

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



LOS MICROELEMENTOS Fe, Cu Y Zn EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD
NUTRACÉUTICA DEL TOMATE EN INVERNADERO

Tesis

Que presenta MARTHA SANTIS SANTIS
como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA PROTEGIDA

Saltillo, Coahuila

Febrero 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



LOS MICROELEMENTOS Fe, Cu Y Zn EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD
NUTRACÉUTICA DEL TOMATE EN INVERNADERO

Tesis

Que presenta MARTHA SANTIS SANTIS
como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA PROTEGIDA

Dr. Marcelino Gabreña De la Fuente
Director de tesis

Dra. Hortensia Ortega Ortiz
Director externo

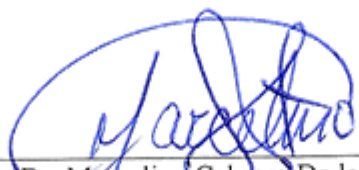
Saltillo, Coahuila


Febrero 2020

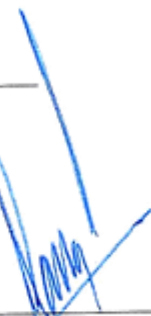
LOS MICROELEMENTOS Fe, Cu Y Zn EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD
NUTRACÉUTICA DEL TOMATE EN INVERNADERO


Tesis


Elaborada por MARTHA SANTIS SANTIS como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA PROTEGIDA con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Asesor Principal


Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor


Dra. Hortensia Ortega Ortiz
Asesor


Dr. Armando Robledo Olivo
Asesor


Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Febrero 2020

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** *MI ALMA TERRA MATER*, por proporcionarme las herramientas necesarias para poder terminar el Doctorado en Agricultura Protegida.

A mi Comité de Asesoría, por su apoyo durante la realización del presente trabajo de tesis.

Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente

Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Dr. Alberto Sandoval Rangel

Dra. Hortensia Ortega Ortiz

Dr. Robledo Olivo Armando

A los técnicos LOS TÉCNICOS

Al técnico académico **Martina de la Cruz Casillas** por su apoyo en el laboratorio durante mi estancia en el doctorado.

A **Juan Manuel Ramírez Cerda** por su apoyo durante el doctorado.

Al Dr. **Germán Alvarado Tenorio** por su apoyo en la digestión ácida de las muestras de tomate.

Al LCQ. **Alejandro Espinoza Muñoz** por la determinación de los minerales por espectroscopía de absorción por inducción de plasma (ICP).

¡GRACIAS!

DEDICATORIA

A DIOS:

Que es el principal motor de mi vida y de todos mis seres queridos.

A MIS PADRES

Julieta Santis Méndez, para la mujer que más admiro, quien me ha dado los mejores años de su vida, agradecida con ella por ayudarme a cumplir una meta más.

Rodolfo Santis Méndez, por su esfuerzo y trabajo, quien le agradezco el tiempo brindado.

A MIS HERMANOS:

Rodolfo y Carolina, muchas gracias por su apoyo incondicional

A MIS HIJAS:

Karla y Sofía, por ser en mi vida la principal razón para ser una mejor persona y profesionalista.

A MI ESPOSO:

Moisés Felipe Victoriano por su paciencia y amor brindado a lo largo de estos nueve años juntos.

Carta de aceptación de los artículos



Solicitud de información 1822-19

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

Estimado doctor Cabrera De la Fuente

Buenas tardes, por instrucción de la Dra. Sangermán-Jarquín, Editora en Jefa de la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, me permito solicitar a usted nos proporcione la siguiente información sobre la literatura citada del manuscrito titulado: **“Rendimiento agronómico del jitomate suplementado con microelementos Fe, Cu y Zn”**, que será publicado en el Volumen 10 Número 6 2019.

Espero su respuesta a más tardar el día **28 de agosto del presente año**.

Saludos cordiales,

Lic. Irais Alvarado Pérez
Asistente editorial

Dra. Dora M. Sangerman-Jarquín
Editora en Jefa de la Revista
Mexicana de Ciencias Agrícolas

Campo Experimental Valle de México
Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13.5
Coatlinchan, Texcoco, Edo. de México, México
C. P. 56250. Tel. 55 38 71 87 00 Ext. 85353

Envió del segundo artículo

Dr. Enrique Márquez Ríos biotecnia@ciencias.uson.mx a través
de biotecnia.unison.mx

Martha Santis Santis:

Gracias por enviar el manuscrito, "BIOFORTIFICACIÓN DEL CULTIVO DEL TOMATE CON Fe, Cu Y Zn Y SU INTERACCIÓN EN LA CALIDAD NUTRACÉUTICA DEL FRUTO" a Biotecnia. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial:

URL del manuscrito:

<https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/author/submission/1145>

Nombre de usuario/a: `sasm891113`

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Dr. Enrique Márquez Ríos

Biotecnia

Universidad de Sonora

INTRODUCCIÓN

El tomate es una de las principales hortalizas, fuente de alimento para la población mundial debido a su gran consumo y propiedades antioxidantes (Tomas *et al.*, 2017). Los frutos de tomate contienen vitamina A, C y E, fitoquímicos como licopeno, flavonas, compuestos fenólicos totales, estos antioxidantes ayudan a retardar la oxidación por la captación de radicales libres (Luna-Guevara y Delgado-Alvarado, 2014). Los tomates son ricos en antioxidantes de gran importancia debido a sus propiedades relacionadas con la salud, evidencias epidemiológicas sugieren que los fitoquímicos como carotenoides y fenólicos reducen el riesgo de diversas enfermedades crónicas como enfermedades cardiovasculares, algunos tipos de cáncer, como el cáncer de próstata (Yashin *et al.*, 2017).

Existen diversos factores que afectan la calidad del fruto de tomate entre ellos se encuentran el genotipo cultivado, condiciones ambientales (luz, temperatura, humedad y pH) y fertilización empleada (Islam *et al.*, 2018). La fertilización se ha usado para mejorar la calidad nutricional de la producción, utilizado para consumo humano, empleándose con mayor frecuencia para lo que actualmente se conoce como Biofortificación (Hernández-Hernández *et al.*, 2019).

Los microelementos Fe, Zn y Cu son esenciales para la planta y cofactores enzimáticos, que participan en la síntesis de antioxidantes (Filipek-Mazur *et al.*, 2019), los cuales contribuyen a la eliminación de radicales libres (Shi *et al.*, 2017), ante el daño oxidativo las células han desarrollado mecanismos enzimáticos y no enzimáticos para reducir los efectos dañinos, en el mecanismo enzimático incluye actividades de SOD, CAT, POD, APX, glutatión reductasa (GR) y glutatión peroxidasa (GPX) (Da Costa y Sharma, 2016), mientras que los antioxidantes no enzimáticos incluyen compuestos de bajo peso molecular como la vitamina C y E y β -caroteno (Ozougwu, 2016).

El hierro es un elemento esencial para las plantas y necesario para el funcionamiento adecuado de procesos metabólicos y enzimáticos relacionados con el transporte de electrones, la fijación de nitrógeno, la síntesis de ácido desoxirribonucleico (ADN) y la síntesis de hormonas, activador de muchas enzimas participa en la síntesis del ácido abscísico y la eliminación de radicales libres de oxígeno (Shi *et al.*, 2018), por su parte el cobre, puede ceder o aceptar electrones, esta característica lo hace un cofactor importante y eliminador de radicales libres, participa en el metabolismo celular y

forma parte estructural de la enzima Cu-SOD, el cual, cataliza la descomposición del superóxido en oxígeno y peróxido de hidrógeno en el citosol (Migocka y Malas, 2018).

El zinc participa en la homeostasis de especies reactivas de oxígeno, regula funciones celulares importantes como la defensa ante el ataque, participa en la señalización durante la sequía y otras tenciones abióticas, el Zn también puede ayudar a aumentar la biosíntesis de clorofilas y carotenoides y mejorar el aparato fotosintético de la planta (Singh *et al.*, 2017).

La fertilización juega un papel importante en el cultivo de tomate, ya que con frecuencia puede afectar la composición química del fruto, por ello se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

Evaluar la producción y calidad nutracéutica del cultivo de tomate cultivado con solución nutritiva, adicionada con tres concentraciones diferentes de Fe, Cu y Zn bajo invernadero.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto suplementario en tres concentraciones de los microelementos Fe, Cu y Zn en el rendimiento del tomate.
- Evaluar la calidad comercial y nutracéutica de los frutos de tomate
- Estudiar un programa de biofortificación mediante la aplicación de diferentes concentraciones de Fe, Cu y Zn durante el periodo de crecimiento de las plantas de tomate y su efecto en la capacidad antioxidante y contenidos enzimáticos.

Hipótesis

La producción y calidad nutracéutica son afectados de manera positiva por la adición de Fe, Cu y Zn y el nivel de estos en la solución nutritiva.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia del tomate en la salud

El tomate es una de las principales hortalizas a nivel mundial, considerado una fuente importante de antioxidantes, de vitamina A, C y E, β -caroteno y licopeno, otros carotenoides como α y β -criptoxantina, α -caroteno, fitoeno y fitofloeno. La vitamina C, a veces llamado ácido ascórbico es un antioxidante hidrosoluble más efectivo presente en el plasma, atrapa y reduce nitritos; evitando la formación de compuestos carcinogénicos N- nitrosos. La vitamina C es conocido como un antioxidante importante, relacionado con la protección contra enfermedades cardiovasculares, también se ha demostrado que ejerce un efecto protector contra el daño oxidativo de los constituyentes celulares y lipoproteínas circulantes (Martí *et al.*, 2018). El licopeno constituye más del 80 % del total de carotenoides del fruto de tomate completamente maduro, mientras que el β -caroteno el 7% y el contenido de vitamina C en tomate es de 14 mg/100 g, esto es significativo por su elevado consumo (Tilahun *et al.*, 2017).

