguas, sin tener conocimiento del tema. Se considera que los materiales nanoestructurados podrían haberse formado a partir de meteoritos surgidos

durante el Big Bang. Desde tiempos prehistóricos los humanos han utilizado los NM, por ejemplo, el humo y hollín contienen NM como fullerenos, grafeno y nanotubos de carbono utilizados para pinturas rupestres (Barhoum et al., 2022).

Los NM presentan al menos una dimensión que varía de 1 a 100 nanómetros (nm), pueden ser materiales orgánicos, inorgánicos o híbridos, debido a su tamaño de partícula poseen una gran área de superficie, son altamente solubles y móviles. Por lo tanto, sus características en cuanto su estructura o rasgos químicos deben seleccionarse adecuadamente para hacer buen uso (Son et al., 2021). Las NPs son aquellas con un diámetro de 1 a 100 nm, de acuerdo con su forma pueden ser 0D, 1D, 2D o 3D, respecto a su tamaño y estructura se clasifican en: orgánicas, inorgánicas, bionanomateriales, cerámicos, óxidos metálicos, metálicos y basados en carbón (Alshammari et al., 2023).

En la agricultura a través de la nanotecnología se han desarrollado productos como nanopesticidas, nanofungicidas y nanofertilizantes los cuales favorecen la tolerancia al estrés biótico y abiótico mejorando la producción (Ahmad et al., 2024).

Los NM utilizados en la agricultura pueden sintetizarse por métodos físicos, químicos y biológicos y se clasifican en orgánicos, metales, óxidos metálicos y nanoestructuras basadas en carbono (Tripathi et al., 2023). Se han demostrado que las NPs impactan positivamente en el desarrollo y crecimiento de las plantas (Sembada y Wuled Lenggoro, 2024).

Un mecanismo potencial que genera una degradación o desnaturalización de proteínas es la entrada de NPs a las células vegetales, las cuales pueden liberar iones metálicos (Djanaguiraman et al., 2024). Las NPs metálicas impactan el proceso de señalización, traducción, transcripción y modificaciones postraduccionales de las proteínas, además modulan las respuestas de las plantas a señales ambientales y activan vías de señalización específicas implicadas en la respuesta al estrés, absorción de nutrientes y señalización hormonal. Asimismo, estimulan la expresión de genes que responden al estrés para activar mecanismo de defensa contra patógenos (Francis et al., 2024).

1.4.1 Biofortificación con Nanomateriales

En la actualidad la biofortificación ha sido más eficiente al utilizar la nanotecnología. Se han utilizado con éxito fertilizantes de recubrimiento a nanoescala, fertilizantes aditivos a nanoescala y fertilizantes a nanoescala o NF (Khan et al., 2021). Encapsular nutrientes con NM favorece la absorción y penetración dentro de la planta, aumenta el rendimiento, mejora la seguridad alimentaria y reduce el impacto ecológico. Esto se debe a que los NM protegen y encapsulan el fertilizante, evitando su volatilización y permitiendo una mejor fijación en el suelo, disminuyendo pérdidas por lixiviación (An et al., 2022; Ehsan et al., 2022).

La nanofertilización puede clasificarse en tres tipos: cebado de semillas, aplicación al suelo y aplicación foliar. El cebado de semillas consiste en el uso de NPs como tratamiento previo para mejorar la germinación, promover el crecimiento inicial y aumentar la resistencia de las plantas (Ding et al., 2023).

Los NF puede pasar a través de los poros celulares y alcanzar la membrana plasmática, para ello el tamaño de las NPs deben ser menor a 8 nm. Al aplicarse vía foliar es absorbido por los poros y transportado por el floema, mientras que al aplicarse vía suelo se transporta mediante la epidermis y endodermis de la raíz hacia el xilema hasta llegar a la parte aérea. El tamaño y el diámetro del NF es un parámetro importante para controlar su absorción, siendo más móviles a diferencia de los fertilizantes convencionales (El-Bialy et al., 2023; Sun et al., 2022; Upadhyay et al., 2023).

Se han realizados estudios aplicando distintas NPs para enriquecer las partes comestibles con nutrientes beneficios para la salud humana, esta acción es denominada nanobiofortificación (El-Ramady et al., 2021). Sorahinobar et al. (2022) aplicaron de forma foliar una concentración de 20 mg L^{-1} de NPs de óxido de zinc en plántulas de frijol mungo, el resultado fue un incremento del contenido de zinc, un aumento del contenido de proteínas y compuestos fenólicos de los brotes. Estos resultados coinciden con los observados al aplicar de forma foliar la misma dosis de NPs de óxido de zinc en plantas de lenteja, lo que también confirma su potencial en procesos de biofortificación (Sorahinobar et al., 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

1.5 Desarrollo del experimento bajo invernadero

Se estableció un cultivo de tomate tipo saladette de crecimiento indeterminado en un invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno, se utilizaron semillas “El Cid F1” (Harris Moran Seed Company, 2023). Las plantas se colocaron en bolsas de polietileno negras de 10 L de capacidad, se usó como sustrato una mezcla de turba (peat moss) y perlita en porción 1:1 respecto a volumen. Durante el desarrollo del cultivo se manejó a un solo tallo. La nutrición se suministró mediante riego dirigido con solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) ajustando los requerimientos en cada etapa vegetativa, en porciones desde 25% hasta alcanzar el 100%, así mismo ajustando el pH con ácido sulfúrico a 6.5 y suministrando el riego de acuerdo con la necesidad de la planta durante su desarrollo.

1.6 Descripción de tratamientos

El estudio se dividió en dos etapas, la primera fue para determinar la concentración óptima y posible toxicidad de las NPs CoO a nivel de plántula, mientras que en la segunda se estableció un cultivo que se desarrolló hasta obtener los frutos de tomate para determinar la acumulación de Co así como el contenido de compuestos bioactivos.

Los tratamientos de la etapa 1 consistieron en la aplicación foliar de NPs CoO en diferentes concentraciones, cada mezcla se sonificó 15 minutos para dispersar las nanopartículas. Los tratamientos aplicados fueron 1) 15.62 mg L^{-1} ($12.10 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), 2) 62.5 mg L^{-1} ($48.43 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), 3) 125 mg L^{-1} ($96.87 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), 4) 250 mg L^{-1} ($193.75 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), 5) 500 mg L^{-1} ($387.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), y 6) un control sin aplicación. En total se realizaron seis aplicaciones en intervalos de 7 días, iniciando a los 7 días después del trasplante para garantizar un suministro constante y que la planta absorba y asimile de manera eficiente las NPs CoO. El volumen total aplicado fue de aproximadamente 54 mL a cada planta.

En la segunda etapa se eligieron los tratamientos con base a los resultados de la primera etapa, siendo los siguientes: 1) 1000 mg L^{-1} ($775 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), 2) 500 mg L^{-1} ($387.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), 3) 250 mg L^{-1} ($193.75 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$), 4) $1019 \text{ mg L}^{-1} \text{ CoSO}_4$ ($387.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ Co}$),

equivalente a la concentración 500 mg L^{-1} de NPs CoO), y 5) un control sin aplicación (T0). De igual manera cada mezcla se sonificó 15 minutos. En total se realizaron siete aplicaciones durante el desarrollo del cultivo en intervalos de dos semanas, iniciando a los 15 días. En total se aplicó un volumen de 72 mL a cada planta.

Se utilizaron NPs de óxido de cobalto (II) (NPs CoO) con morfología esférica, un tamaño inferior a 100 nm y un área superficial de $15 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (SkySpring Nanomaterials, Houston, Tx.). La forma iónica del Co fue sulfato de cobalto heptahidratado ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

1.7 Análisis de Parámetros Agronómicos

Al final de la primera etapa se realizaron mediciones de altura de la planta, diámetro de tallo, número de hojas y se obtuvo la biomasa de seca de parte aérea después de 48 h de secado a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ en una estufa de secado por convección (marca xx). En la segunda etapa se evaluó la altura de la planta, número de hojas y número de racimos, además en etapa de producción se cuantificó el rendimiento de frutos utilizando una balanza digital Adventurer Pro (OHAUS) y al finalizar el ciclo, se obtuvo la biomasa de seca después de 48 h de secado a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ en la misma estufa. Las mediciones de altura se realizaron utilizando un flexómetro y el diámetro de tallo con un vernier digital.

1.8 Muestreo para análisis bioquímicos y calidad de frutos

Para ambas etapas se tomaron muestras de tejido foliar a los 60 días después del trasplante (DDT). La muestra consistió en la recolección de la última hoja joven completamente desarrollada, la cual fue rápidamente colocada en hielo y se almacenada a una temperatura de $-30 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente las muestras fueron liofilizadas y maceradas hasta obtener un polvo fino para realizar los análisis bioquímicos.

En la segunda etapa, adicionalmente a las muestras de hoja, se tomaron muestras de frutos en dos diferentes fechas (80 y 100 DDT), siguiendo el mismo protocolo de recolección y almacenamiento. Cada repetición consistió en seis frutos de tamaño uniforme, sin daño y en estado de madurez roja completa. Las muestras previamente almacenadas a $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ fueron liofilizadas y maceradas hasta obtener un polvo fino el cual se utilizó para analizar los compuestos bioactivos.

De cada muestreo tres frutos fueron analizados inmediatamente, mientras que los restantes se dejaron en reposo a temperatura ambiente (22 ± 1 °C) con el fin de evaluar su calidad siete días después de la recolección.

1.9 Determinación de minerales

Se determinó la concentración de Co y otros minerales (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Na), en hojas de la primera y segunda etapa, y frutos de la segunda etapa, utilizando un espectrofotómetro de emisión de plasma 7400 (ICP, Thermo Jarrel Ash Irish Ventaja). Para esto se realizó una digestión a punto de ebullición con 10 mL de ácido nítrico y 5 mL de peróxido de hidrogeno (30 %), y posteriormente las muestras se aforaron a 50 mL. Los resultados fueron expresados en mg g⁻¹ PS en caso de los macroelementos, y µg g⁻¹ PS para los microelementos.

1.10 Análisis de compuestos bioactivos

Con las muestras obtenidas de la segunda etapa se llevó a cabo la determinación de compuestos bioactivos de acuerdo con los métodos estándar, lo cuales se mencionan a continuación: compuestos fenólicos se determinaron mediante el método del reactivo Folin-Ciocalteu descrito por Yu y Dahlgren (2000), los resultados se expresaron como mg 100 g⁻¹ PS. Para la determinación de flavonoides se utilizó el método de Dowd adaptado por Arvouet-Grand et al. (1994), y los resultados se expresaron como mg 100 g⁻¹ PS. Se utilizó el método de Scott (2001) para determinar el contenido de licopeno (mg 100 g⁻¹ PS). Las antocianinas (mg 100 g⁻¹ PS) monoméricas se determinó mediante el método diferencial de pH descrito por Giusti Monica and Wrolstad Ronald (2001). La actividad antioxidante por ABTS (3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico) se midió por el método espectrofotométrico de Kuskoski et al. (2004) y los resultados se expresaron en µmol g⁻¹ PS.

1.11 Análisis de propiedades fisicoquímicas de frutos

Se realizó la medición del color, diámetro de mesocarpio, solidos solubles totales, potencial de hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (C.E.) y potencial de óxido reducción (ORP). Estas mismas mediciones fueron realizadas en los frutos almacenados ya transcurrido lo siete días, aplicando el mismo protocolo en ambos muestreos.

Se obtuvo el porcentaje de pérdida de peso a partir de la siguiente ecuación:

$$\%PP = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Donde:

%PP: Porcentaje de pérdida de peso

P1: Peso 1 (tomado el día de la recolección)

P2: Peso 2 (Tomado después de 7 días de almacenamiento)

Se calculo el porcentaje de pérdida de firmeza a partir de la siguiente formula:

$$\%PF = \frac{F1 - F2}{F1} * 100$$

%PF: Porcentaje de pérdida de firmeza

P1: Firmeza 1 (tomado el día de la recolección)

P2: Firmeza 2 (Tomado después de 7 días de almacenamiento)

1.12 Análisis estadísticos

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar en ambas etapas. En la primera etapa se consideraron 5 repeticiones, con tres plantas por unidad experimental. En la segunda etapa se consideraron 5 repeticiones con 5 plantas por unidad experimental. Se implemento la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para verificar la normalidad de los datos y una prueba de Bartlett para la homogeneidad de la varianza. Se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA), y en los casos donde hubo significancia ($p < 0.05$) se realizó una prueba de comparación de medias de diferencia mínima significativa de Fisher. Cuando los datos no cumplieron los criterios de normalidad y homogeneidad de varianzas se aplicó la prueba no paramétrica de Friedman. Todos los análisis se realizaron en el software Infostat (v2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.13 Parámetros agronómicos de las plantas de tomate

Los resultados en la primera etapa no revelaron diferencias significativas en las variables agronómicas en comparación al control. Estos resultados demuestran que no hubo efectos de toxicidad en el desarrollo de la planta al realizar las aplicaciones con diferentes concentraciones de NPs CoO respecto al control (Figura 1).