El consumo de frutos de tomate provee beneficios a la salud debido a que está relacionado con la prevención de enfermedades carcinogénicas y cardiovasculares. El tomate es fuente de β carotenos, evita el daño celular, es considerado un alimento de alto valor nutricional, que no contiene colesterol, ricos en fibras y proteínas y bajo en calorías, también, se ha comprobado que el consumo de salsa de tomate reduce el daño en el ADN en los glóbulos blancos y tejidos cancerosos de próstata, páncreas y estómago (Manoharan *et al.*, 2017) provocado por especies reactivas de oxígeno (ROS) y radicales libres. Las ROS más conocidos son los aniones superóxido (O_2^-), radical hidroxilo (OH \cdot), radical libre óxido nítrico (NO \cdot), peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y oxígeno singulete 1O_2 (Sağlam *et al.*, 2016). Los antioxidantes son moléculas que neutralizan los radicales libres aceptando o donando electrones, además de la vitamina C también existen enzimas encargadas de neutralizar los radicales libres, enzimas como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y glutatión peroxidasa (GPX) (Islam *et al.*, 2018).

Con la ingesta diaria de jugo de tomate se encontró mayor concentración de carotenoides, por lo tanto, mayor protección antioxidante celular. Otro estudio también informó que la ingesta regular de bebida de tomate tuvo un efecto modesto en la producción de mediadores inflamatorios (Owusu *et al.*, 2015).

Factores que afectan la calidad nutraceutica del tomate.

El hierro, zinc y cobre son absorbidos por las plantas que pueden tener efectos beneficiosos sobre la salud, mejorando la calidad de vida, necesarios tanto para plantas como animales y humanos. Como las plantas absorben estos microelementos, los humanos pueden obtenerlo de las partes comestibles estas planas. Algunos factores que afectan la calidad del fruto de tomate son, el genotipo cultivado, las condiciones ambientales del tomate, los cuales pueden ser intensidad de luz, pH del sustrato, temperatura, frecuencia de riego, otro factor importante es la fertilización empleada (tipo y momento de aplicación), que influyen en el contenido de nutrientes (Islam *et al.*, 2018). El contenido de antioxidantes en los tomates también se ve influenciado por el estado de madurez de los frutos, debido a que involucra cambios metabólicos, modificando el aspecto y atributos de calidad de la fruta. Las alteraciones metabólicas abarcan cambios en los contenidos de clorofilas y carotenoides (Owusu *et al.*, 2015). Factores como la humedad, la temperatura influyen, reduciendo los contenidos de licopeno. La temperatura afecta las estructuras celulares, que determinan la calidad de la fruta, como el color, el tamaño y las propiedades organolépticas. Las altas temperaturas aceleran el desarrollo del fruto y reducen el tiempo necesario para su madurez. El rango óptimo de temperatura para la formación de licopeno se encuentra entre 12 y 32 ° C; los niveles óptimos varían según la variedad, otras condiciones ambientales y de crecimiento de las plantas de tomate. El rango de temperatura ideal para la formación de licopeno es de 20 a 24 ° C en el día y 18 ° C por la noche, para mejorar la síntesis de licopeno en temperaturas altas es mejor denso follaje para proteger la fruta, tanto las temperaturas altas (>30 ° C) como las bajas (< 12 ° C) afectan la síntesis de licopeno. Los contenidos de licopeno también pueden disminuir en condiciones de invernadero en comparación con campo abierto, en el caso del ácido ascórbico, ha altas temperaturas aumenta su contenido; la humedad relativa adecuadas para las plantas de tomate es entre 65 a 75 % durante la noche y 80 a 90 % durante el día, en condiciones de humedad baja (15 a 22 %) afecta la relación fotosintética provocado por el cierre de estomas, como consecuencia hay una reducción del crecimiento de las plantas, el tamaño del fruto y la producción total, mientras, que en condiciones de alta humedad hay una disminución en la transpiración de las plantas y una disminución en la absorción de nutrientes (Tilahun *et al.*, 2017).

Los tomates cultivados en invernadero sufren menos impactos de las condiciones ambientales en comparación con las cultivadas en campo, sin embargo, la radiación

solar durante las estaciones del año puede afectar el contenido de azúcares totales y los componentes antioxidantes de los tomates cultivados en invernadero. El nivel de antioxidantes en los tomates cultivados en invernadero y los tomates cultivados en el campo puede variar debido a la relativamente menor radiación ultravioleta recibida por los tomates cultivados en invernadero. También la exposición a la luz ha logrado incrementar la acumulación de ácido ascórbico en frutas de tomate, por el contrario, el licopeno se oxida a la exposición a la luz. La radiación solar intensa inhibe la síntesis de licopeno y la baja intensidad de la luz reduce la síntesis de pigmentos, lo que genera plantas con decoloración desigual, de manera que los frutos sombreados presentan menor contenido de carotenoides (Luna-Guevara y Delgado-Alvarado, 2014).

El estado de madurez también incluye en la producción de licopeno, azúcares solubles, ácidos orgánicos y compuestos volátiles determinando el sabor del tomate. Hay un aumento en los sólidos solubles totales y una disminución en la acidez titulable durante la maduración del tomate. El ácido cítrico es el principal ácido orgánico responsable de la acidez de los tomates y disminuye conforme al estado de madurez de verde a rojo, por ello, el licopeno se ha sugerido como un buen indicador de la etapa de maduración (Tilahun *et al.*, 2017).

Respuestas antioxidantes en plantas sometidas al estrés oxidativo inducido por Fe, Cu y Zn

La naturaleza y el alcance de la producción de ROS por un metal en particular depende principalmente de su carácter redox o no redox. Los metales redox como el Cu y el Fe pueden sufrir reacciones de Fenton que generan ROS. Las ROS, pueden inducir efectos, como la permeabilidad de las células a la membrana que conduce a la fuga de iones de potasio, la división de proteínas, la inactivación y el daño he incluso la rotura de la cadena de ADN. Las ROS inducen a estrés y daño oxidativo, por ello las plantas han desarrollado un mecanismo de desintoxicación, las enzimas, como el superóxido dismutasa y el ciclo glutatión-ascorbato. El estrés oxidativo es el aumento en la concentración en estado estacionario de especies reactivas de oxígeno (ROS) dentro de los compartimentos subcelulares de la célula vegetal que se derivan del metabolismo del oxígeno. El estrés oxidativo es generado primariamente debido a una disminución de las defensas antioxidantes, pero también por un incremento en la producción de radicales libres mediado por el hierro catalítico (Choudhury *et al.*, 2013).

El hierro es un cofactor de aproximadamente 140 enzimas que catalizan reacciones bioquímicas exclusivas formando parte de enzimas como citocromos, ferredoxina, SOD, CAT, peroxidasa y nitrato reductasa (Askary *et al.*, 2017). El hierro en el sistema enzimático participa en el balance de radicales libres en los organismos, en forma libre participa en la reacción Fenton y cataliza la generación del ascorbato peroxidasa, guaiacol-peroxidasa y ferro-superóxido dismutasa. El exceso de hierro altera el metabolismo de las plantas y el ciclo de nutrientes, lo que genera una reducción en el crecimiento, la floración y la fructificación (Krohling *et al.*, 2016). El hierro es parte de la estructura de la catalasa, el cual es encargado de catalizar la dismutación del H_2O_2 (generado en los peroxisomas) en agua y oxígeno molecular (Sofa *et al.*, 2015). Las aplicaciones hierro en plantas de *Solanum lycopersicum* var. Unicorn han logrado aumentar la vitamina C (Islam *et al.*, 2018).

El zinc es cofactor de más de 300 enzimas y es componente estructural de proteínas, incluida una gran cantidad de factores de transcripción (Marreiro *et al.*, 2017), regula la expresión de genes para tolerar el estrés biótico y abiótico (Ma *et al.*, 2017), modula la actividad de las enzimas implicadas en la homeostasis de ROS, además el zinc es componente estructural de la enzima SOD presente en el citoplasma de las células. El superóxido dismutasa tiene un centro activo con un ion de cobre y un ion de zinc. Esta enzima promueve la conversión de dos radicales superóxidos en peróxido de hidrógeno y oxígeno molecular, reduciendo la toxicidad de ROS porque convierte una especie altamente reactiva en una menos dañina, por ello mantener concentraciones adecuadas de zinc en los compartimentos celulares es esencial para el correcto funcionamiento del sistema de defensa antioxidante, otro mecanismo por el cual el zinc actúa como antioxidante es al afectar la expresión de glutamato-cisteína ligasa, que es la enzima limitante de la síntesis de glutatión, lo cual tiene un doble efecto del zinc para neutralizar los radicales libres directamente por glutatión o indirectamente como cofactor de glutatión peroxidasa (Marreiro *et al.*, 2017).