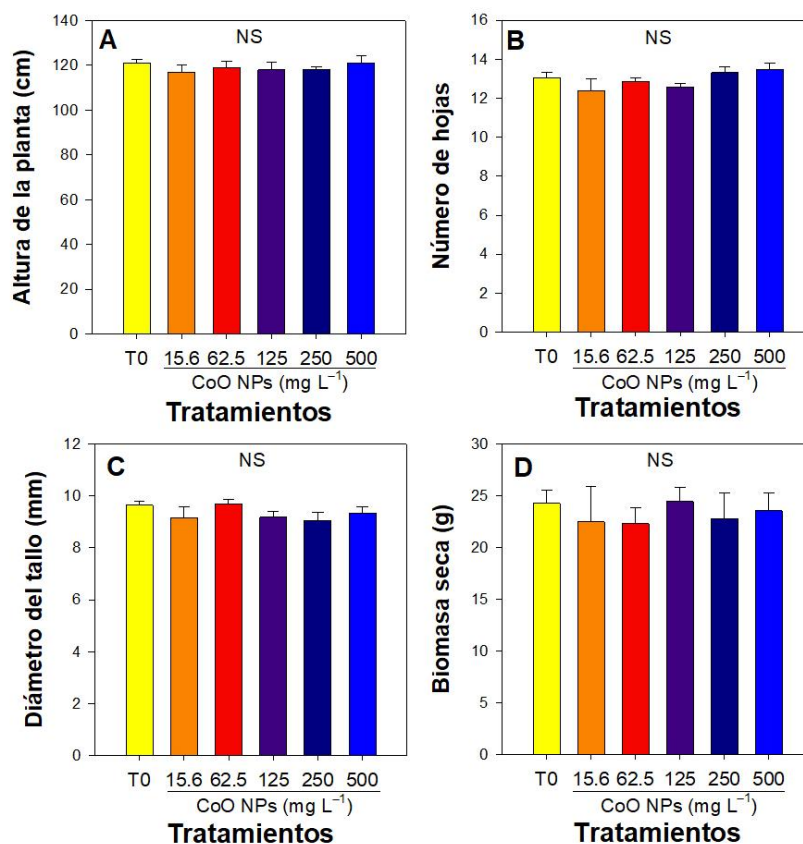


Figura 1. Parámetros agronómicos de plantas de tomate tratadas con diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de cobalto (NPs CoO). T0: control; 15.60, 62.50, 125, 250, y 500 equivale a la concentración de NPs CoO expresada en mg L⁻¹. NS: Sin diferencias significativas entre tratamientos. N = 5 ± error estándar.

La segunda etapa no mostró diferencias significativas en las variables agronómicas en comparación al control. Estos resultados demuestran que no hubo efectos negativos en el

desarrollo de la planta al aplicar los tratamientos con NPs CoO y CoSO₄ de forma foliar (Figura 2).

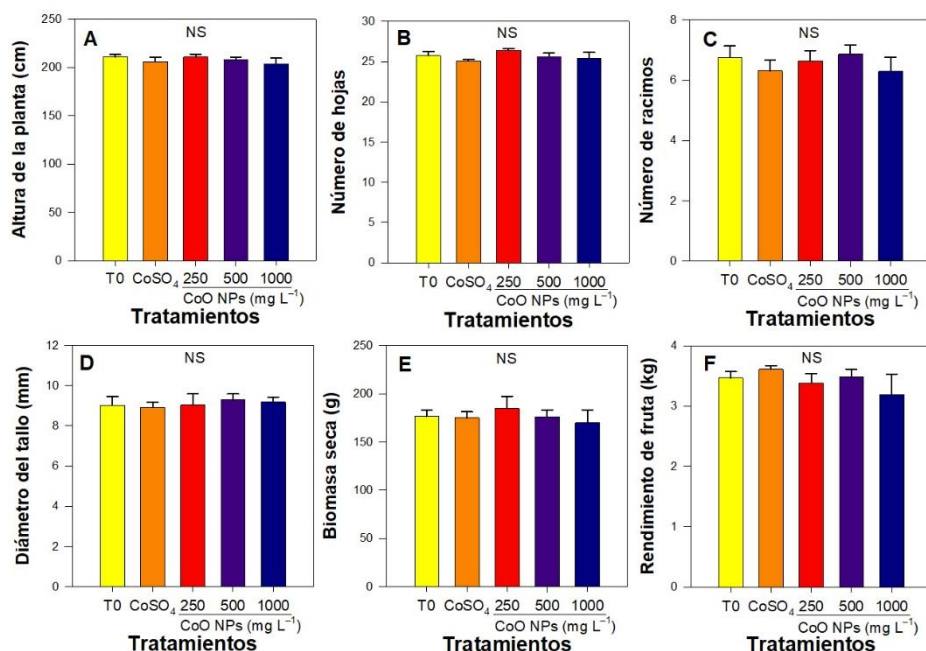


Figura 2. Parámetros agronómicos de plantas de tomate tratadas con diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de cobalto (NPs CoO). T0: control, 250, 500, 1000 equivale a la concentración de NPs CoO expresado en mg L⁻¹, y 1019 equivale a la concentración de sulfato de cobalto (CoSO₄) expresado en mg L⁻¹. NS: Sin diferencias significativas entre tratamientos. N = 5 ± error estándar.

1.14 Contenido de minerales

En la primera etapa se observaron efectos de concentración de cobalto (Co) en las hojas al aplicar NPs CoO. A medida que aumenta la concentración del tratamiento la acumulación de Co en las hojas es mayor, incrementando aproximadamente 19 veces con relación al control (Figura 3A). Las hojas de la segunda etapa tuvieron mayor acumulación de Co cuando se aplicó CoSO₄, siendo 16.20 veces más alto al control. Los tratamientos con NPs CoO (250 mg L⁻¹, 500 mg L⁻¹, 1000 mg L⁻¹) también aumentaron significativamente el contenido de Co, aunque en valores menores en un rango de 8-6 veces más alto al control (Figura 3B). El contenido de Co en los frutos del quinto racimo no se detectó, de igual forma el control y el tratamiento 250 mg L⁻¹ de Co NPs, sin

embargo, tuvieron mayor acumulación de Co cuando se aplicó CoSO_4 , siendo 1.2 veces mayor a los tratamientos con NPs CoO (500 mg L^{-1} , 1000 mg L^{-1}) (Figura 3C).

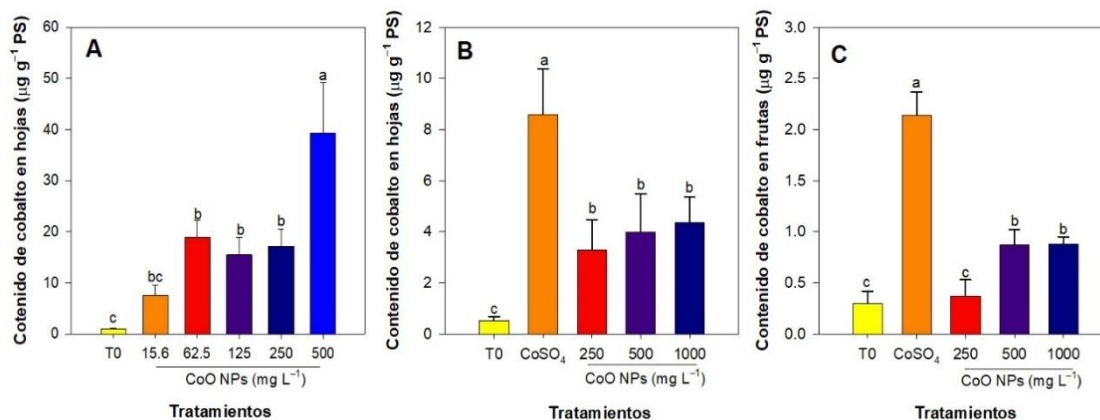


Figura 3. Contenido de Co en hojas de tomate de la primera etapa (A) y segunda etapa (B) y contenido de Co en frutos de tomate de la segunda etapa (C). Tratadas vía foliar con diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de cobalto (NPs CoO). T0: control, 15.62, 62.5, 125, 250, 500, 1000 equivale a la concentración de NPs CoO expresado en mg L^{-1} , y 1019 equivale a la concentración de sulfato de cobalto (CoSO_4) expresado en mg L^{-1} . Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Friedman ($p < 0.05$).

En ambas etapas las hojas de tomate presentaron diferencias significativas en la acumulación de azufre (S). En la primera etapa el control registró 4.11, después la concentración 62.50 mg L^{-1} con 4.14. En la segunda etapa el control presentó 6.42, después el tratamiento de CoSO_4 con 6.24. En ambas etapas se mostró una tendencia a disminuir ligeramente la concentración de S al aplicar los tratamientos con mayor concentración de NPs CoO (250 mg L^{-1} , 500 mg L^{-1} y 1000 mg L^{-1}).

Los tratamientos aplicados en la primera etapa tuvieron efectos en la acumulación de molibdeno (Mo) y sodio (Na). En el caso del Mo el control supero a los tratamientos, la aplicación de 15.62 mg L^{-1} de NPs CoO disminuyó 16.82% la acumulación de Mo y 15.64% la acumulación de Na en relación con el control. Mientras que la aplicación de 62.50 mg L^{-1} de NPs CoO aumentó un 56.86% la acumulación de Mo y 14.07% la

acumulación de Na en comparación al control. En la segunda etapa el tratamiento con CoSO_4 incrementó 15.73% la acumulación de Zn a diferencia del control (Tabla 1).

Tabla 1. Concentración de macro (mg g^{-1} PS) y micro ($\mu\text{g g}^{-1}$ PS) nutrientes en hojas de tomate

Etapa	Tratamientos	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	B	Zn	Cu	Mo	Na
		----- mg g^{-1} PS -----					----- $\mu\text{g g}^{-1}$ PS -----						
1era Etapa	T0	6.76	29.56	16.28	4.78	4.11 ^a	126.32	67.83	40.77	25.01	7.98	9.39 ^c	545.05 ^{ab}
	15.62 mg L ⁻¹	5.68	25.18	14.58	4.38	3.45 ^{bc}	106.72	53.43	44.27	22.99	6.51	7.81 ^d	459.79 ^b
	62.50 mg L ⁻¹	6.75	26.19	15.75	4.82	4.14 ^a	108.41	61.82	32.98	27.21	7.03	14.73 ^a	621.79 ^a
	125 mg L ⁻¹	6.60	26.10	16.73	4.79	3.89 ^{ab}	115.57	57.42	34.55	24.69	6.87	11.49 ^{ab}	637.94 ^a
	250 mg L ⁻¹	6.26	25.40	14.96	4.58	3.52 ^{bc}	122.36	54.29	37.58	25.59	7.11	11.43 ^{bc}	631.32 ^a
	500 mg L ⁻¹	5.99	24.85	14.59	4.64	3.26 ^c	112.39	54.79	40.69	23.49	6.69	12.22 ^{ab}	565.32 ^a
	p-valor	0.2344	0.0849	0.4507	0.6576	0.0097	0.3597	0.0618	0.0511	*0.3739	0.4839	*0.0003	0.0134
C.V. (%)	12.45	8.92	13.04	9.87	10.61	13.02	12.62	14.90	13.35	15.55	19.60	13.21	
2da Etapa	T0	6.82	23.51	16.09	3.89	6.42 ^a	133.26	86.29	27.06	31.08 ^b	8.42	9.08	451.38
	CoSO ₄	7.13	21.83	15.35	3.65	6.24 ^{ab}	140.54	89.71	27.83	35.97 ^a	10.12	9.04	510.49

250 mg L ⁻¹	6.37	22.66	14.94	3.80	6.01 ^{abc}	118.44	90.96	32.64	28.47 ^b	7.83	8.16	425.70
500 mg L ⁻¹	7.43	24.73	17.18	4.04	5.21 ^{bc}	131.63	97.73	34.65	31.62 ^b	8.68	9.55	483.84
1000 mg L ⁻¹	7.39	23.12	15.76	3.88	5.00 ^c	125.45	92.22	35.34	31.55 ^b	8.49	8.79	436.38
p-valor	*0.0532	*0.1755	0.0759	0.3310	*0.0437	0.7788	*0.6649	0.1339	0.0172	0.1254	*0.7049	*0.1890
C.V. (%)	7.35	5.09	7.46	7.40	10.50	21.70	11.32	19.18	9.33	15.01	17.36	12.49

P: Fosforo; K: Potasio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; S: Azufre; Fe: Hierro; Mn: Manganeseo; B: Boro; Zn: Zinc; Cu: Cobre; Mo: Molibdeno; Na: Sodio; C.V.: Coeficiente de variación; $p \leq 0.05$: Resultado estadísticamente significativo. N=5. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). * Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Friedman ($p < 0.05$).

En los frutos de tomate los tratamientos influyeron en la acumulación de S, el control y el tratamiento con CoSO_4 tuvieron valores más altos en ambas cosechas, en el caso de los frutos cosechados 80 DDT el tratamiento 500 mg L^{-1} de NPs CoO fue 22.44% menor respecto al control, mientras que en los frutos cosechados 100 DDT el tratamiento de 1000 mg L^{-1} con NPs CoO fue 23.89 % menor al control. Por otro lado, los frutos cosechados 100 DDT también presentaron diferencias significativas en la concentración de P (fosforo), Mg (magnesio), azufre (S) y boro (B). El tratamiento 500 mg L^{-1} de NPs CoO aumentó 15.20% la acumulación de fosforo, 16.09% la acumulación de Mg y 281.71% la acumulación de B con relación al control, respecto al S, el control presento mayor concentración con 1.59 y después el tratamiento 500 mg L^{-1} de NPs CoO con 1.58. No se observaron diferencias significativas en otros macro y micronutrientes (Tabla 2).

Tabla 2. Concentración de macro (mg g^{-1} PS) y micro ($\mu\text{g g}^{-1}$ PS) nutrientes en frutos de tomate

Cosecha	Tratamientos	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	B	Zn	Cu	Mo	Na
		----- mg g^{-1} PS -----					----- $\mu\text{g g}^{-1}$ PS -----						
80 DDT	T0	5.15	36.99	2.42	1.55	2.54 ^a	92.26	15.99	-	25.57	5.04	4.03	316.97
	CoSO ₄	5.02	39.52	2.29	1.56	2.40 ^a	71.01	14.95	-	24.02	4.84	3.04	255.31
	250 mg L^{-1}	5.45	39.45	2.59	1.72	2.39 ^a	65.17	18.29	-	26.99	5.22	3.03	304.86
	500 mg L^{-1}	5.11	38.57	2.62	1.58	1.97 ^b	62.23	15.92	-	21.79	4.62	3.08	230.81
	1000 mg L^{-1}	5.23	37.37	2.32	1.59	2.01 ^b	96.76	15.82	-	23.28	5.09	3.73	299.14
	p-valor	0.7378	*0.3894	0.6398	*0.1186	0.0063	0.0857	0.3432	-	0.1210	0.6146	0.3733	0.2052
C.V. (%)		9.84	8.99	17.07	7.65	10.91	29.22	15.59	-	12.63	12.82	28.93	22.51
100 DDT	T0	3.88 ^d	25.91	1.73	0.87 ^{cd}	1.59 ^a	37.62	11.41	2.57 ^b	16.32	3.27	2.06	227.91
	CoSO ₄	4.06 ^{bcd}	25.92	1.63	0.86 ^d	1.58 ^a	16.58	12.01	7.35 ^a	15.46	3.20	2.40	215.39
	250 mg L^{-1}	3.98 ^{cd}	25.52	1.71	0.90 ^d	1.53 ^a	43.18	13.57	8.61 ^a	16.25	3.48	2.29	243.82
	500 mg L^{-1}	4.47 ^a	28.63	1.83	1.01 ^a	1.58 ^a	39.45	13.13	9.81 ^a	17.33	3.38	1.01	260.05

1000 mg L ⁻¹	3.66 ^e	23.92	1.70	0.85 ^{bcd}	1.21 ^b	27.06	11.17	8.82 ^a	13.90	2.88	1.99	218.43
p-valor	*0.0007	*0.1092	0.8336	*0.0207	0.0020	0.1504	*0.6766	0.0012	0.2316	0.2993	0.7556	*0.3457
C.V. (%)	10.34	8.95	15.48	9.94	9.30	52.97	14.77	31.01	14.41	13.61	92.14	13.14

DDT: Días después del trasplante; P: Fosforo; K: Potasio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; S: Azufre; Fe: Hierro; Mn: Manganeso; B: Boro; Zn: Zinc; Cu: Cobre; Mo: Molibdeno; Na: Sodio; C.V.: Coeficiente de variación; $p \leq 0.05$: Resultado estadísticamente significativo. N=5. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). * Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Friedman ($p < 0.05$)

1.15 Compuestos bioactivos

De acuerdo con los resultados obtenidos los tratamientos causaron efectos significativos en la producción de licopeno, fenoles, flavonoides, vitamina C, antocianinas y capacidad antioxidante lipofílica, sin embargo, no se mostró diferencias significativas en la capacidad antioxidante hidrofílica (Figura 4 y 5). Los tratamientos con NPs favorecieron en la concentración de licopeno en los frutos cosechados 80 DDT almacenados a temperatura ambiente por 7 días, la concentración 250 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹ tuvieron valores superiores (213.32 y 193.17 mg 100 g⁻¹ PS respectivamente) en relación con el control. Los frutos cosechados a los 100 DDT al aplicar Co SO₄ favoreció 11.48% la producción de licopeno en cuanto al control (Figura 4A). El tratamiento 1000 mg L⁻¹ de NPs CoO promovió 13.28% más la producción de fenoles en frutos cosechados 80 DDT con 7 días de almacenamiento (Figura 4C). Los frutos cosechados 100 DDT sin y con almacenamiento registraron diferencias significativas en la concentración de flavonoides, el tratamiento 500 mg L⁻¹ incrementó en 4.83% la producción de flavonoides en frutos sin almacenamiento y 11.11% el tratamiento 250 mg L⁻¹ en relación con el control en frutos con almacenamiento (Figura 4B). Al aplicar CoSO₄ influye en la producción de antocianinas en frutos cosechados 80 DDT superando 25.95% al control, por otro lado, la concentración 1000 mg L⁻¹ es efectiva en la producción de antocianinas en frutos cosechados a 100 DDT presentando el control el valor más bajo (2.89 mg 100 g⁻¹ PS) (Figura 4D). El tratamiento 250 mg L⁻¹ con CoO NPs aumento 5.50% la producción de vitamina C en relación con el control en los frutos cosechados 100 DDT (Figura 4E). Además, el tratamiento con CoSO₄ presento el valor superior (17.66 μmol g⁻¹ PS) respecto al control en la capacidad antioxidante lipofílica los frutos cosechados a los 80 DDT y el tratamiento 250 mg L⁻¹ con NPs CoO incremento 7.20% la capacidad antioxidante lipofílica en comparación con el control (Figura 5). No se observaron diferencias significativas en la capacidad antioxidante hidrofílica.

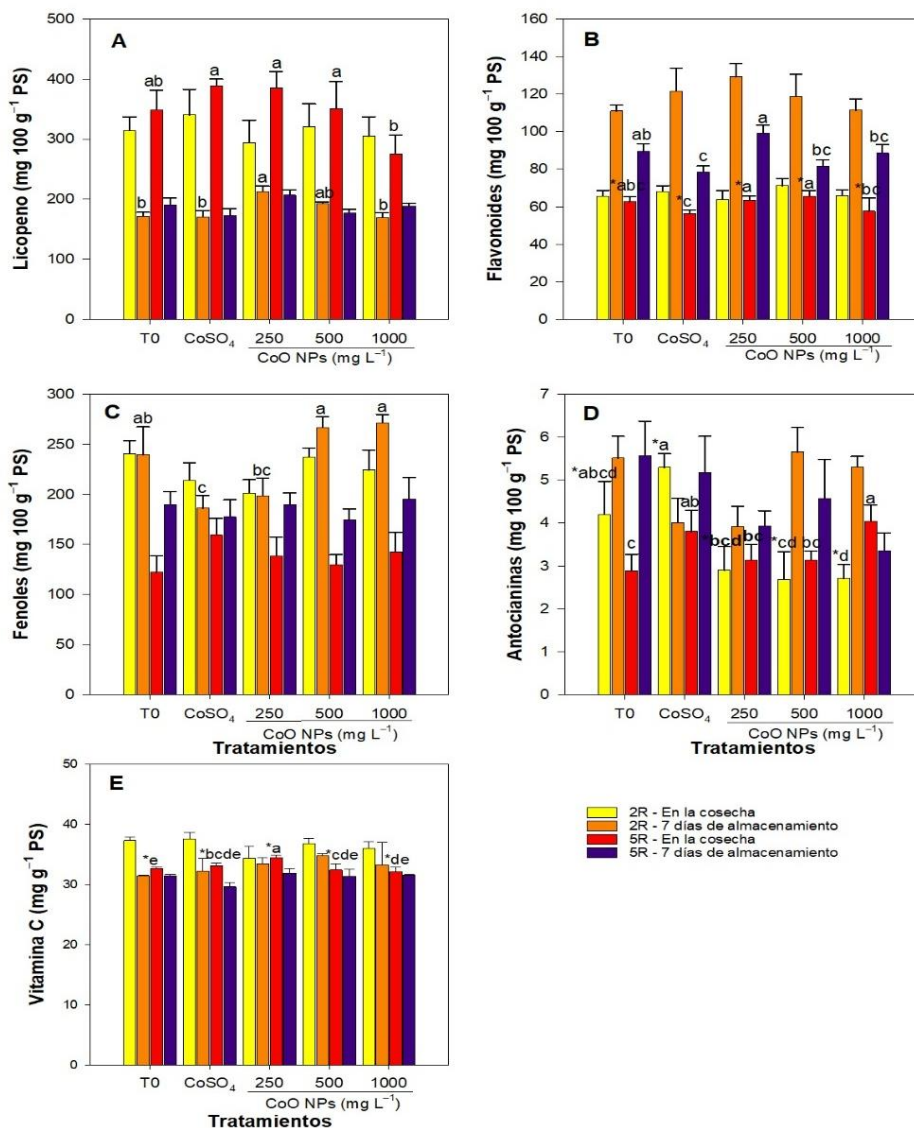


Figura 4. Contenido de compuestos antioxidantes en frutos de tomate recolectados a los 80 DDT y 100 DDT de plantas tratadas vía foliar con diferentes concentraciones de NPs CoO. T0: control, 250, 500, 1000 equivale a la concentración de NPs CoO expresado en mg L^{-1} , y 1019 equivale a la concentración de sulfato de cobalto (CoSO_4) expresado en mg L^{-1} $N = 5 \pm$ error estándar. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). * Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Friedman ($p < 0.05$). Barras sin letras indican que no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

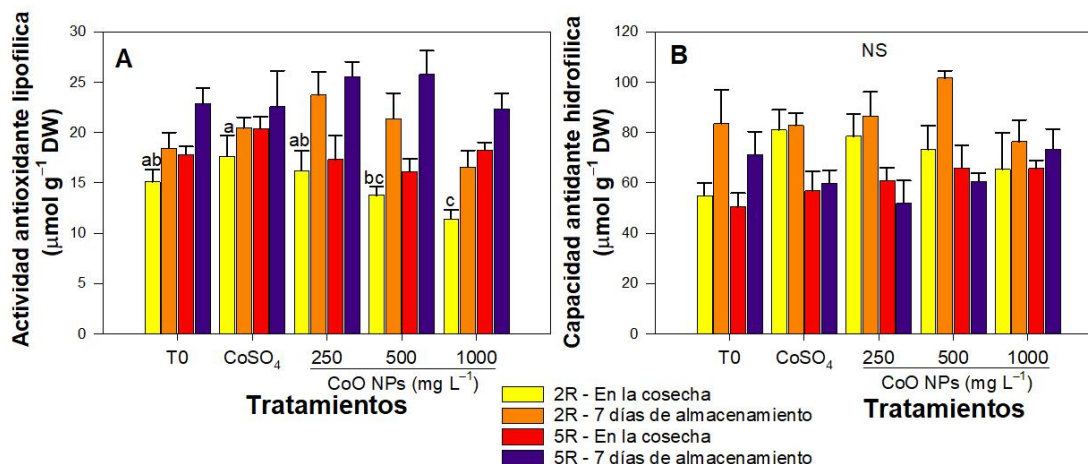


Figura 5. Contenido de compuestos antioxidantes (ABTS) en frutos de tomate recolectados a los 80 DDT y 100 DDT de plantas tratadas vía foliar con diferentes concentraciones de NPs CoO. T0: control, 250, 500, 1000 equivale a la concentración de NPs CoO expresado en mg L⁻¹, y 1019 equivale a la concentración de sulfato de cobalto (CoSO₄) expresado en mg L⁻¹. NS: Sin diferencias significativas entre tratamientos. N = 5 ± error estándar. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (p<0.05).