El Cobre tiene la capacidad de aceptar y donar electrones, por ello es un cofactor ideal para 30 enzimas y un buen eliminador de radicales libres, en plantas, las proteínas que contienen Cu y las enzimas dependientes de Cu son conocidas como cuproenzimas siendo pieza importante en el metabolismo celular, estas enzimas incluye, la citocromo C oxidasa mitocondrial, que cataliza la reducción de oxígeno molecular al agua (un paso clave en la síntesis de ATP durante la respiración), la enzima antioxidante superóxido dismutasa de tipo Cu / Zn (SOD), que cataliza la descomposición del

superóxido radicales en el citosol y cloroplastos de las células vegetales (Migocka y Malas, 2018). El microelemento Cu, en exceso causa la generación de ROS los niveles de H_2O_2 incrementan modificando el estado redox de la célula por lo que, aumenta la producción de antioxidantes y la activación de mecanismos antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Sağlam *et al.*, 2016). Las enzimas antioxidantes como SOD, peroxidasa (POX) y CAT están involucradas en la eliminación de ROS. La SOD cataliza la dismutación de superóxido a H_2O_2 y oxígeno molecular, por su parte CAT dismuta H_2O_2 en H_2O y O_2 , mientras que POX descompone H_2O_2 por oxidación de cosustratos, como compuestos fenólicos y antioxidantes. Se ha observado que en plantas de *Solanum cheesmaniae* tratadas con Cu, presentaron un aumento en los fenoles totales en un 43% y 24% en brotes y raíces, respectivamente y los niveles de flavonoides se incrementaron en un 107% en las raíces (Branco-Neves *et al.*, 2017).

ARTÍCULOS

Rendimiento agronómico del jitomate suplementado con microelementos Fe, Cu y Zn

Martha Santis Santis¹

Marcelino Cabrera De la Fuente^{1§}

Adalberto Benavides Mendoza¹

Alberto Sandoval Rangel¹

Hortensia Ortega Ortíz²

Armando Robledo Olivo¹

¹Departamento de Horticultura-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25315. (santissantism@gmail.com; abenmen@gmail.com; sandovalr16@gmail.com; armando.robledo@outlook.com). ²Centro de Investigación en Química Aplicada. Enrique Reyna H. núm. 140, San José de los Cerritos, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25294. (hortensia.ortega@ciqa.edu.mx).

§Autor para correspondencia: cafum7@yahoo.com.

Resumen

El jitomate es una de las hortalizas de mayor importancia a nivel mundial, por lo que, conocer el manejo en la nutrición y su interacción en el rendimiento agronómico es importante. El experimento se realizó en un invernadero de baja tecnología, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con el objetivo de determinar el efecto suplementario en diferentes concentraciones de los microelementos Fe, Cu y Zn en el rendimiento agronómico del cultivo de jitomate. Se evaluaron tres factores que

consistieron en las aplicaciones suplementarias de fertilizantes a base de Fe, Cu y Zn y dos niveles de concentración para cada caso, además del tratamiento testigo (dosis normal de la solución nutritiva Steiner). Los tratamientos fueron evaluados mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 x 2, con 16 repeticiones por tratamiento. Las dosis bajas de Zn superaron al testigo 27.3% en la variable vitamina C, mientras que, en los sólidos solubles totales, área foliar (AF), relación área foliar (RAF) y área foliar específica (AFE) los niveles altos de Fe superaron al testigo en un 16.4%, 138%, 112% y 44%, respectivamente; sin embargo, en el rendimiento las dosis altas de Cu superaron al testigo 36%.

Palabras clave: hierro, cobre, micronutrientes, solución nutritiva, zinc.

Recibido: junio de 2019

Aceptado: agosto de 2019.

Introducción

El jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es una de las hortalizas importantes en México, ocupando la novena posición en producción (SIAP, 2016), por lo que un manejo inadecuado en la nutrición del cultivo puede disminuir los rendimientos, provocando cambios fisiológicos, morfológicos y bioquímicos que afectan negativamente, los cuales afectan la tasa fotosintética, la superficie radicular por problemas de adsorción y por consiguiente un escaso crecimiento aéreo de las plantas. Los nutrientes juegan un papel importante en el aumento de la productividad y calidad en los cultivos modificando el entorno de las plantas (Briat y Gaymard, 2015).

Aunque los microelementos hierro, zinc, cobre, molibdeno, boro, manganeso y cloro son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas son utilizados en cantidades menores que los macroelementos (Soetan *et al.*, 2010), actuando como catalizadores enzimáticos promoviendo las reacciones químicas (Sathiyamurthy *et al.*,

2017). El Fe, Cu y Zn son importantes en la producción de biomasa y calidad de hortalizas (Briat y Gaymard, 2015), por lo que una deficiencia en cualquiera de ellos puede cambiar la estructura del cloroplasto, disminuir la fotosíntesis y modificar el transporte de electrones en PSI y PSII (Eberhard *et al.*, 2008), el Zn es un activador enzimático y produce cambios en el metabolismo de la planta incluyendo afectación en la síntesis de carbohidratos, proteínas, auxinas y daños en la integridad de la membrana (Kyrkby y Römheld, 2008).

Por su parte el Cu desempeña un papel importante en la fotosíntesis, respiración, desintoxicación de radicales superóxidos y lignificación (Perea *et al.*, 2010), además participa en diversos procesos fisiológicos, como la distribución de carbohidratos, la reducción y fijación de N, el metabolismo de las proteínas, entre otras (Lin y Jin, 2018).

El Fe participa en procesos fisiológicos como la biosíntesis de clorofila, respiración y reacciones redox (Rui *et al.*, 2016). El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto suplementario en diferentes concentraciones de los microelementos Fe, Cu y Zn en el rendimiento agronómico del cultivo de jitomate.

Materiales y métodos

Ubicación del experimento

El experimento se realizó en invernadero de baja tecnología, perteneciente al Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, localizada en 25° 23'' latitud norte y 101° 01'' longitud oeste a 1 743 msnm, en el interior de la estructura se registraron temperaturas que oscilaron entre 26 a 30 °C. La variedad utilizada fue el jitomate comercial Río Grande, el cuál es tipo saladette de crecimiento determinado, la siembra se efectuó en charolas de poliestireno expandido de 200 cavidades, con sustrato *peat moss* marca premier del fabricante Green forest México, como mezcla para

germinación, 30 días posteriores a la emergencia, se trasplantó, utilizando una mezcla de *peat mos*-perlita en una proporción 75%-25%, respectivamente, en bolsas de polietileno con capacidad de 10 litros.

Manejo agronómico

La nutrición del cultivo consistió en aplicaciones de solución nutritiva de acuerdo a la etapa fenológica de las plantas (Cuadro 1), adicionando de manera suplementaria los micronutrientes Zn, Fe y Cu en dos dosis de cada uno como promotores de calidad nutracéutica en el cultivo (Cuadro 2). Se utilizó la solución nutritiva propuesta por Steiner (1961) respecto al método universal.

Cuadro 1. Concentraciones de la solución nutritiva Steiner aplicada por etapa fenológica en el cultivo de jitomate.

Etapa fenológica	Concentración
Inicio de crecimiento vegetativo	25%
Crecimiento vegetativo pleno	50%
Floración y crecimiento de frutos	75%
Llenado de frutos y cosecha	100%

Cuadro 2. Tratamientos y dosis de Fe, Cu y Zn en la solución Steiner en el cultivo de jitomate.

Tratamientos	Descripción
1	Solución Steiner
2	Solución Steiner -10% de Fe
3	Solución Steiner + 10% de Fe
4	Solución Steiner -10% de Cu
5	Solución Steiner + 10% de Cu
6	Solución Steiner -10% de Zn
7	Solución Steiner + 10% de Zn

Fe= hierro; Zn= zinc; y Cu= cobre.

El manejo fitosanitario consistió en la aplicación de fungicidas como el Tiabendazol (Tecto 60) en dosis de 2 kg ha⁻¹, Mancozeb (mancozeb nufarm 800 WP) en dosis de 0.5 kg ha⁻¹ e hidróxido cúprico (Cuperhidro) en dosis de 2 L ha⁻¹, por intervalos de 8 días desde la producción de plántulas hasta el crecimiento de frutos, intercalando productos químicos para evitar resistencia.

El riego fue manual realizándose dos por día y el suministro se realizó en función a la etapa fenológica del cultivo y de las condiciones ambientales del interior del invernadero. La solución nutritiva Steiner al igual que los tratamientos se aplicaron una vez por semana. Para la conducción del cultivo, se utilizó un sistema de tutoreo, el cual se colocó a los 15 días después del trasplante, donde se condujo la planta a un tallo, con una densidad de dos plantas por metro cuadrado.

Variables evaluadas

Las variables firmeza, sólidos solubles totales, vitamina C y pH se tomaron cuando los frutos de jitomate se encontraban en estado de madurez comercial de acuerdo a la clasificación de Castro et al. (2009) correspondiente al número cuatro presentando una coloración roja en 30% y menos de 60% de la superficie del fruto. Del primer corte se tomaron cinco frutos por tratamiento, para medir la firmeza en frutos se utilizó un penetrómetro marca Margner punta de 8 mm, para la determinación de los grados Brix se usó un refractómetro modelo HI 96801 de Hanna Instruments Inc. (Woonsocket, Rhode Island, 02895, EUA), el pH se midió con un potenciómetro marca Hanna. El ácido ascórbico en los frutos se determinó de acuerdo con el método AOAC 967.21. La dinámica de producción de materia seca se determinó mediante dos muestreos destructivos, a los 37 y 80 días después del trasplante (DDT). En cada muestreo se cortaron tres plantas por tratamiento, a cada planta se le separaron los órganos vegetativos en tallos, hojas y raíz, la suma de ambos representó el peso total de la planta.