1.16 Propiedades fisicoquímicas de los frutos del tomate

Los frutos cosechados 80 DDT presentaron diferencias significativas en el pH después de 7 días de almacenamientos a temperatura ambiente (22±1 °C). El pH incremento en la mayoría de los tratamientos es decir redujeron la acidez. El control y el tratamiento con CoSO₄ al momento de la cosecha presentaron los valores menores (4.38 y 4.41 respectivamente) y después de 7 días de almacenamiento aumentaron el pH (4.84 y 4.66 respectivamente). Además se observó que el almacenamiento influyo en la capacidad de óxido reducción de los frutos, el control y el tratamiento con CoSO₄ presentaron valores menores en comparación a los tratamientos con NPs CoO (250, 500 y 1000 mg L⁻¹) pero después de 7 días de almacenamiento hubo un incremento en ORP, sin embargo los tratamientos con NPs (250, 500 y 1000 mg L⁻¹) disminuyeron, presentando una tendencia

a reducir lo que favorece su conservación, por otro lado los demás parámetros de calidad no presentaron diferencias significativas (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros de calidad de frutos de tomate cosechados a los 80 días después del trasplante (DDT) y almacenados a temperatura ambiente (22 ± 1 °C).

Almacenamiento (días)	Tratamientos	%PP	L	a	b	%PF	DM (mm)	SST	pH	C.E. (dS m^{-1})	ORP (mV)
0	T0	-	36.36	23.05	28.89	-	7.95	4.93	4.38 ^d	3.51	67.33 ^c
	CoSO ₄	-	36.60	23.72	29.35	-	8.00	4.81	4.41 ^{cd}	3.31	68.53 ^c
	250 mg L ⁻¹	-	36.93	23.05	28.96	-	7.93	4.41	4.52 ^b	3.26	72.67 ^{bc}
	500 mg L ⁻¹	-	38.32	24.17	29.01	-	8.34	4.61	4.64 ^a	3.17	88.20 ^a
	1000 mg L ⁻¹	-	39.05	22.05	29.16	-	8.29	4.53	4.51 ^{bc}	3.51	83.33 ^{ab}
	p-valor	-	0.4188	0.4105	0.9996	-	0.6095	0.0680	0.0004	0.9490	0.0057
C.V. (%)	-	6.86	7.56	11.94	-	6.56	6.11	1.67	24.22	11.67	
7	T0	11.23	35.65	24.33	28.66	87.11	6.69	4.71	4.84 ^a	2.64	96.33 ^a
	Co SO ₄	13.12	35.52	25.31	28.49	78.20	6.47	4.45	4.66 ^{ab}	2.23	90.60 ^a
	250 mg L ⁻¹	11.98	36.21	24.21	27.14	74.24	6.09	4.63	4.57 ^b	3.07	58.73 ^{cd}

500 mg L ⁻¹	14.88	35.56	24.98	28.96	77.73	6.33	4.40	4.50 ^{cd}	2.99	62.07 ^{bc}
1000 mg L ⁻¹	12.57	35.58	24.21	27.89	69.78	7.03	4.71	4.48 ^c	3.22	50.07 ^d
p-valor	*0.4362	*0.9683	0.4391	0.4694	*0.8668	0.5601	0.2278	*0.0004	0.0903	*0.0001
C.V. (%)	35.52	2.92	4.62	5.93	26.28	14.03	5.72	1.89	20.25	22.37

%PP: Porcentaje de pérdida de peso; L: Luminosidad; a: Eje rojo-verde; b: Eje amarillo-azul; %PF: Porcentaje de pérdida de firmeza; DM: Diámetro de Mesocarpio; SST: Sólidos Solubles Totales; pH: Potencial de Hidrógeno; C.E.: Conductividad Eléctrica; ORP: Potencial de óxido reducción; C.V.: Coeficiente de variación; $p \leq 0.05$: Resultado estadísticamente significativo. N=5. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). * Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Friedman ($p < 0.05$).

Así mismo los frutos cosechados 100 DDT mostraron diferencias significativas en el pH tanto al momento de la cosecha como después del almacenamiento. El tratamiento 1000 mg L^{-1} presento el pH más alto (4.79), mientras que el control y el tratamiento con CoSO_4 registraron valores más bajos, pasando 7 días de almacenamiento todos los tratamientos incrementaron su pH indicando una reducción en acidez de los frutos. Por otro lado, los tratamientos influyeron en la oxidación reducción de los frutos al momento de la cosecha, los tratamientos con NPs CoO (250, 500 y 1000 mg L^{-1}) mostraron valores superiores, provocando una tendencia a oxidar influyendo negativamente a la conservación de los frutos. La aplicación de 250 mg L^{-1} de NPs CoO incremento 18.09% la conductividad eléctrica en relación con el control (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros de calidad de frutos de tomate colectados a los 100 días después del trasplante (DDT) y almacenados a temperatura ambiente (22 ± 1 °C).

Almacenamiento (días)	Tratamientos	%PP	L	a	b	%PF	SST	pH	C.E. (dS m ⁻¹)	ORP (mV)
0	T0	-	41.30	21.47	24.57	-	4.72	4.42 ^e	3.36	42.53 ^c
	Co SO ₄	-	43.38	20.09	22.83	-	4.63	4.45 ^{cde}	3.44	48.93 ^{bc}
	250 mg L ⁻¹	-	41.34	20.46	22.80	-	4.73	4.45 ^{de}	3.51	46.87 ^{bc}
	500 mg L ⁻¹	-	41.93	20.14	22.84	-	4.82	4.50 ^{bcd}	3.62	52.60 ^b
	1000 mg L ⁻¹	-	43.01	19.96	23.00	-	4.81	4.79 ^a	3.21	62.40 ^a
	p-valor	-	0.6631	0.6120	*0.8908	-	0.9245	*0.0010	0.6148	0.0050
C.V. (%)		-	6.51	8.13	9.77	-	7.77	1.88	12.36	13.93
7	T0	11.71	38.57	21.55	24.54	49.79	4.97	4.49 ^b	3.26 ^b	28.07
	Co SO ₄	9.74	39.10	21.92	24.37	46.93	4.67	4.53 ^b	3.03 ^b	32.33
	250 mg L ⁻¹	9.82	39.37	22.01	24.22	48.10	4.72	4.54 ^b	3.85 ^a	32.67

500 mg L ⁻¹	9.01	38.90	22.12	24.52	45.38	4.73	4.59 ^b	3.44 ^{ab}	22.67
1000 mg L ⁻¹	9.20	37.46	21.91	26.27	51.69	4.98	4.80 ^a	3.42 ^{ab}	37.60
p-valor	0.3427	0.2223	0.8705	0.2966	0.8254	0.4198	0.0008	0.0343	0.1138
C.V. (%)	21.98	3.39	3.92	6.54	18.61	6.89	2.08	10.71	27.48

%PP: Porcentaje de pérdida de peso; L: Luminosidad; a: Eje rojo-verde; b: Eje amarillo-azul; %PF: Porcentaje de pérdida de firmeza; DM: Diámetro de Mesocarpio; SST: Sólidos Solubles Totales; pH: Potencial de Hidrogeno; C.E.: Conductividad Eléctrica; ORP: Potencial de óxido reducción; C.V.: Coeficiente de variación; $p \leq 0.05$: Resultado estadísticamente significativo. N=5. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). * Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Friedman ($p < 0.05$).

El Co se considera un elemento beneficioso, sin embargo, no es esencial para las plantas, en concentraciones bajas puede influir positivamente en el crecimiento de la planta, es componente de enzimas y proteínas claves para el metabolismo, pero desafortunadamente aún no se tiene el conocimiento científico para comprender tal hecho. En cultivos como cereales y leguminosas cumple un papel importante en la fijación de nitrógeno debido a que favorece la producción de leghemoglobina, que permite a la nitrogenasa transformar el nitrógeno atmosférico en amonio utilizable por la planta (Alhammad et al., 2023; Ali et al., 2023). En este estudio se realizaron aplicaciones de nanopartículas de óxido de cobalto (NPs CoO). Si bien el uso de las NPs presenta un enfoque innovador para transportar nutrientes u oligoelementos que se liberan de forma controlada, su absorción, traslocación y acumulación dentro de la planta se ve influenciada por factores como la composición química, el tamaño y la funcionalidad de las NPs (Rehman et al., 2024; Sembada y Wuled Lenggoro, 2024). La aplicación de NPs Co en este estudio no generó ninguna diferencia significativa en los parámetros agronómicos de las plantas de tomate (Figuras 1 y 2), aunque existen estudios que demuestran lo contrario. Gad y El-Metwally (2015) observaron que la aplicación de 20 mg L^{-1} via riego de CoSO_4 favorece el área foliar, la altura y longitud de raíz, sin embargo, al aumentar este nivel dicho efecto se reduce. Mientras que en plantas de tomate al adicionar en el riego 250 mg L^{-1} de CoSO_4 el crecimiento se detiene y causa toxicidad provocando clorosis en hojas jóvenes y provocando marchitez de flores y reducción del desarrollo de frutos al aplicar 2000 mg L^{-1} , siendo mas grave el daño (Gopal et al., 2003). Considerando lo anterior resulta relevante la ausencia de toxicidad en este estudio, a la vez que es recomendable evaluar otras concentraciones que puedan impactar positivamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

El Co se transporta por flujo de transpiración, al carecer de transportadores específicos utiliza el transportador regulador de hierro (IRT1), lo cual impacta negativamente la concentración de hierro dentro de la planta llegando a provocar una deficiencia (Ejaz A. et al., 2022; Gad N. y Abdelhamid, 2019; Hong et al., 2019; Lange et al., 2017). Este elemento puede afectar la absorción de otros nutrientes, ya sea suprimiéndola o favoreciéndola, mostrando interacciones antagónicas con nutrientes como el cadmio y sinérgicas con elementos como zinc, cromo y azufre (Chatzistathis, 2018). En este caso,

la aplicación de Co en su forma iónica mejoró el contenido de Co, S, Zn, Mo y Na en tejido foliar (Tabla 1) y P, Mg, S, Co y B en frutos de tomate (Tabla 2). Varios estudios previos han reportado resultados similares al evaluar este elemento. Fageria (2001) reporta que la interacción del Co con bacterias fijadoras de nitrógeno, como *Rhizobium* y *Azotobacter*, favorece la absorción de N, debido a que el Co es esencial para la síntesis de vitamina B₁₂ y desempeña un papel importante en la mejora de la fijación del nitrógeno atmosférico (Gad et al., 2013). Por otro lado, este elemento puede afectar el pH favoreciendo la absorción de otros nutrientes (P, K, S, Mg, B, Cu, Mn, Mo), así mismo influye en el fotosistema II, promoviendo el traspaso de energía hacia el fotosistema I y elevando la síntesis de ATP a través del flujo cíclico de electrones en los cloroplastos. Sin embargo, cuando su concentración es excesiva, puede interrumpir la cadena de transporte de electrones (Gericó et al., 2020; Lwalaba et al., 2020). Además, el Co puede activar enzimas que contienen el grupo tiol (-SH) provocando un aumento en la demanda y transporte de azufre (Santanu et al. 2020; Seregin and Kozhevnikova 2023). En algunos estudios han aplicado Co mediante riego y en diferentes formas iónicas obteniendo resultados positivos en la absorción de macronutrientes. Basu et al. (2006) trabajaron en el cultivo de mani (*Arachis hypogaea* L.) e identificaron una mejora en la absorción de N, P y K en las plantas al combinar *Rhizobium* + bacteria fosfórica + Co. Además, en el cultivo de haba (*Vicia faba* L.) al adicionar 20 mg L⁻¹ de CoSO₄ al riego mejora el contenido de N, P y K en brotes y raíces, obteniendo resultados satisfactorios (Hala, 2007). Mientras que las plantas de tomate al ser expuestas a 250, 500 y 1000 mg L⁻¹ de nanopartículas de ferrita de cobalto (CoFe₂O₄) reduce la actividad de la catalasa (CAT) y altera la absorción de macronutrientes, sin afectar el crecimiento ni la germinación de las plantas (López-Moreno et al., 2016). El Khalawy and Hegab (2017) aplicaron nitrógeno (N) más pulverizaciones foliares de CoSO₄ en el cultivo de habas, los datos obtenidos mostraron que la interacción entre el N y Co aumentaron ciertos nutrientes (N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu) en los granos, la paja y las raíces especialmente con una dosis de 15.0 kg de N y 1 mg L⁻¹ de Co. Por otra parte, Naeem et al. (2020) señalan que generalmente las hojas presentan una mayor concentración de este elemento, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este estudio en ambas etapas. Respecto a la segunda etapa el Co

presento mayor acumulación en hojas cuando se aplicó en forma iónica como CoSO_4 (Figura 3A, B).