En hoja se determinó el área foliar con el medidor de área foliar marca LI 3000A. Los órganos vegetativos se secaron por separado en bolsas de papel estraza en una estufa de secado marca MAPSA modelo HDP 334 a una temperatura de 70 °C por 72 h, para estimar el peso seco de los mismo. La relación área foliar (RAF), área foliar específica (AFE), relación peso foliar (RPF), índice de área foliar (IAF) y tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se determinaron con los valores de materia seca y área foliar, los cuales se calcularon con los índices de crecimiento (Cuadro 3).

Cuadro 3. Fórmulas de índices de crecimiento de jitomate según Radford (1976); Hunt (1978).

Índice de crecimiento	Nombre	Fórmulas para valor medio	Unidades
Relación de área foliar	RAF	$\frac{\left(\frac{AF}{W1}\right) + \left(\frac{AF}{W2}\right)}{2}$	Área-Peso ⁻¹
Área foliar específica	AFE	$\frac{AF2}{W2}$	Área*Peso ⁻¹
Relación peso foliar	RPF	$\frac{PSAF}{PSPI}$	Peso*Peso ⁻¹
Índice de área foliar	IAF	$\frac{AF}{As}$	Adimensional
Tasa de crecimiento del cultivo	TCC	$\frac{1}{As} * \frac{W2 - W1}{T2 - T1}$	Peso*Área*Tiempo ⁻¹

AF= área foliar; As= área suelo; PSAF= peso seco del área foliar; PSPI= peso seco de la planta; W1= peso seco total inicial; W2= peso seco final; T= tiempo inicial; y T2= tiempo final.

El rendimiento se estimó en 10 plantas por tratamiento hasta el final de ciclo del cultivo, el primer corte se realizó 65 días después del trasplante, cada diez días se cosecharon los frutos en la etapa de madurez comercial, los frutos que presentaban un color rojo.

Diseño de los tratamientos

En el diseño de los tratamientos (Cuadro 4) fueron considerados tres factores que consistieron en las aplicaciones suplementarias de fertilizantes a base de hierro, cobre y zinc y dos niveles de concentración para cada caso, además del tratamiento testigo (solo solución nutritiva). Los tratamientos fueron evaluados mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 x 2, con 16 repeticiones por tratamiento totalizando 112 unidades experimentales, la separación de medias se hizo con la prueba LSD utilizando el paquete estadístico Infostat (2017).

Cuadro 4. Tratamientos y dosis de Fe, Cu y Zn en la solución Steiner en el cultivo de jitomate.

Tratamientos	Descripción
Testigo	Solución Steiner Normal
450 g de Fe/ ha	Solución Steiner -10% de Fe
550 g de Fe/ ha	Solución Steiner + 10% de Fe
0.71 g de Zn/ ha	Solución Steiner -10% de Cu
0.86 g de Zn/ ha	Solución Steiner + 10% de Cu
3.5 g de Fe/ ha	Solución Steiner -10% de Zn
4.2 g de Fe/ ha	Solución Steiner + 10% de Zn

Fe= hierro; Cu= cobre; y Zn= zinc.

Resultados y discusión

Para la calidad de fruto en las variables firmeza, pH y vitamina C no se observaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$); sin embargo, para la vitamina C el tratamiento con bajos niveles de Zn superó al testigo con 27.39%, en sólidos solubles totales (SST) si

hubo diferencias estadísticas. Los niveles altos de Fe fueron superiores 16.45% en comparación con el testigo, mientras que la deficiencia de Fe fue 5.62%.

Los resultados del presente trabajo fueron diferentes a los obtenidos por Valentinuzzi *et al.* (2015) quienes al someter al cultivo de fresa a una deficiencia de Fe, los grados Brix y firmeza de los frutos no fueron alterados, las dosis altas de Zn en SST superaron al testigo 15%, estos resultados coinciden con los obtenidos por López *et al.* (2018) quienes al aplicar $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ de este microelemento encontraron mayor concentración de SST y lo atribuyen a que el Zn es indispensable en la actividad enzimática en la fotosíntesis, metabolismo de los carbohidratos y transporte de azúcares hacia los puntos de demanda.

Los tres microelementos evaluados no mostraron diferencias estadísticas significativas en firmeza, pH y vitamina C, resultados similares fueron encontrados por Álvarez *et al.* (2003) quienes demostraron que en deficiencia de Fe no hubo diferencias en las variables de vitamina C, acidez y SST en *Prunus persica* cultivar Babygol. La variable de SST mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0.05$), donde los tratamientos con 550 g de Fe mostraron los mayores valores de grados Brix con 5.38 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Variables de firmeza, sólidos solubles totales, pH y vitamina C en frutos de jitomate variedad Río Grande.

Tratamientos	FIRMEZA	SST	PH	VTC
	(Libras)	(°Brix)		(mg/100g)
Testigo	8.50a ^Z	4.62ab	4.33a	12.63a
450g/ha Fe	9.56a	4.88ab	4.33a	11.67a
550g/ha Fe	8.94a	5.38a	4.35a	13.70a
3,5g/ha Zn	9.12a	4.26b	4.38a	16.09a
4,2g/ha Zn	9.44a	5.32ab	4.37a	15.78a
0,71g/ha Cu	9.00a	4.90ab	4.29a	15.81a
0,86 g/ha Cu	9.18a	5.18ab	4.58a	14.44a
E.E	0.51	0.38	0.16	1.61

Z= Medias con la misma letra son iguales de acuerdo con la prueba de LSD a una $p \leq 0.05$; EE= error estándar; VTC= vitamina C; SST= sólidos solubles totales; Fe= hierro; Cu= cobre; Zn= zinc; mg 100 g-1= miligramos por 100 gramos de fruto fresco.

El área foliar (AF) del cultivo de jitomate en ambas dosis de Fe se vieron afectadas significativamente, con una mayor área foliar en las dosis altas, superando al testigo en 138%, presentando un área foliar promedio de 2 917 cm², esto fue debido a que la baja concentración de Fe provocó una disminución en los contenidos de clorofila y otros componentes de los cloroplastos lo que disminuyó la capacidad de crecimiento del cultivo, resultados similares fueron encontrados por Incesu *et al.* (2015) en el cultivo de Mandarina; sin embargo, en las diferentes dosis de Zn y Cu fueron estadísticamente similares al testigo ($p \leq 0.05$)

Para las dosis de Zn, el testigo mostró una mayor área foliar seguido de las concentraciones altas, datos contrastantes fueron reportados por Haleema y Hussain

(2018) en cultivo de jitomate quienes demostraron que a mayor dosis de Zn mayor fue el área foliar. En Cu se observó que las dosis altas superaron al testigo 63% (Figura 1), dichos resultados contradicen a lo mencionado por Yruela (2005), quien menciona que las plantas con exceso de Cu regularmente presentan una disminución en la biomasa.

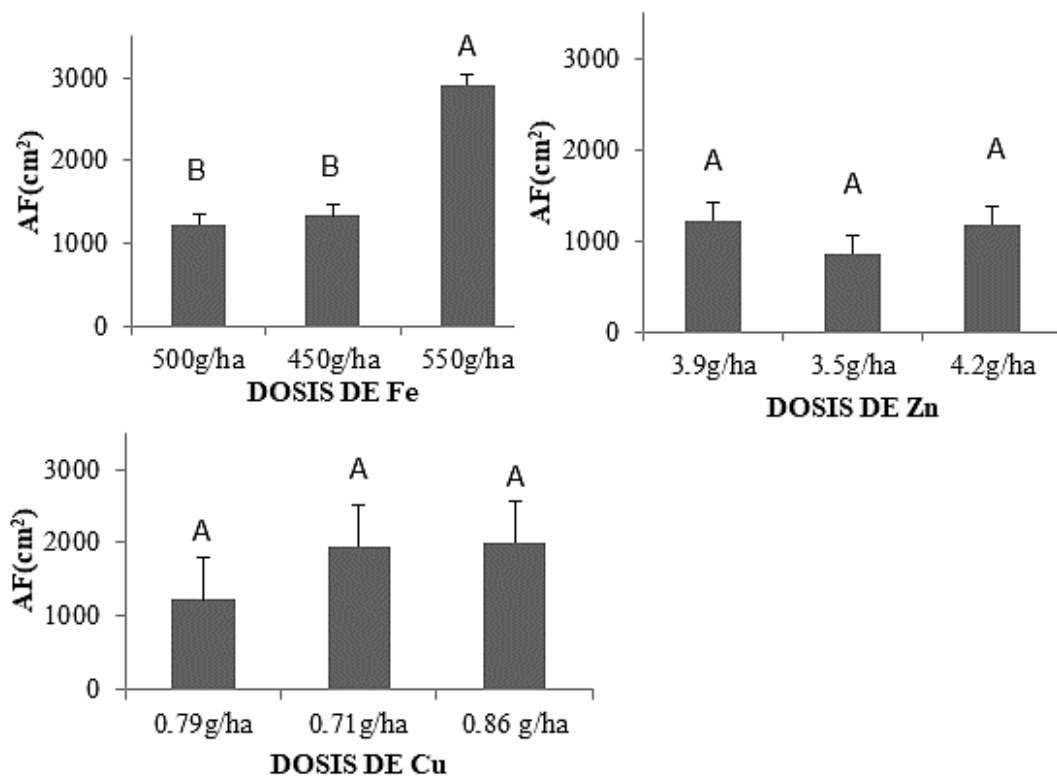


Figura 1. Efecto de diferentes dosis de Fe, Zn y Cu en el área foliar (AF) en el cultivo de jitomate.