En los frutos de tomate la presencia de Co se limitó a los primeros racimos (Figura 3C), es probable que los primeros frutos se encontraban en un estado de crecimiento activo al momento de la aplicación causando mayor acumulación de Co. Otro factor es la cutícula de los frutos que funciona como una barrera impermeable que resguarda las células epidérmicas, también durante el desarrollo existe una acumulación de cera que limita la difusión de gases. Además, se sabe que la absorción de las NPs a través de la cutícula se ve afectado por el tamaño, carga y solubilidad y pueden quedarse sobre la superficie limitando su redistribución dentro del fruto. Adicionalmente, el número de estomas en frutos es 100 veces menor en comparación de las hojas y al expandirse la densidad de estomas disminuye (Garrido et al., 2023).

Así mismo, se observó que la aplicación de Co fue más efectiva en su forma iónica (Figura 3C). Este elemento es un catión trivalente con carga alta, lo cual provoca interacciones fuertes con membranas celulares y proteínas. Tienen la capacidad de revertir su carga siendo más absorbible, pero pudiendo ser más tóxico. En cambio, las NPs pueden diseñarse con recubrimientos que modulan su carga y reducen interacciones no deseadas, aumentando su estabilidad. La aplicación de NPs de forma foliar reduce la toxicidad en las plantas debido a las reacciones químicas que se generan entre las sustancias aplicadas y los elementos de la cutícula (Juárez-Maldonado et al., 2019; Poschenrieder et al., 2019).

Se sabe que los frutos de tomate son una fuente rica de vitaminas, proteínas, aminoácidos y compuestos antioxidantes como ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y carotenoides como licopeno y β -caroteno (‘Aqilah et al., 2023; Kaboré et al., 2022). Interesantemente, los tratamientos aplicados causaron efectos significativos en la producción de licopeno, fenoles, flavonoides, antocianinas (Figura 4) y capacidad antioxidante lipofílica (Figura 5), estos resultados podrían estar relacionados con el efecto estimulante de las NPs sobre la planta, debido a su tamaño nanométrico puede favorecer la absorción de nutrientes y activar rutas metabólicas, potenciando la síntesis de compuestos bioactivos incluso cuando el elemento químico no es esencial. Se ha reportado que las NPs estimulan la producción de antioxidantes enzimáticos (peroxidasa, catalasa,

superóxido dismutasa, etc.) y no enzimáticos (polifenoles, carotenoides, ácido ascórbico, etc.) (Juárez-Maldonado et al., 2021). Aunque la exposición a concentraciones altas de Co aumenta las especies reactivas de oxígeno (ROS), inactivando enzimas y causando peroxidación lipídica (Radi et al., 2025). Sin embargo, algunos autores afirman que las plantas producen compuestos antioxidantes como fenoles, licopeno y flavonoides que protegen las células, eliminan radicales libres y mejoran la calidad del fruto en la postcosecha (Cantu et al., 2022; Goncharuk y Zagorskina, 2023; Vélez-Terreros et al., 2024; Wang et al., 2022).

Las respuestas obtenidas en los compuestos bioactivos son consistentes con algunos autores que aplicaron de forma foliar Co_3O_4 NPs y otras NPs metálicas. Jahani et al. (2019) aplicó NPs CoO (2000 mg L^{-1}) de forma foliar al cultivo canola (*Brassica napus* L.) observando un aumento de la capacidad antioxidante lipofílica y algunos compuestos antioxidantes no enzimáticos. A concentraciones de $50\text{-}1000 \text{ mg L}^{-1}$ de Co_3O_4 NPs el contenido total de flavonoides y fenoles aumentó, esta respuesta se debe a que las plantas incrementan componentes enzimáticos y no enzimáticos para minimizar daño oxidativo como mecanismo de defensa contra a la exposición a NPs de óxidos metálicos (Jahani et al., 2020). En el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) se aplicaron de forma foliar concentraciones de 20 y 25 mg L^{-1} de Co_3O_4 NPs y promovió en un 5% la actividad antioxidante, carbohidratos y antocianinas totales (Silva-Marrufo et al., 2024). También la aplicación foliar de NPs de cobre en cultivo de tomate estimula la acumulación de compuestos bioactivos (vitamina C, licopeno, fenoles y flavonoides) en el fruto mejorando la capacidad antioxidante tanto lipofílica como hidrofílica (López-Vargas et al., 2018). Por otro lado, la aplicación de NPs metálicas en los cultivos favorece el aumento de antocianinas y compuestos fenólicos como respuesta al estrés oxidativo generado por diversas enzimas (C. Ma et al., 2016). Si bien las antocianinas son responsables de los colores rojo, púrpura y azul en flores, frutos y hojas. Su estabilidad se ve afectada por factores como el pH, la temperatura, la luz, el oxígeno y las interacciones con otros flavonoides o iones metálicos (Gonzali y Perata, 2020).

El pH es un factor importante y puede afectar la calidad el fruto, generalmente los tomates se encuentran en un rango de 4.0 a 4.5, cuanto menor acido sea es mejor para el paladar

del consumidor (Chen et al., 2012; López-Vargas et al., 2018). En cuanto a los frutos cosechados en este estudio presentaron un pH ácido, y después del almacenamiento redujeron su acidez (Tabla 3 y 4), esto se le atribuye al proceso de maduración. De manera natural los frutos climatéricos como el tomate incrementan su contenido de azúcar y reducen la concentración de ácidos orgánicos (ácido cítrico y ácido málico) a medida que este proceso avanza lo cual influye en el sabor, estabilidad y susceptibilidad al deterioro (Chen et al., 2012; Hernández-Hernández et al., 2019). La conservación de los frutos también está influenciada por los valores de ORP, una reducción en los valores del potencial redox indica un mayor potencial antioxidante, que favorece la calidad del fruto (Juárez-Maldonado et al., 2016). Es importante resaltar que el Co en niveles moderados es inhibidor del etileno debido a que limita la actividad enzimática ACO (1-aminociclopropano-1-oxidasa del ácido carboxílico) en la síntesis del etileno, esto se considera una respuesta por las plantas al estrés (Chmielowska-Bajk et al., 2014; Phuong Thao et al., 2015).

CONCLUSIONES

La aplicación foliar de NPs CoO, no alteró el proceso de desarrollo de la planta de tomate, ni provocó daños por toxicidad, al contrario, favorecieron en la absorción de algunos elementos principalmente P, Mg, S, Zn, Mo, Na y B.

En general, el uso de CoO NPs tiene un efecto positivo en la acumulación de compuestos bioactivos, principalmente licopeno, fenoles, flavonoides, vitamina C, antocianinas y capacidad antioxidante lipofílica. Además, las NPs tienden a incrementar la capacidad antioxidante del fruto lo cual influye positivamente a la conservación, la frescura y vida útil del fruto siendo una respuesta relacionada con la capacidad antioxidante de la planta.

En los parámetros de calidad de frutos, los cambios observados en pH y CE se atribuyen al proceso de maduración. Además, las NPs tienden a incrementar la capacidad antioxidante del fruto lo cual influye positivamente a la conservación, la frescura y vida útil del fruto.

La aplicación del elemento Cobalto (Co) en forma nanométrica no fue tan eficiente como el CoSO_4 en el proceso de biofortificación.

En general, el uso de NPs CoO tiene un efecto positivo en la acumulación de compuestos bioactivos, principalmente licopeno, fenoles, flavonoides, vitamina C, antocianinas y capacidad antioxidante lipofílica, siendo una respuesta relacionada con la capacidad antioxidante de la planta.

En los parámetros de calidad de frutos, los cambios observados en pH y CE se atribuyen al proceso de maduración. Además, las NPs tienden a incrementar la capacidad antioxidante del fruto lo cual influye positivamente a la conservación, la frescura y vida útil del fruto.

REFERENCIAS

- A ElKhalawy, S. M. y Hegab, E. A. (2017). Impact of nitrogen and cobalt rates on faba bean crop grown on clayey soil. *J. Soil Sci. and Agric. Eng., Mansoura Univ*, 8(9), 459–465. <https://doi.org/10.21608/jssae.2017.37580>
- Abreu-Junior, C. H. y Gruberger, G. A. C. y Cardoso, P. H. S. y Gonçalves, P. W. B. y Nogueira, T. A. R. y Capra, G. F. y Jani, A. D. (2023). Soybean seed enrichment with cobalt and molybdenum as an alternative to conventional seed treatment. *Plants*, 12, 1164. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12051164/S1>
- Ahmad, Z. y Niyazi, S. y Firdoos, A. y Wang, C. y Manzoor, M. A. y Ramakrishnan, M. y Upadhyay, A. y Ding, Y. (2024). Enhancing plant resilience: Nanotech solutions for sustainable agriculture. *Heliyon*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40735>
- Alhammad, B. A. y Saleem, K. y Asghar, M. A. y Raza, A. y Ullah, A. y Farooq, T. H. y Yong, J. W. H. y Xu, F. y Seleiman, M. F. y Riaz, A. (2023). Cobalt and titanium alleviate the methylglyoxal-induced oxidative stress in pennisetum divisum seedlings under saline conditions. *Metabolites*, 13(11), 1162. <https://doi.org/10.3390/METABO13111162>
- Ali, S. y Gill, R. A. y Ulhassan, Z. y Zhang, N. y Hussain, S. y Zhang, K. y Huang, Q. y Sagir, M. y Tahir, M. B. y Gill, M. B. y Mwamba, T. M. y Ali, B. y Zhou, W. (2023). Exogenously applied melatonin enhanced the tolerance of Brassica napus against cobalt toxicity by modulating antioxidant defense, osmotic adjustment, and expression of stress response genes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, 114624. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2023.114624>
- Alshammari, B. H. y Lashin, M. M. A. y Mahmood, M. A. y Al-Mubaddel, F. S. y Ilyas, N. y Rahman, N. y Sohail, M. y Khan, A. y Abdullaev, S. S. y Khan, R. (2023). Organic and inorganic nanomaterials: fabrication, properties and applications. *RSC Advances*, 13, 13735–13785. <https://doi.org/10.1039/d3ra01421e>

- Alsina, I. y Erdberga, I. y Duma, M. y Alksnis, R. y Dubova, L. (2022). Changes in greenhouse grown tomatoes metabolite content depending on supplemental light quality. *Frontiers in Nutrition*, 9, 830186. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.830186>
- An, C. y Sun, C. y Li, N. y Huang, B. y Jiang, J. y Shen, Y. y Wang, C. y Zhao, X. y Cui, B. y Wang, C. y Li, X. y Zhan, S. y Gao, F. y Zeng, Z. y Cui, H. y Wang, Y. (2022). Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 20, 11. <https://doi.org/10.1186/S12951-021-01214-7>
- ‘Aqilah, N. M. N. y Rovina, K. y Felicia, W. X. L. y Vonnie, J. M. (2023). A Review on the potential bioactive components in fruits and vegetable wastes as value-added products in the food industry. *Molecules*, 28, 2631. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28062631>
- Aquilina, G. y Bories, G. y Brantom, P. y Caloni, F. y Chesson, A. y Cocconcelli, P. S. y De Knecht, J. y Dierick, A. y Gralak, A. y Gropp, J. y Halle, I. y Ilbäck, N.-G. y Kroker, R. y Leng, L. y Lindgren, S. y Haldorsen, A.-K. L. y Mantovani, A. y Mézes, M. y Renshaw, D. y Saarela, M. (2009). Scientific opinion on the use of cobalt compounds as additives in animal nutrition. *EFSA Journal*, 7, 1383. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.1383>
- Arvouet-Grand y Vennat B. y Pourrat A y Legret P. (1994). Standardization of propolis extract and identification of principal constituents. *Journal of Pharmacie of Belgique*, 49(6), 462–468.
- Barhoum, A. y García-Betancourt, M. L. y Jeevanandam, J. y Hussien, E. A. y Mekkawy, S. A. y Mostafa, M. y Omran, M. M. y Abdalla, M. S. y Bechelany, M. (2022). Review on natural, incidental, bioinspired, and engineered nanomaterials: History, definitions, classifications, synthesis, properties, market, toxicities, risks, and regulations. *Nanomaterials*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/nano12020177>
- Basu, M. y Bhadoria, P. B. S. y Mahapatra, S. C. (2006). Influence of microbial culture in combination with micronutrient in improving the groundnut productivity under