Las literales distintas sobre la barra de error estándar, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($p \leq 0.05$).

La relación área foliar (RAF) entre los tratamientos fueron estadísticamente diferentes en las dosis de Fe y Zn, las dosis altas de fierro superaron al testigo 112% (Figura 2), señalando que un exceso de Fe genera una reducción en el crecimiento y esta dependerá de las concentraciones en la solución, por otro lado las dosis altas de Zn fueron superiores 50%; sin embargo, otros resultados señalan que un exceso de Zn propicia una disminución de materia seca en la planta (Casierra *et al.*, 2010), ocasionando una reducción en la producción de biomasa (Rizwan *et al.*, 2017),

mientras que las dosis de Cu fueron estadísticamente similares, Yruela (2005), señala que las concentraciones en exceso de Cu inhibe el crecimiento, provocando alteraciones en procesos fisiológicos como la fotosíntesis y respiración, generando una reducción en la biomasa del cultivo.

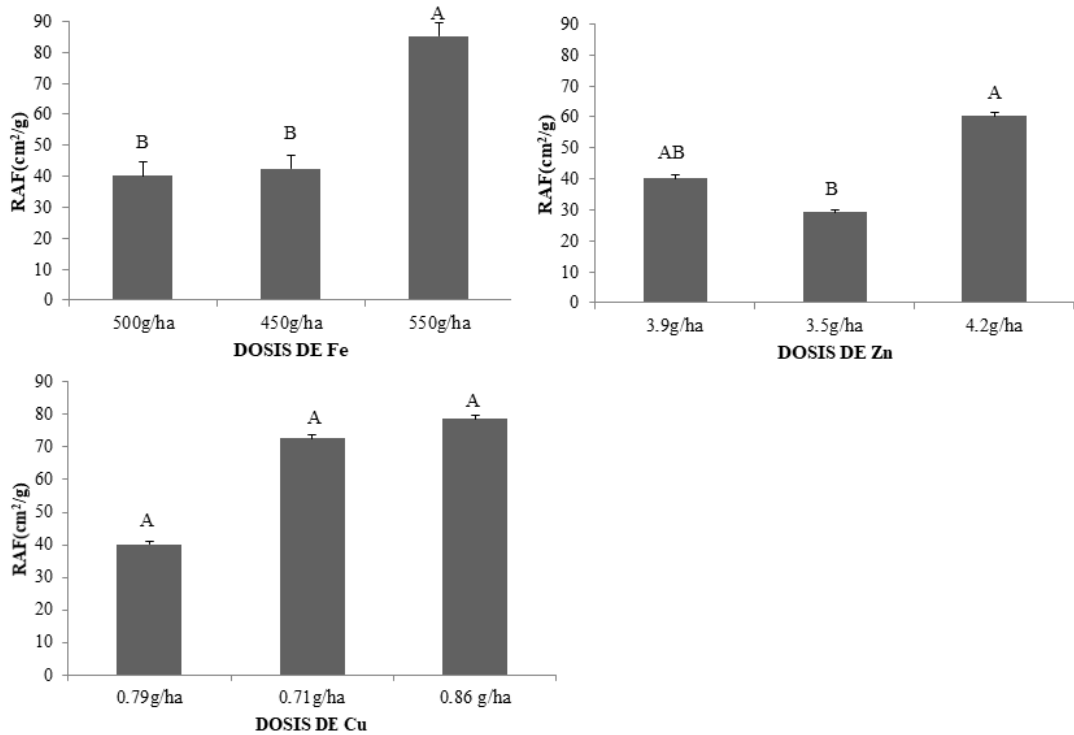


Figura 2. Efecto de diferentes dosis de Fe, Zn y Cu en la relación área foliar (RAF) en el cultivo de jitomate. Las literales distintas sobre las barras de error estándar, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($p \leq 0.05$).

Para el área foliar específica (AFE), las dosis altas de Fe y Zn superaron al testigo con 44% y 73%, respectivamente, mientras que en las dosis de Cu no hubo diferencias significativas (Figura 3), de las dosis altas a las medias (testigo) para Fe y Zn hubo una disminución de AFE. De acuerdo con Santos *et al.* (2010) el decremento puede deberse a cambios morfológicos que determinan la formación de hojas pequeñas y gruesas, por su parte Lizarazo *et al.* (2013) encontraron que sus tratamientos con deficiencia y exceso de Zn no hubo diferencias significativas, y mencionan que en plantas con

deficiencia o exceso de Zn sus hojas son delgadas. Por otra parte, Ghasemian *et al.* (2010) mencionan que con la aplicación de 50 kg h⁻¹ de Fe aumentó significativamente el número de vainas, peso de vainas y producción de biomasa en el cultivo de *Glycine max.*

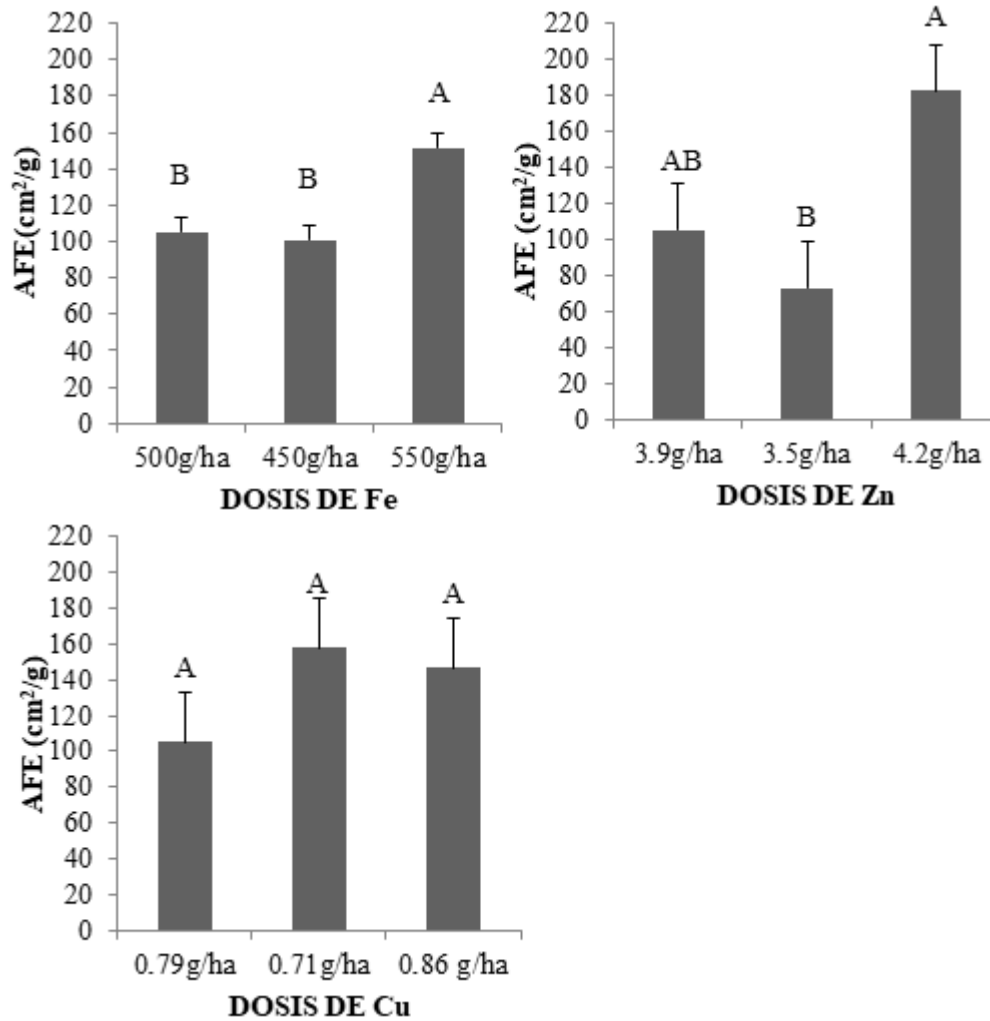


Figura 3. Efecto de diferentes dosis de Fe, Zn y Cu en el área foliar específica (AFE) en el cultivo de jitomate. Literales distintas sobre las barras de error estándar, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($p \leq 0.05$).

En la relación peso foliar (RPF) fueron estadísticamente similares los tratamientos (Figura 4), en esta misma variable se encontró que al inicio del ciclo en *Pisum sativum* no hubo diferencias; sin embargo, al finalizar el ciclo hubo una diferencia donde las dosis de 2 mg L⁻¹ fueron superiores.