- alluvial soil of India. *Acta Agriculturae Slovenica*, 435–444. <https://doi.org/https://doi.org/10.14720/aas.2006.87.2.15123>
- Bhardwaj, A. K. y Chejara, S. y Malik, K. y Kumar, R. y Kumar, A. y Yadav, R. K. (2022). Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 13, 470–478. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055278>
- Białow, W. y As, Ć y Blicharska, E. y Drabik, K. (2024). Biofortification of plant-and animal-based foods in limiting the problem of microelement deficiencies-A narrative review. *Nutrients*, 16. <https://doi.org/10.3390/nu16101481>
- Bidast, S. y Golchin, A. y Baybordi, A. y Naidu, R. (2022). Effects of Fe oxide-based nanoparticles on yield and nutrient content of corn in Cobalt-contaminated soils. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102314. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102314>
- Boholm, Å. y Larsson, S. (2019). What is the problem? A literature review on challenges facing the communication of nanotechnology to the public. *Journal of Nanoparticle Research*, 21, 1–21. <https://doi.org/10.1007/S11051-019-4524-3/METRICS>
- Bouis, H. y Foley, J. y Lividini, K. y Jumrani, J. y Reinke, R. y Van Der Straeten, D. y Zagado, R. y Boy, E. y Brown, L. R. y Mudyahoto, B. y Alioma, R. y Hussain, M. y Pfeiffer, W. H. (2024). Biofortification: Future challenges for a newly emerging technology to improve nutrition security sustainably. *Current Developments in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2024.104478>
- Brengi, S. H. y Khedr, A. A. E. M. y Abouelsaad, I. A. (2022). Effect of melatonin or cobalt on growth, yield and physiological responses of cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants under salt stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(1), 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.06.012>
- Brengi, S. H. y Moubarak, M. y El-Naggar, H. M. y Osman, A. R. (2024). Promoting salt tolerance, growth, and phytochemical responses in coriander (*Coriandrum sativum* L. cv. Balady) via eco-friendly *Bacillus subtilis* and cobalt. *BMC Plant Biology*, 24(1), 848. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-05517-3>

- Buturi, C. V. y Coelho, S. R. M. y Cannata, C. y Basile, F. y Giuffrida, F. y Leonardi, C. y Mauro, R. P. (2022). Iron biofortification of greenhouse cherry tomatoes grown in a soilless system. *Horticulturae*, 8, 858. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8100858>
- Campbell, J. y Collins, E. J. y Bowyer, C. y Tsouza, A. y Chopra, M. (2022). Tomatoes: An extensive review of the associated health impacts of tomatoes and factors that can affect their cultivation. *Biology*, 11, 239. <https://doi.org/10.3390/biology11020239>
- Cantu, J. M. y Ye, Y. y Hernandez-Viezcas, J. A. y Zuverza-Mena, N. y White, J. C. y Gardea-Torresdey, J. L. (2022). Tomato fruit nutritional quality is altered by the foliar application of various metal oxide nanomaterials. *Nanomaterials*, 12, 2349. <https://doi.org/10.3390/NANO12142349>
- Chatterjee, J. y Chatterjee, C. (2000). Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower. *Environmental Pollution*, 109, 69–74. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00238-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00238-9)
- Chatzistathis, T. (2018). Physiological importance of manganese, cobalt and nickel and the improvement of their uptake and utilization by plants. In *Plant Micronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants* (pp. 123–135). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-7.00008-3>
- Chen, M. y Jiang, Q. y Yin, X. R. y Lin, Q. y Chen, J. Y. y Allan, A. C. y Xu, C. J. y Chen, K. S. (2012). Effect of hot air treatment on organic acid- and sugar-metabolism in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit. *Scientia Horticulturae*, 147, 118–125. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2012.09.011>
- Chmielowska-Bańk, J. y Lefèvre, I. y Lutts, S. y Kulik, A. y Deckert, J. (2014). Effect of cobalt chloride on soybean seedlings subjected to cadmium stress. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 83, 201–207. <https://doi.org/10.5586/asbp.2014.027>
- Choe U. y Sun J. y Bailoni E. y Chen P. y Li Y. y Gao B. y Y Wang T. y Rao J. y Yu L. (2021). Molecules chemical composition of tomato seed flours, and their radical scavenging, anti-inflammatory and gut microbiota modulating properties. *Molecules*, 26, 1478. <https://doi.org/10.3390/molecules26051478>

- Cwiertnia, A. y Kozłowski, M. y Cymbaluk-Płoska, A. (2022). The role of iron and cobalt in gynecological diseases. *Cells*, *12*, 117. <https://doi.org/10.3390/cells12010117>
- Dhaliwal, S. S. y Sharma, V. y Shukla, A. K. y Verma, V. y Kaur, M. y Shivay, Y. S. y Nisar, S. y Gaber, A. y Brestic, M. y Barek, V. y Skalicky, M. y Ondrisik, P. y Hossain, A. (2022). Biofortification—A frontier novel approach to enrich micronutrients in field crops to encounter the nutritional security. *Molecules*, *27*(4), 1340. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27041340>
- Ding, Y. y Zhao, W. y Zhu, G. y Wang, Q. y Zhang, P. y Rui, Y. (2023). Recent trends in foliar nanofertilizers: A review. *Nanomaterials*, *13*, 2906. <https://doi.org/10.3390/NANO13212906>
- Djanaguiraman, M. y Anbazhagan, V. y Parkash Dhankher, O. y Vara Prasad, P. V. (2024). Uptake, translocation, toxicity, and impact of nanoparticles on plant physiological processes. *Plants*, *13*, 3137. <https://doi.org/10.3390/plants13223137>
- Duhan, J. S. y Kumar, R. y Kumar, N. y Kaur, P. y Nehra, K. y Duhan, S. (2017). Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, *15*, 11–23. <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2017.03.002>
- Ehsan, M. y Raja, N. I. y Mashwani, Z. U. R. y Zohra, E. y Abasi, F. y Ikram, M. y Mustafa, N. y Wattoo, F. H. y Proćków, J. y Pérez de la Lastra, J. M. (2022). Effects of phylogenically synthesized bimetallic Ag/ZnO nanomaterials and nitrogen-based fertilizers on biochemical and yield attributes of two wheat varieties. *Nanomaterials*, *12*, 2894. <https://doi.org/10.3390/NANO12172894>
- Ejaz A. y Ahmad K. y Khan Z. y Akhtar S. y Sultana R. y Nadeem M. y Hussain M. y Elshikh M. (2022). Assessment of cobalt in wheat grains as affected by diverse fertilizers: implications for public health. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(23), 34558–34574. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-18528-0/FIGURES/8>
- El-Bialy, S. M. y El-Mahrouk, M. E. y Elesawy, T. y Omara, A. E. D. y Elbehiry, F. y El-Ramady, H. y Áron, B. y Prokisch, J. y Brevik, E. C. y Solberg, S. (2023). Biological nanofertilizers to enhance growth potential of strawberry seedlings by boosting

- photosynthetic pigments, plant enzymatic antioxidants, and nutritional status. *Plants*, *12*, 302. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12020302>
- El-Ramady, H. y Abdalla, N. y Elbasiouny, H. y Elbehiry, F. y Elsakhawy, T. y Omara, A. E. D. y Amer, M. y Bayoumi, Y. y Shalaby, T. A. y Eid, Y. y Zia-ur- Rehman, M. (2021). Nano-biofortification of different crops to immune against COVID-19: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *222*, 112500. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.112500>
- Elshamly, A. M. S. y Saad, & y Nassar, M. A. (2024). Impacts of cobalt and zinc on improving peanuts nutrient uptake, yield and irrigation water use efficiency under different irrigation levels. *Scientific Reports*, *14*(1), 7188. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56898-2>
- Fageria, V. D. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, *24*(8), 1269–1290. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>
- Farag, M. A. y Abib, B. y Qin, Z. y Ze, X. y Ali, S. E. (2023). Dietary macrominerals: Updated review of their role and orchestration in human nutrition throughout the life cycle with sex differences. *Current Research in Food Science*, *6*, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100450>
- Farag, M. A. y Hamouda, S. y Gomaa, S. y Agboluaje, A. A. y Louai, M. y Hariri, M. y Yousof, S. M. (2021). Dietary micronutrients from zygote to senility: Updated review of minerals' role and orchestration in human nutrition throughout life cycle with sex differences. *Nutrients*, 3740. <https://doi.org/10.3390/nu13113740>
- Faraone, I. y Russo, D. y Ponticelli, M. y Candido, V. y Castronuovo, D. y Cardone, L. y Sinisgalli, C. y Labanca, F. y Milella, L. (2021). Preserving biodiversity as source of health promoting compounds: Phenolic profile and biological activity of four varieties of *Solanum lycopersicum* L. *Plants*, *10*, 447. <https://doi.org/10.3390/plants10030447>
- Francis, D. V. y Abdalla, A. K. y Mahakham, W. y Sarmah, A. K. y Ahmed, Z. F. R. (2024). Interaction of plants and metal nanoparticles: Exploring its molecular

- mechanisms for sustainable agriculture and crop improvement. *Environment International*, 108859. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108859>
- Gad, N. y El-Metwally, I. M. (2015). Chemical and physiological response of maize to salinity using cobalt supplement. *International Journal of Chem Tech Research*, 8, 45–52.
- Gad, N. y Mohammed, A. M. y Bekbayeva, L. K. (2013). Role of cobalt on cowpea growth and yield under different levels of nitrogen. *World Applied Sciences Journal*, 22(4), 470–478. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.22.04.2982>
- Gad N., S. A. y Abdelhamid, M. T. (2019). The potential role of cobalt and/or organic fertilizers in improving the growth, yield, and nutritional composition of moringa oleifera. *Agronomy*, 9(12), 862. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9120862>
- Garrido, A. y Conde, A. y Serôdio, J. y De Vos, R. C. H. y Cunha, A. (2023). Fruit photosynthesis: More to know about where, how and why. *Plants*, 12, 2393. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12132393>
- Genchi, G. y Lauria, G. y Catalano, A. y Carocci, A. y Sinicropi, M. S. (2023). Prevalence of cobalt in the environment and its role in biological processes. *Biological Processes. Biology*, 12, 1335. <https://doi.org/10.3390/biology12101335>
- Gericó, T. G. y Tavanti, R. F. R. y de Lima, J. P. y Ribeiro, R. P. y dos Santos, L. C. C. y da Silva, M. S. y dos Reis, A. R. (2020). Cobalt and molybdenum stimulate compounds of primary metabolism, nitrogen forms, and photosynthetic pigments in peanut plants (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 43, 1907–1922. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1750646>
- Giusti Monica y Wrolstad Ronald E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*.
- Goncharuk, E. A. y Zagorskina, N. V. (2023). Heavy metals, their phytotoxicity, and the role of phenolic antioxidants in plant stress responses with focus on cadmium:

- review. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 3921, 28(9), 3921. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28093921>
- Gonzali, S. y Perata, P. (2020). Anthocyanins from purple tomatoes as novel antioxidants to promote human health. *Antioxidants*, 9, 1017. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9101017>
- Gopal, R. y Dube, B. K. y Sinha, P. y Chatterjee, C. (2003). Cobalt toxicity effects on growth and metabolism of tomato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(5–6), 619–628. <https://doi.org/10.1081/CSS-120018963>
- Guardiola-Márquez, C. E. y García-Sánchez, C. V. y Sánchez-Arellano, Ó. A. y Bojorquez-Rodríguez, E. M. y Jacobo-Velázquez, D. A. (2023). Biofortification of broccoli microgreens (*Brassica oleracea* var. *italica*) with glucosinolates, zinc, and iron through the combined application of bio- and nanofertilizers. *Foods*, 12, 3826. <https://doi.org/10.3390/FOODS12203826>
- Hala, K. (2007). Effect of cobalt fertilizer on growth, yield and nutrients status of Faba bean (*vicia faba* L.) plants. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(9), 867–872.
- Han, H.-Y. y Xu, W.-A. y Lü, Z.-R. y Zou, F. y Li, S. (2008). Activation and inactivation of horseradish peroxidase by cobalt ions. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 26, 83–91. <https://doi.org/10.1080/07391102.2008.10507226>
- Han, J. y Durand-Morat, A. y Mottaleb, K. (2025). Vitamin A fortification: key factors and considerations for effective implementation. *Frontiers in Public Health*, 13, 1534375. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1534375>
- Hareem, M. y Danish, S. y Obaid, S. Al y Ansari, M. J. y Datta, R. (2024). Mitigation of drought stress in chili plants (*Capsicum annuum* L.) using mango fruit waste biochar, fulvic acid and cobalt. *Scientific Reports*, 14, 14270. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-65082-5>
- Hernandez, L. E. y Ruiz, J. M. y Espinosa, F. y Alvarez-Fernandez, A. y Carvajal, M. (2024). Plant nutrition challenges for a sustainable agriculture of the future. *Physiologia Plantarum*, 176, 70018. <https://doi.org/10.1111/ppl.70018>