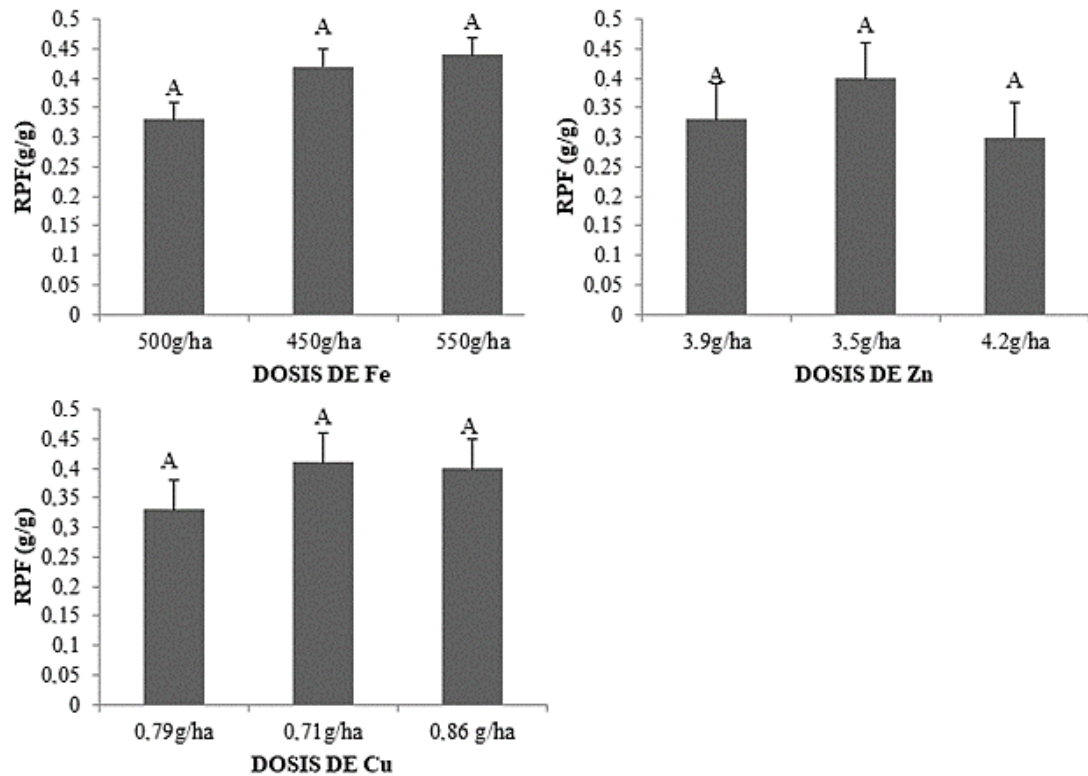


Figura 4. Efecto de diferentes dosis de Fe, Zn y Cu en la relación peso foliar (RPF) en el cultivo de jitomate. Literales distintas sobre las barras de error estándar, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($p \leq 0.05$).

La variable índice de área foliar (IAF) el tratamiento con 550 kg ha⁻¹ de Fe (dosis alta) fueron superiores 101% en comparación con el testigo, por lo que se puede demostrar que las dosis altas de Fe aprovecharon la radiación presente. De acuerdo con Barraza *et al.* (2004) el aumento del IAF se manifiesta fisiológicamente en una mayor tasa de translocación de foto asimilados hacia los puntos de demanda. En las dosis de Zn y Cu no hubo diferencias estadísticas (Figura 5).

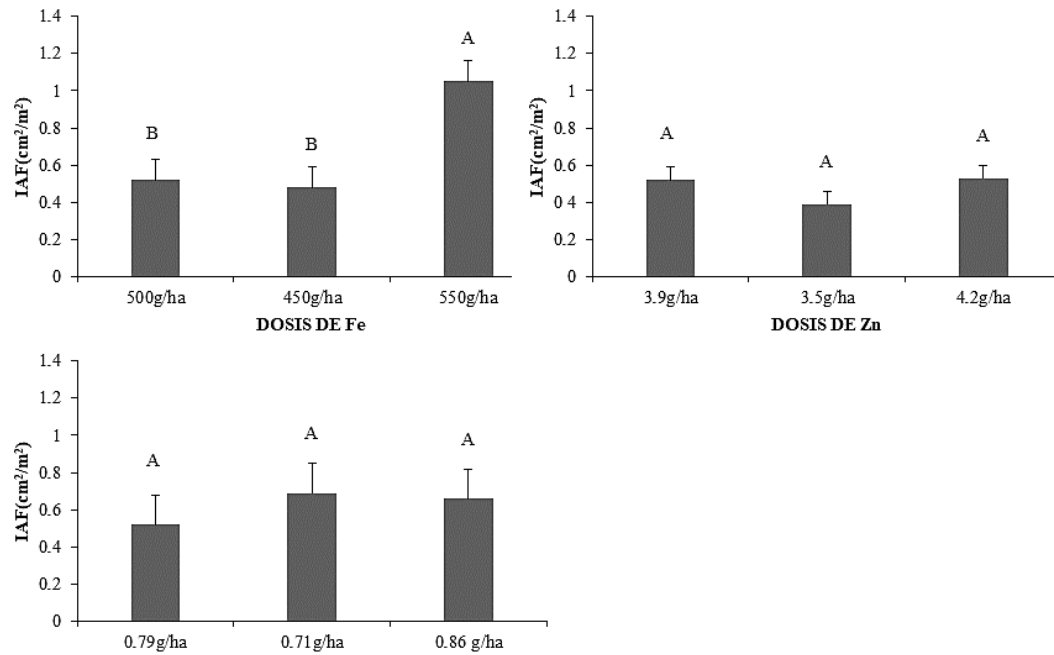


Figura 5. Efecto de diferentes dosis de Fe, Zn y Cu en el índice de área foliar (IAF) en el cultivo de jitomate. Literales distintas sobre las barras de error estándar, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($p \leq 0.05$).

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) (Figura 6) que indica la eficiencia productiva de la biomasa por unidad de superficie ocupada (suelo) a través del tiempo (Santos *et al.*, 2010), este trabajo fue estadísticamente similares, Pingoliya *et al.* (2014) mencionan que la aplicación de 2 kg ha⁻¹ de sulfato ferroso incrementó la biomasa, producción y rendimiento de *Cicer arietinum*.

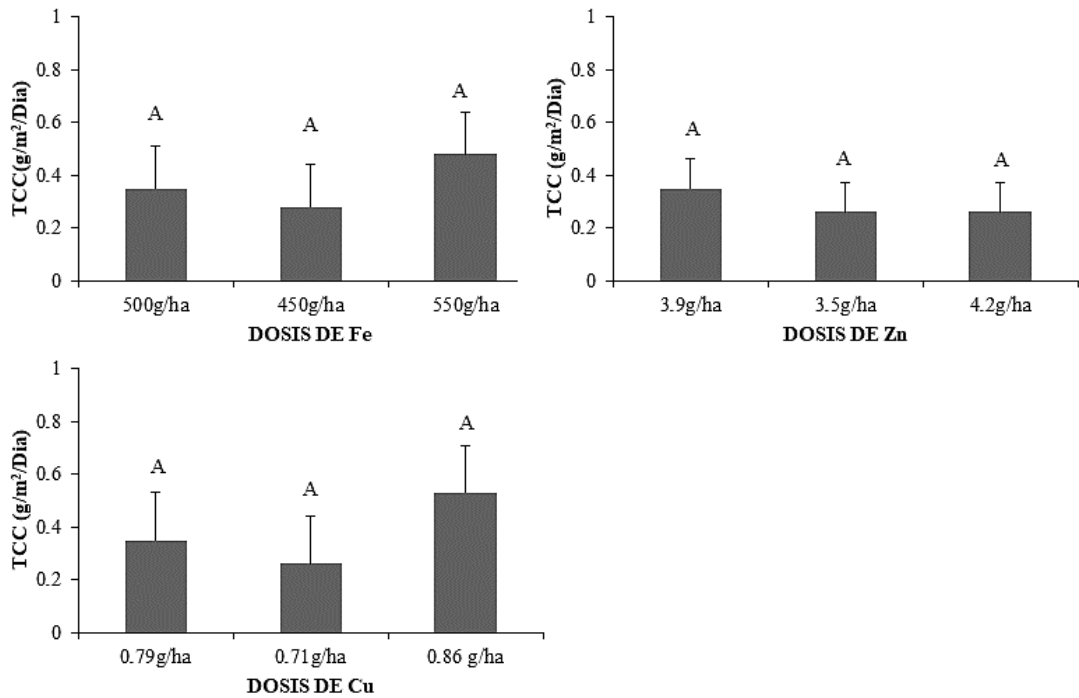


Figura 6. Efecto de diferentes dosis de Fe, Zn y Cu en la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en el cultivo de jitomate. Literales distintas sobre las barras de error estándar, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($p \leq 0.05$).

El rendimiento con las dosis de Fe y Zn no mostraron diferencias estadísticas, el Fe en las dosis de 450 g, ha referido un mayor rendimiento con 28 t ha⁻¹ en comparación con el testigo (Figura 7), resultados diferentes se presentaron en el cultivo de *Vigna radiata* donde las dosis de 5 kg ha⁻¹ de Fe contribuyó al máximo rendimiento (Jamal *et al.*, 2018).

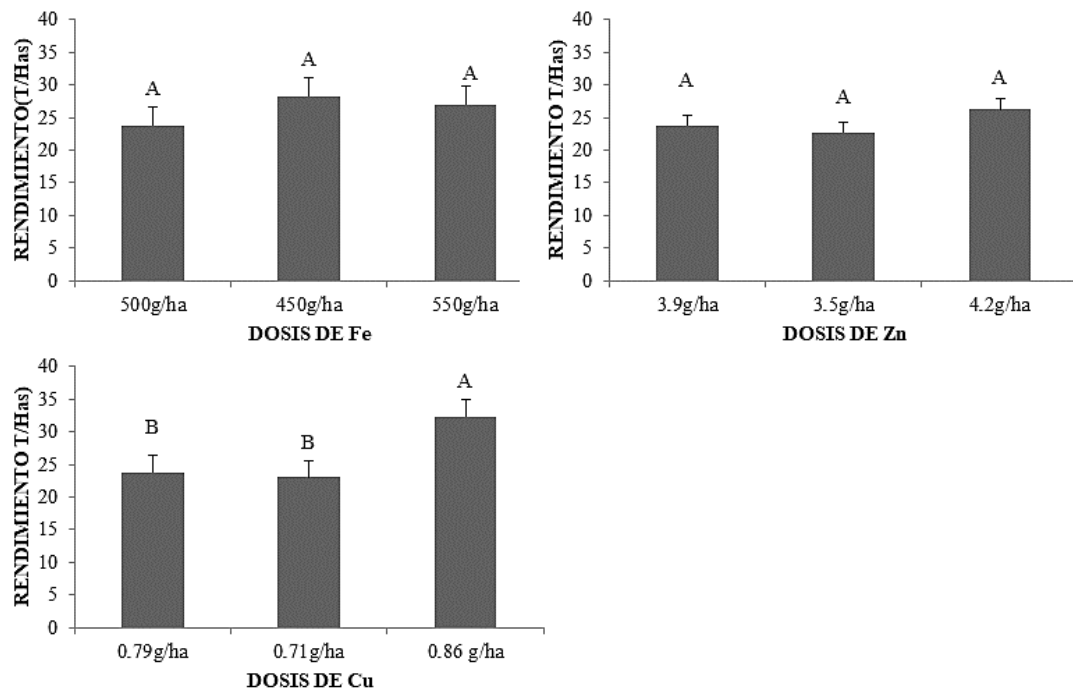


Figura 7. Efecto de diferentes dosis de Fe, Zn y Cu en el rendimiento del cultivo de jitomate. Literales distintas sobre la barra de error estándar, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($p \leq 0.05$).

Las dosis de Cu hubo diferencias estadísticas, las altas fueron superiores al testigo 36%, valores diferentes al aplicar Fe, Cu y Zn en *L. esculentum* observaron que los mejores rendimientos fueron con dosis de Zn seguido de Cu superando al testigo 20% y 4% respectivamente, por su parte Patil *et al.* (2008) al aplicar Fe, Cu y Zn a 100 ppm, encontraron que el Fe aportó mejores rendimientos con 18.25 t ha^{-1} , seguido de Zn con 17.57 t ha^{-1} y finalmente Cu con 15.58 t ha^{-1} en *L. esculentum*. En el presente trabajo los menores rendimientos se encontraron con las dosis bajas de Zn.

En el Cuadro 6 se muestran los valores de las variables área foliar, RAF, AFE, RPF, IAF y rendimiento. Las dosis altas de Fe y Cu mostraron las mayores áreas foliares respecto al testigo en un 137% y 63%, respectivamente, valores similares fueron reportados por El-Fouly *et al.* (2001) quienes demostraron que a concentraciones de 33.6 ppm de Fe (considerada dosis altas) el área foliar fue mayor en *Helianthus annuus*.

Las dosis bajas de Cu y las altas de Hierro incrementaron 91% la RAF resultados similares fueron reportados por Vinit-Dunand *et al.* (2002) quienes señalan que la aplicación de Cu a bajas concentraciones proporcionó mayor relación de área foliar en comparación con las dosis altas (10 mg g⁻¹ de sustrato) en *Cucumis sativus*.

En área foliar específica las dosis altas de Zn y las dosis bajas de Cu superaron al testigo con 73 y 49%, respectivamente, Rouphael *et al.* (2008) al hacer aplicaciones de Cu encontraron que a mayor concentración menor área foliar específica, con dosis de 0.3, 47 y 94 µM observaron una AFE de 273.2, 256.8 y 238.3 cm² g⁻¹, respectivamente, en *Cucumis sativus*.

Cuadro 6. Efecto del Fe, Cu y Zn en las variables de producción de biomasa y rendimiento.

Tratamiento	AF (cm ²)	RAF (cm ² /g)	AFE (cm ² /g)	RPF (g/g)	IAF (cm ² /cm ²)	TCC (g/m ² /día)	REND. (Ton/ha)
Testigo	1225.82bc ^Z	34.79b	105.34bc	0.33ab	0.52b	0.35 a	23.79b
450g/ha Fe	1332.35bc	40.97ab	100.87bc	0.42ab	0.48b	0.28 a	28.23ab
550g/ha Fe	2917.18a	66.45a	151.63ab	0.44a	1.05a	0.48 a	26.93ab
3.5g/ha Zn	867.92c	28.16b	73.14c	0.40ab	0.39b	0.26 a	22.72b
4.2g/ha Zn	1182.41bc	52.88ab	182.72a	0.30b	0.53b	0.26 a	26.19ab
0.71g/ha Cu	1954.04ab	66.60a	157.90ab	0.41ab	0.69ab	0.26 a	22.98b
0.86 g/ha Cu	2003.80ab	57.01ab	146.73ab	0.40ab	0.66b	0.53 a	32.37a
E.E	353.37	10.29	25.07	0.04	0.12	0.15	267

Z=medias con la misma letra son iguales de acuerdo con la prueba de LSD a una $p \leq 0.05$; EE= error estándar; AF= área foliar; RAF= relación área foliar; AFE= área foliar específica; RPF= relación peso foliar; IAF= índice de área foliar; TCC= tasa de crecimiento del cultivo; REND= rendimiento; Fe= hierro; Cu= cobre; Zn= zinc.

En la variable RPF, las dosis altas de Fe superaron al testigo 33%, mientras, que el IAF las dosis altas de Fe y dosis bajas de Cu superaron al testigo en 101 y 32%, respectivamente, Caliskan *et al.* (2008) demostraron que la aplicación de 0, 200 y 400 g ha⁻¹ de Fe al inicio de la floración en *Glycine max* el IAF no fue significativo; sin embargo, fueron notables en la etapa de vaina completa, y los valores de IAF aumentaron significativamente con dosis altas de Fe (400 g ha⁻¹).

En rendimiento fue superior con las dosis altas de Cu, seguido de las dosis bajas de Fe, el cual superó al testigo con 5 t, resultados diferentes fueron encontrados por Kumar *et al.* (2009) al aplicar diferentes dosis de Cu en *Triticum aestivum*, el rendimiento más alto fue con 1.5 mg kg⁻¹ de suelo superando al control por 62.9 % mientras que dosis altas presentó menor rendimiento que el control.

Conclusiones

Las dosis altas de los microelementos incrementaron las variables de calidad de fruto de jitomate, en especial sólidos solubles totales, firmeza y pH aunque sin diferencias estadísticas, por otro lado, las dosis bajas de Zn aumentó vitamina C; sin embargo, disminuyó los valores de AF, RAF, AFE, IAF y rendimiento. Las dosis altas de Fe mejoraron las variables AF, IAF y PRF. Las dosis de altas de Cu favorecieron el rendimiento y TCC. La deficiencia de los microelementos Fe, Cu y Zn limitó el área foliar, mientras que las dosis altas mejoraron el IAF y rendimiento.

Literatura citada

- Álvarez, F. A.; Paniagua, P.; Abadía, J. and Abadía, A. 2003. Effects of Fe deficiency chlorosis on yield and fruit quality in peach (*Prunus persica* L. Batsch). J. Agric. Food Chem. 51(19):5738-5744.
- Barraza, F. V.; Gerhard, F. y Cardona, C. E. 2004. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate. Agron. Colomb. 22(1):81-90.
- Briat, J. F.; Dubos, C. and Gaymard, F. 2015. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. Trends Plant Sci. 20(1):33-40.
- Caliskan, S.; Ozkaya, I.; Caliskan, M. E. and Arslan, M. 2008. The effects of nitrogen and iron fertilization on growth, yield and fertilizer use efficiency of soybean in a Mediterranean-type soil. Field Crops Res. 108(2):126-132.
- Casierra, P. F.; González, L. A. y Ulrichs, C. 2010. Crecimiento en plantas de brócoli (*Brassica oleracea* L. var. Itálica) afectadas por exceso por Zinc. Rev. Colomb. Cienc. Hortíc. 4(2):166-174.
- Castro, K.; Restrepo, M. L.; Ocampo, G. T. y Quintero, G. A. 2009. Intensidad de los sabores básicos del tomate (*Lycopersicon esculentum*) en seis estados de madurez. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial (BSAA). 7(1):23-28.
- Eberhard, S.; Finazzi, G. and Wollman, F. A. 2008. The dynamics of photosynthesis. Annual Review of Genetics. 1(42): 463-515.
- El-Fouly, M. M.; Nofal, O. A. and Mobarak, Z. M. 2001. Effects of soil treatment with iron, manganese and zinc on growth and micronutrient uptake of sunflower plants grown in high-pH soil. J. Agron. Crop Sci. 186(4):245-251.