- Hernández-Hernández, H. y Quiterio-Gutiérrez, T. y Cadenas-Pliego, G. y Ortega-Ortiz, H. y Hernández-Fuentes, A. D. y De La Fuente Cabrera, M. y Valdés-Reyna, J. y Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 355. <https://doi.org/10.3390/PLANTS8100355>
- Hong, D. D. y Anh, H. T. L. y Tam, L. T. y Show, P. L. y Leong, H. Y. (2019). Effects of nanoscale zerovalent cobalt on growth and photosynthetic parameters of soybean *Glycine max* (L.) Merr. DT26 at different stages. *BMC Energy*, 1, 1–9. <https://doi.org/10.1186/S42500-019-0007-4>
- Hu, X. y Wei, X. y Ling, J. y Chen, J. (2021). Cobalt: An essential micronutrient for plant growth? *Frontiers in Plant Science*, 12, 768523. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768523>
- Ikram, N. A. y Abdalla, M. A. y Mühlhling, K. H. (2024). Developing iron and Iodine enrichment in tomato fruits to meet human nutritional needs. *Plants*, 13, 3438. <https://doi.org/10.3390/PLANTS13233438>
- Inayat, H. y Mehmood, H. y Danish, S. y Alharbi, S. A. y Ansari, M. J. y Datta, R. (2024). Impact of cobalt and proline foliar application for alleviation of salinity stress in radish. *BMC Plant Biology*, 24, 287. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-04998-6>
- Islam, R. M. y Akash, S. y Hossain, M. J. y Noor Alam, M. y Nowrin, T. y Rahman, M. M. y Rauf, A. y Thiruvengadam, · Muthu. (2023). Exploring the potential function of trace elements in human health: a therapeutic perspective. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 478, 2141–2171. <https://doi.org/10.1007/s11010-022-04638-3>
- Jahani, M. y Khavari-Nejad, R. A. y Mahmoodzadeh, H. y Saadatmand, S. (2019). Effects of foliar application of cobalt oxide nanoparticles on growth, photosynthetic pigments, oxidative indicators, non-enzymatic antioxidants and compatible osmolytes in canola (*Brassica napus* L.). *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 61, 29–42. <https://doi.org/10.24425/abcsb.2019.127736>
- Jahani, M. y Khavari-Nejad, R. A. y Mahmoodzadeh, H. y Saadatmand, S. (2020). Effects of cobalt oxide nanoparticles (Co₃O₄ NPs) on ion leakage, total phenol, antioxidant

enzymes activities and cobalt accumulation in *Brassica napus* L. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(3), 1260–1275.
<https://doi.org/10.15835/nbha48311766>

Jaiswal, D. K. y Krishna, R. y Chouhan, G. K. y de Araujo Pereira, A. P. y Ade, A. B. y Prakash, S. y Verma, S. K. y Prasad, R. y Yadav, J. y Verma, J. P. (2022). Bio-fortification of minerals in crops: current scenario and future prospects for sustainable agriculture and human health. *Plant Growth Regulation*, 98, 5–22.
<https://doi.org/10.1007/s10725-022-00847-4>

Jomova, K. y Makova, M. y Alomar, S. Y. y Alwasel, S. H. y Nepovimova, E. y Kuca, K. y Rhodes, C. J. y Valko, M. (2022). Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*, 367, 110173. <https://doi.org/10.1016/J.CBI.2022.110173>

Juárez-Maldonado, A. y Ortega-Ortíz, H. y Morales-Díaz, A. B. y González-Morales, S. y Morelos-Moreno, Á. y Cabrera-De la Fuente, M. y Sandoval-Rangel, A. y Cadenas-Pliego, G. y Benavides-Mendoza, A. (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 162.
<https://doi.org/10.3390/IJMS20010162>

Juárez-Maldonado, A. y Ortega-Ortíz, H. y Pérez-Labrada, F. y Cadenas-Pliego, G. y Benavides-Mendoza, A. (2016). Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 89, 183–189.
<https://doi.org/10.5073/JABFQ.2016.089.023>

Juárez-Maldonado, A. y Tortella, G. y Rubilar, O. y Fincheira, P. y Benavides-Mendoza, A. (2021). Biostimulation and toxicity: The magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *Journal of Advanced Research*, 31, 113.
<https://doi.org/10.1016/J.JARE.2020.12.011>

Kaboré, K. y Konaté, K. y Bazié, D. y Dakuyo, R. y Sanou, A. y Sama, H. y Santara, B. y Dicko, M. H. (2022). Effects of growing zones on nutritional and bioactive compounds of by-products of two tomato cultivars. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100414. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2022.100414>

- Karnwal, A. (2023). Enhancing zinc levels in *Solanum lycopersicum* L. through biofortification with plant growth-promoting *Pseudomonas* spp. isolated from cow dung. *BioTechnologia*, *104*(2), 157–169. <https://doi.org/10.5114/BTA.2023.127205>
- Kaur, N. y Agarwal, A. y Sabharwal, M. (2022). Food fortification strategies to deliver nutrients for the management of iron deficiency anaemia. *Current Research in Food Science*, *5*, 2094–2107. <https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2022.10.020>
- Khan, M. K. y Pandey, A. y Hamurcu, M. y Gezgin, S. y Athar, T. y Rajput, V. D. y Gupta, O. P. y Minkina, T. (2021). Insight into the prospects for nanotechnology in wheat biofortification. *Biology*, *10*, 1123. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY10111123>
- Kiferle, C. y Gonzali, S. y Holwerda, H. T. y Ibaceta, R. R. y Perata, P. (2013). Tomato fruits: A good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science*, *4*(J), 47070. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2013.00205>
- Kiran, K. (2020). Advanced approaches for biofortification. *Advances in Agri-Food Biotechnology*, 29–55. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2874-3_2
- Koç, E. y Karayığit, · Belgizar. (2022). Assessment of Biofortification Approaches Used to Improve Micronutrient-Dense Plants That Are a Sustainable Solution to Combat Hidden Hunger. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *22*, 475–500. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00663-1>
- Kuskoski E. M. y Asuero A.G. y Garcia-Parrilla M.C. y Troncoso A.M. y Fett R. (2004). *Actividad antioxidante de pigmentos antociánicos*. *24*(4), 691–693.
- Lan, L. y Feng, Z. y Liu, X. y Zhang, B. (2024). The roles of essential trace elements in T cell biology. *J Cell Mol Med*. <https://doi.org/10.1111/jcmm.18390>
- Lange, B. y van der Ent, A. y Baker, A. J. M. y Echevarria, G. y Mahy, G. y Malaisse, F. y Meerts, P. y Pourret, O. y Verbruggen, N. y Faucon, M. P. (2017). Copper and cobalt accumulation in plants: a critical assessment of the current state of knowledge. *New Phytologist*, *213*(2), 537–551. <https://doi.org/10.1111/NPH.14175>

- Li, Y. y Han, H. y You, K. y Ma, C. y Fan, X. (2024). Investigating the association between blood cobalt and gallstones: a cross-sectional study utilizing NHANES data. *Frontiers in Public Health*, *12*. <https://doi.org/10.3389/FPUBH.2024.1363815>
- Liu, W. y Liu, K. y Chen, D. y Zhang, Z. y Li, B. y El-Mogy, M. M. y Tian, S. y Chen, T. (2022). *Solanum lycopersicum*, a model plant for the studies in developmental biology, stress biology and food science. *Foods*, *11*, 2402. <https://doi.org/10.3390/FOODS11162402>
- López-Moreno, M. L. y Lugo Avilés, L. y Guzmán Pérez, N. y Irizarry, B. Á. y Perales, O. y Cedeno-Mattei, Y. y Román, F. (2016). Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *lyco-persicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of the Total Environmet*, *550*, 45–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.063>
- López-Vargas, E. R. y Ortega-Ortíz, H. y Cadenas-Pliego, G. y Romenus, K. de A. y de la Fuente, M. C. y Benavides-Mendoza, A. y Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences*, *8*, 1020. <https://doi.org/10.3390/APP8071020>
- Lwalaba, J. L. W. y Louis, L. T. y Zvobgo, G. y Richmond, M. E. A. y Fu, L. y Naz, S. y Mwamba, M. y Mundende, R. P. M. y Zhang, G. (2020). Physiological and molecular mechanisms of cobalt and copper interaction in causing phyto-toxicity to two barley genotypes differing in Co tolerance. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *187*, 109866. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2019.109866>
- Ma, C. y Liu, H. y Guo, H. y Musante, C. y Coskun, S. H. y Nelson, B. C. y White, J. C. y Xing, B. y Dhankher, O. P. (2016). Defense mechanisms and nutrient displacement in: *Arabidopsis thaliana* upon exposure to CeO₂ and In₂O₃ nanoparticles. *Environmental Science: Nano*, *3*, 1369–1379. <https://doi.org/10.1039/c6en00189k>
- Ma, Y. y Lin, W. y Ruan, Y. y Lu, H. y Fan, S. y Chen, D. y Huang, Y. y Zhang, T. y Pi, J. y Xu, J.-F. (2022). Advances of cobalt nanomaterials as anti-infection agents, drug

- carriers, and immunomodulators for potential infectious disease treatment. *Pharmaceutics*, *14*, 2351. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112351>
- Mahey, S. y Kumar, R. y Sharma, M. y Kumar, V. y Bhardwaj, R. (2020). A critical review on toxicity of cobalt and its bioremediation strategies. *SN Applied Sciences*, *2*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3020-9>
- Malik, S. y Muhammad, K. y Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A revolution in modern industry. *Molecules*, *28*, 661. <https://doi.org/10.3390/molecules28020661>
- Medina-Lozano, I. y Díaz, A. (2022). Applications of genomic tools in plant breeding: Crop Biofortification. *Int. J. Molecular Sciences*, *23*, 3086. <https://doi.org/10.3390/ijms23063086>
- Mejía-Ramírez, F. y Benavides-Mendoza, A. y González-Morales, S. y Juárez-Maldonado, A. y Lara-Viveros, F. M. y Morales-Díaz, A. B. y Morelos-Moreno, Á. (2023). Seed priming based on iodine and selenium influences the nutraceutical compounds in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Crop. *Antioxidants*, *12*, 1265. <https://doi.org/10.3390/antiox12061265>
- Meza, S. L. R. y Tobaruela, E. de C. y Pascoal, G. B. y Massaretto, I. L. y Purgatto, E. (2021). Post-harvest treatment with methyl jasmonate impacts lipid metabolism in tomato pericarp (*Solanum lycopersicum* l. cv. grape) at different ripening stages. *Foods*, *10*, 877. <https://doi.org/10.3390/FOODS10040877/S1>
- Milanković V. y Tasić, T. y Leskovic, A. y Petrović, S. y Mitić, M. L. y Novković, M. y Potkonjak, N. (2024). Metals on the menu-analyzing the presence, importance, and consequences. *Foods*, *13*, 1890. <https://doi.org/10.3390/foods13121890>
- Mmbando, G. S. y Missanga, J. (2024). The current status of genetic biofortification in alleviating malnutrition in Africa. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, *22*(4), 100445. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2024.100445>
- Morrissey, J. y Baxter, I. R. y Lee, J. y Li, L. y Lahner, B. y Grotz, N. y Kaplan, J. y Salt, D. E. y Guerinot, M. Lou. (2009). The ferroportin metal efflux proteins function in

iron and cobalt homeostasis in arabidopsis. *The Plant Cell*, 21, 3326–3338. <https://doi.org/10.1105/TPC.109.069401>

Naeem, M. y Ansari, A. A. y Gill, S. S. (2020). Contaminants in agriculture: Sources, impacts and management. In *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5>

Naik, B. y Kumar, V. y Rizwanuddin, S. y Mishra, S. y Kumar, V. y Saris, P. E. J. y Khanduri, N. y Kumar, A. y Pandey, P. y Gupta, A. K. y Khan, J. M. y Rustagi, S. (2024). Biofortification as a solution for addressing nutrient deficiencies and malnutrition. *Heliyon*, 10(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30595>

Nongbet, A. y Mishra, A. K. y Mohanta, Y. K. y Mahanta, S. y Ray, M. K. y Khan, M. y Baek, K. H. y Chakrabartty, I. (2022). Nanofertilizers: A smart and sustainable attribute to modern agriculture. *Plants*, 11, 2587. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11192587>

Olson, R. y Gavin-Smith, B. y Ferraboschi, C. y Kraemer, K. (2021). Food Fortification: The Advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients* 2021, Vol. 13, Page 1118, 13(4), 1118. <https://doi.org/10.3390/NU13041118>

Phuong Thao, N. y Iqbal Khan, M. R. y Binh Anh Thu, N. y Lan Thi Hoang, X. y Asgher, M. y Khan, N. A. y Phan Tran, L.-S. (2015). Role of ethylene and its cross talk with other signaling molecules in plant responses to heavy metal stress. *Plant Physiology*, 169, 73–84. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00663>

Piccolo, V. y Pastore, A. y Maisto, M. y Keivani, N. y Tenore, G. C. y Stornaiuolo, M. y Summa, V. (2024). Agri-food waste recycling for healthy remedies: Biomedical potential of nutraceuticals from unripe tomatoes (*solanum lycopersicum* L.). *Foods*, 13(2), 331. <https://doi.org/10.3390/FOODS13020331>

Poschenrieder, C. y Busoms, S. y Barceló, J. (2019). How plants handle trivalent (+3) elements. *International Journal of Molecular Sciences* 2019, Vol. 20, Page 3984, 20, 3984. <https://doi.org/10.3390/IJMS20163984>

- Pournavab Rahim, F. y Godina Rocio, C. y Mendoza Adalberto, B. y Cruz Lidia Rosaura, S. y Heya Maginot, N. y Villa, F. y Ex-Hacienda, C. y Canad a, E. y Le on, N. (2020). Agronomic biofortification with selenium in tomato crops (*Solanum lycopersicon* L. Mill). *Agriculture* 2020, Vol. 10, Page 486, 10, 486. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10100486>
- Qiao, S. y Tao, Y. y Shan, Q. y Wang, J. y Chai, T. y Gong, S. y Qiao, K. (2021). Physiological and gene expression responses of six annual ryegrass cultivars to cobalt, lead, and nickel stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 13583. <https://doi.org/10.3390/ijms222413583>
- Quinet, M. y Angosto, T. y Yuste-Lisbona, F. J. y Blanchard-Gros, R. y Bigot, S. y Martinez, J. P. y Lutts, S. (2019). Tomato fruit development and metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1554. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01554>
- Radi, A. A. y Farghaly, F. A. y Al-Kahtany, F. A. y Zaher, A. M. y Hamada, A. M. (2025). Cobalt-induced oxidative stress and defense responses of *Adhatoda vasica* proliferated shoots. *BMC Plant Biology*, 25, 132. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-05915-7>
- Raiola, A. y Tenore, G. C. y Barone, A. y Frusciante, L. y Rigano, M. M. (2015). Vitamin E content and composition in tomato fruits: Beneficial roles and bio-fortification. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 29250–29264. <https://doi.org/10.3390/IJMS161226163>
- Raza, B. y Hameed, A. y Saleem, M. Y. (2022). Fruit nutritional composition, antioxidant and biochemical profiling of diverse tomato (*Solanum lycopersicum* L.) genetic resource. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1035163. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1035163>
- Rehman, A. y Khan, S. y Sun, F. y Peng, Z. y Feng, K. y Wang, N. y Jia, Y. y Pan, Z. y He, S. y Wang, L. y Qayyum, A. y Du, X. y Li, H. (2024). Exploring the nano-wonders: unveiling the role of nanoparticles in enhancing salinity and drought tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1324176. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1324176>

- Roco, M. C. (2011). The long view of nanotechnology development: The national nanotechnology initiative at 10 years. *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 427–445. <https://doi.org/10.1007/S11051-010-0192-Z/TABLES/7>
- Salam, A. y Rehman, M. y Qi, J. y Khan, A. R. y Yang, S. y Zeeshan, M. y Ulhassan, Z. y Afridi, M. S. y Yang, C. y Chen, N. y Fan, X. y Gan, Y. (2024). Cobalt stress induces photosynthetic and ultrastructural distortion by disrupting cellular redox homeostasis in maize. *Environmental and Experimental Botany*, 217, 105562. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2023.105562>
- Salehi, B. y Sharifi-Rad, R. y Sharopov, F. y Namiesnik, J. y Roointan, A. y Kamle, M. y Kumar, P. y Martins, N. y Sharifi-Rad, J. (2019). Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health: An overview. *Nutrition*, 62, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.01.012>
- Salem, S. S. (2023). A mini review on green nanotechnology and its development in biological effects. *Arch Microbiol*, 205, 128. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03467-2>
- Santanu S y Singh A y Roychoudhury A. (2020). Involvement of sulfur in the regulation of abiotic stress tolerance in plants. In Aryadeep Roychoudhury & Durgesh Kumar Tripathi (Eds.), *Protective chemical agents in the amelioration of plant abiotic stress: Biochemical and Molecular Perspectives* (pp. 437–466). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119552154.ch22>
- Santos Aracena, S. y Biraku, X. y Nielsen, E. y Caglar Ozketen, A. y Andac Ozketen, A. y Esref Hakki, E. (2024). Agricultural nanotechnology for a safe and sustainable future: current status, challenges, and beyond. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105, 3159–3169. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13922>
- Saritha, G. N. G. y Anju, T. y Kumar, A. (2022). Nanotechnology - big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture? *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100457. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2022.100457>
- Sarraf, M. y Janeeshma, E. y Arif, N. y Qudrat Ullah Farooqi, M. y Kumar, V. y Ansari, N. A. y Ghani, M. I. y Ahanger, M. A. y Hasanuzzaman, M. (2023). Understanding

- the role of beneficial elements in developing plant stress resilience: Signalling and crosstalk with phytohormones and microbes. *Plant Stress*, *10*, 100224. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2023.100224>
- Schiavon, M. y Nardi, S. y dalla Vecchia, F. y Ertani, A. (2020). Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil*, *453*, 245–270. <https://doi.org/10.1007/S11104-020-04635-9>
- Scott, k. J. (2001). Detection and Measurement of Carotenoids by UV/VIS Spectrophotometry. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, *1*, F2.2.1-F2.2.10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0202s00>
- Sembada, A. A. y Wuled Lenggoro, I. (2024). Transport of nanoparticles into plants and their detection methods. *Nanomaterials*, *14*, 131. <https://doi.org/10.3390/nano14020131>
- Seregin, I. V. y Kozhevnikova, A. D. (2023). Phytochelatins: Sulfur-containing metal(loid)-chelating ligands in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(3), 2430. <https://doi.org/10.3390/ijms24032430>
- Shahzad, R. y Jamil, S. y Ahmad, S. y Nisar, A. y Khan, S. y Amina, Z. y Kanwal, S. y Aslam, H. M. U. y Gill, R. A. y Zhou, W. (2021). Biofortification of cereals and pulses using new breeding techniques: Current and future perspectives. *Frontiers in Nutrition*, *8*, 721728. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.721728>
- Shiriaev, A. y Pezzarossa, B. y Rosellini, I. y Malorgio, F. y Lampis, S. y Ippolito, A. y Tonutti, P. (2022). Efficacy and comparison of different strategies for selenium biofortification of tomatoes. *Horticulturae*, *8*, 800. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8090800>
- Silva-Marrufo, O. y Ortega-Ramirez, A. T. y Alaniz-Villanueva, O. G. y Herrera-Gamboa, J. y Marin-Tinoco, R. I. y Hurtado-Salazar, A. y Garcia-Andrade, M. (2024). Cobalt oxide nanoparticles and their effect on melon (*cucumis melo* L.) yield and quality. *Notulae Scientia Biologicae*, *13*(4), 12175. <https://doi.org/10.15835/nsb16412175>

- Son, J. E. y Savvas, D. y Choi, H. G. y Lu, C. y Oh, S. y Cave, G. (2021). Vitamin B 12 (cobalamin) and micronutrient fortification in food crops using nanoparticle technology. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 668819. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.668819>
- Sorahinobar, M. y Deldari, T. y Nazem Bokaei, Z. y Mehdinia, A. (2022). Effect of zinc nanoparticles on the growth and biofortification capability of mungbean (*Vigna radiata*) seedlings. *Biologia*, *78*, 951–960. <https://doi.org/10.1007/S11756-022-01269-3>
- Sorahinobar, M. y Saadati, F. y Khaksar, S. (2024). Zinc oxide nanoparticle biofortification of lentil seedlings enhances plant growth and zinc bioavailability in rats. *Scientific Reports*, *14*, 24708. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-74653-5>
- Steiner, A. A. (1961). Steiner, A.A. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant soil. *Plants Soil*, 134–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Sun, Y. y Zhu, G. y Zhao, W. y Jiang, Y. y Wang, Q. y Wang, Q. y Rui, Y. y Zhang, P. y Gao, L. (2022). Engineered nanomaterials for improving the nutritional quality of agricultural products: A review. *Nanomaterials*, *12*, 4219. <https://doi.org/10.3390/NANO12234219>
- Thiel, A. y Drews, F. y Pirritano, M. y Schumacher, F. y Michaelis, V. y Schwarz, M. y Franzenburg, S. y Schwerdtle, T. y Michalke, B. y Kipp, A. P. y Kleuser, B. y Simon, M. y Bornhorst, J. (2024). Transcriptomics pave the way into mechanisms of cobalt and nickel toxicity: Nrf2-mediated cellular responses in liver carcinoma cells. *Redox Biology*, *75*, 103290. <https://doi.org/10.1016/J.REDOX.2024.103290>
- Townsend, J. R. y Kirby, T. O. y Marshall, T. M. y Church, D. D. y Jajtner, A. R. y Esposito, R. (2023). Foundational nutrition: implications for human health. *Nutrients*, *15*, 2837. <https://doi.org/10.3390/nu15132837>
- Tripathi, S. y Mahra, S. y Tiwari, K. y Rana, S. y Kumar Tripathi, D. y Sharma, S. y Sahi, S. (2023). Recent advances and perspectives of nanomaterials in agricultural

- management and associated environmental risk: A review. *Nanomaterials*, *13*, 1604. <https://doi.org/10.3390/nano13101604>
- Tu, Z. y Yang, J. y Fan, C. (2024). The role of different nutrients in the prevention and treatment of cardiovascular diseases. *Frontiers in Immunology*, *15*, 1393378. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1393378>
- Tvermoes, B. E. y Unice, K. M. y Paustenbach, D. J. y Finley, B. L. y Otani, J. M. y Galbraith, D. A. (2014). Effects and blood concentrations of cobalt after ingestion of 1 mg/d by human volunteers for 90 d. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *99*, 632–646. <https://doi.org/10.3945/AJCN.113.071449>
- Upadhayay, V. K. y Chitara, M. K. y Mishra, D. y Jha, M. N. y Jaiswal, A. y Kumari, G. y Ghosh, S. y Patel, V. K. y Naitam, M. G. y Singh, A. K. y Pareek, N. y Taj, G. y Maithani, D. y Kumar, A. y Dasila, H. y Sharma, A. (2023). Synergistic impact of nanomaterials and plant probiotics in agriculture: A tale of two-way strategy for long-term sustainability. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1133968. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2023.1133968>
- van Ginkel, M. y Cherfas, J. (2023). What is wrong with biofortification. *Global Food Security*, *37*. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100689>
- Vélez-Terreros, P. Y. y Romero-Estévez, D. y Navarrete, H. y Yáñez-Jácome, G. S. (2024). Nutritional quality of conventional, organic, and hydroponic tomatoes commercialized in Quito, Ecuador. *Foods*, *13*(9), 1348. <https://doi.org/10.3390/FOODS13091348/S1>
- Wa Lwalaba, J. L. y Zvogbo, G. y Mulembo, M. y Mundende, M. y Zhang, G. (2017). The effect of cobalt stress on growth and physiological traits and its association with cobalt accumulation in barley genotypes differing in cobalt tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, *40*, 2192–2199. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346676>
- Wahlqvist, F. y Bryngelsson, I. L. y Westberg, H. y Vihlborg, P. y Andersson, L. (2020). Dermal and inhalable cobalt exposure—Uptake of cobalt for workers at Swedish hard metal plants. *PLoS ONE*, *15*(8). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0237100>

- Wang y Tariq, T. y Mahmood, F. y Ghorbanpour, M. y Mustafa, G. y Hasan, M. (2025). A nano-bioengineered cobalt oxide biostimulant mediated regulation of physiological, biochemical, and antioxidant mechanisms in *Zea mays*. *Scientific Reports*, *15*, 16140. <https://doi.org/10.1038/S41598-025-01020-3>
- Wang, Z. y Le, X. y Cao, X. y Wang, C. y Chen, F. y Wang, J. y Feng, Y. y Yue, L. y Xing, B. (2022). Triiron tetrairon phosphate ($\text{Fe}_7(\text{PO}_4)_6$) nanomaterials enhanced flavonoid accumulation in tomato fruits. *Nanomaterials*, *12*(8), 1341. <https://doi.org/10.3390/NANO12081341/S1>
- Włodarczyk, K. y Smolińska, B. y Majak, I. (2022). Tomato allergy: The characterization of the selected allergens and antioxidants of tomato (*Solanum lycopersicum*)-A review. *Antioxidants*, *11*, 644. <https://doi.org/10.3390/antiox11040644>
- Włodarczyk, K. y Smolińska, B. y Majak, I. (2023). The antioxidant potential of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) under nano-ZnO treatment. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*, 11833. <https://doi.org/10.3390/IJMS241411833>
- Xia, K. y Wang, Y. y Zhang, L. y Tang, L. y Zhang, G. y Huang, T. y Huang, N. y Fan, D. (2022). Dietary-derived essential nutrients and amyotrophic lateral sclerosis: a two-sample mendelian randomization study. *Nutrients*, *14*(5), 920. <https://doi.org/10.3390/NU14050920/S1>
- Yu, Z. y Dahlgren, R. A. (2000). Evaluation of methods for measuring polyphenols in conifer foliage. *Journal of Chemical Ecology*, *26*, 2119–2140. <https://doi.org/10.1023/A:1005568416040>