- Ghasemian, V.; Ghalavand, A.; Soroosh, Z. A. and Pirzad, A. 2010. The effect of iron, zinc and manganese on quality and quantity of soybean seed. *J. Phytol.* 2(11):73-79.
- Haleema, B.; Rab, A. and Hussain, S. A. 2018. Effect of calcium, boron and zinc foliar application on growth and fruit production of tomato. *Sarhad J. Agric.* 34(1):19-30.
- Incesu, M.; Yeşiloğlu, T.; Cimen, B. and Yilmaz, B. 2015. Influences of different iron levels on plant growth and photosynthesis of W. Murcott mandarin grafted on two rootstocks under high pH conditions. *Turkish J. Agric. Forest.* 39(5):838-844.
- Jamal, A.; Khan, M. I.; Tariq, M. and Fawad, M. 2018. Response of mung bean crop to different levels of applied iron and zinc. *J. Hortic. Plant Res.* 3(4):13-22.
- Kumar, R.; Mehrotra, N. K.; Nautiyal, B. D.; Kumar, P. and Singh, P. K. 2009. Effect of copper on growth, yield and concentration of Fe, Mn, Zn and Cu in wheat plants (*Triticum aestivum* L.). *J. Environ. Biol.* 30(4):485-488.
- Kyrkby, E. y Römheld, V. 2008. Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Informaciones agronómicas. Encarte técnico.* 118:1-24.
- Lin, M. Z. and Jin, M. F. 2018. Soil Cu contamination destroys the photosynthetic systems and hampers the growth of green vegetables. *Photosynthetica.* 56(4):1336-1345.
- Lizarazo, M. Á.; Hernández, C. A.; Fischer, G. y Gómez, M. I. 2013. Biomasa, parámetros foliares y sintomatología en respuesta a diferentes niveles de manganeso, zinc y boro en curuba (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*). *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* 7(1):31-45.

- López, H. A.; Castillo, G. A. M.; Trejo, T. L. I.; Avitia, G. E. y Valdez, A. L. A. 2018. Respuesta de fresa cv. Albión a dosis crecientes de Zinc. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 9(8):1591-1601.
- Patil, B. C.; Hosamani, R. M.; Ajjappalavara, P. S.; Naik, B. H., Smitha, R. P. and Ukkund, K. C. 2008. Effect of foliar application of micronutrients on growth and yield components of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Karnataka J. Agric. Sci. 21(3):428-430.
- Perea, P. E.; Ojeda, B. D. L.; Hernández, R. O. A.; Escudero, A. D. J.; Martínez, T. J. J. y López, O. G. R. 2010. El zinc como promotor de crecimiento y fructificación en el nogal pecanero. Tecnociencia Chihuahua. 4(2):64-71.
- Pingoliya, K. K.; Dotaniya, M. L. and Lata, M. 2014. Effect of iron on yield, quality and nutrient uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Afr. J. Agric. Res. 9(37):2841-2845.
- Rizwan, M.; Ali, S.; Hussain, A.; Ali, Q.; Shakoor, M. B.; Zia-ur, R. M. and Asma, M. 2017. Effect of zinc-lysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment. Chemosphere. 187(5):35-42.
- Rouphael, Y.; Cardarelli, M.; Rea, E. and Colla, G. 2008. Grafting of cucumber as a means to minimize copper toxicity. Environ. Exp. Bot. 63(1-3):49-58.
- Rui, M.; Ma, C.; Hao, Y.; Guo, J.; Rui, Y., Tang, X. and Zhu, S. 2016. Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*). Frontiers in Plant Sci. 815(7):01-10.
- Santos, C. M.; Segura, A. M. y Núñez, L. C. E. 2010. Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.)

en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). Rev. Facultad Nacional de Agronomía-Medellín. 1(63):5253-5266.

Sathiyamurthy, V. A.; Shanmugasundaram, T.; Rajasree, V. and Arumugam, T. 2017. Effect of Foliar Application of Micronutrients on Growth, Yield and Economics of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Madras Agric. J. 104 (4-6):188-193.

Soetan, K. O.; Olaiya, C. O. and Oyewole, O. E. 2010. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants-A review. Afr. J. Food Sci. 4(5):200-222.

Valentinuzzi, F.; Mason, M.; Scampicchio, M.; Andreotti, C.; Cesco, S. and Mimmo, T. 2015. Enhancement of the bioactive compound content in strawberry fruits grown under iron and phosphorus deficiency. J. Sci. Food Agric. 95(10):2088-2094.

Vinit-Dunand, F.; Epron, D.; Alaoui-Sossé, B. and Badot, P. M. 2002. Effects of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. Plant Sci. 163(1):53-58.

Yruela, I. 2005. Copper in plants. Braz. J. Plant Physiol. 17(1):145-156.

Segundo artículo

1

2 **BIOFORTIFICACIÓN DEL CULTIVO DEL TOMATE CON Fe, Cu Y Zn Y**
3 **SU INTERACCIÓN EN LA CALIDAD NUTRACÉUTICA DEL FRUTO**
4 **BIOFORTIFICATION OF THE TOMATO CROP WITH Fe, Cu and Zn AND**
5 **ITS INTERACTION IN THE NUTRACEUTICAL QUALITY OF THE FRUIT**

6 Martha Santis Santis¹, Marcelino Cabrera De la Fuente,^{2*} Adalberto Benavides
7 Mendoza², Hortensia Ortega Ortíz³, Armando Robledo Olivo², Alberto Sandoval
8 Rangel².

9 ¹Estudiante de doctorado en ciencias en agricultura protegida Universidad Autónoma
10 Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila,
11 México (santissantism@gmail.com.). ²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
12 Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25315.
13 ³Centro de Investigación en Química Aplicada, Enrique Reyna H. No. 140, San José
14 de los Cerritos, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25294.
15 (hortensia.ortega@ciqa.edu.mx)

16 Autor para correspondencia: *cafum7@yahoo.com

RESUMEN

18 El objetivo del trabajo fue estudiar el efecto del Fe, Zn y Cu en la calidad nutraceutica
19 y biofortificación del tomate Variedad Río grande. Se tomaron muestras de hojas y
20 frutos para cuantificar las concentraciones de Fe, Cu y Zn (biofortificación). En frutos
21 se evaluó actividad antioxidante, proteínas totales, catalasa y glutatión peroxidasa
22 (calidad nutraceutica). Los tratamientos fueron solución Steiner (testigo), los
23 microelementos Fe, Cu y Zn se incrementaron o disminuyeron 10 % a la solución

24 Steiner. Se planteó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3X2. Los
25 tratamientos donde se aplicó un 10 % más de micronutrientes, incrementaron la
26 concentración de Zn y Cu en hojas en un 216 y 142 % respectivamente. La aplicación
27 de 550 g de Fe/ha favoreció las concentraciones de Fe en frutos en un 101 % y la dosis
28 4.2 g de Zn/ha afectaron el contenido de Fe, no obstante, mejoró el contenido de Zn
29 en un 256 % en hojas. Cuando se aplicó 0.86 g de Cu/ha favoreció el contenido de Zn
30 en 424 % en hojas. No se encontraron diferencias estadísticas en proteínas totales. Las
31 aplicaciones de 4.2 g de Zn/ha mejoró la actividad catalítica y glutatión peroxidasa, y
32 la aplicación de 450 g de Fe/ha incremento 4.2 % la actividad antioxidante.

33 **Palabras claves:** actividad catalítica, antioxidante, biofortificación, microelementos.

34 **ABSTRACT**

35 The objective of the work was study the effect of Fe, Zn and Cu on the nutraceutical
36 quality and biofortification of tomato Variety Rio Grande. Samples of leaves and fruits
37 were taken to quantify Fe, Cu and Zn concentrations (biofortification). In fruits,
38 antioxidant activity, total proteins, catalase and glutathione peroxidases (nutraceutical
39 quality) were evaluated. The treatments were Steiner solution (control), Fe, Cu and Zn
40 microelements were increased or decreased 10% to the Steiner solution. A completely
41 randomized design with 3X2 factorial arrangement was proposed. The treatments
42 where 10% more micronutrients were applied, increased the concentration of Zn and
43 Cu in leaves by 216 and 142% respectively. The application of 550 g of Fe / ha favored
44 the concentration of Fe in fruits by 101% and doses 4.2 g of Zn / ha affected the Fe
45 content, however, the Zn content improved by 256% in leaves. when 0.86 g of Cu / ha
46 was applied, it favored the content of Zn in 424% in the leaves. No statistical
47 differences were found in total proteins. The applications of 4.2 g of Zn / ha improved

48 the catalytic activity and glutathione peroxidase, and the application of 450 g of Fe /
49 ha increased the antioxidant activity by 4.2%.

50 **Keywords: Microelements, antioxidant, catalytic activity and biofortification.**

51 INTRODUCCIÓN

52 El tomate es una hortaliza importante a nivel mundial, solo después de la papa. México
53 es el principal exportador de tomate con el 25.11 % a nivel mundial (SAGARPA,
54 2017); ya sea por su potencial alimenticio o por poseer altos contenidos de licopeno,
55 Vitaminas C y A, fibra, proteínas y carotenos (Navarro *et al.*, 2011). El consumo de
56 tomate está relacionado con un menor riesgo de contraer enfermedades
57 cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Juroszek *et al.*, 2009). Los beneficios a la
58 salud se deben a que el tomate posee antioxidantes que atrapan los radicales libres,
59 previniendo el daño en las células (Luna y Delgado 2014). Los frutos de tomate poseen
60 antioxidantes nutricionales (como vitaminas A, C y E) y fitoquímicos no nutritivos
61 (con actividad antioxidante) como licopeno, flavonoides, flavonas y compuestos
62 fenólicos totales, los cuales, tienen potencial antimutagénico con propiedades
63 anticancerígenas (Luna y Delgado, 2014).

64 Algunos factores que afectan la calidad nutracéutica del fruto de tomate son el
65 genotipo, estado de madurez, condiciones ambientales y fertilización empleada
66 durante el ciclo del cultivo (Casierra y Avendaño, 2008). Con la finalidad de mejorar
67 la calidad nutricional de las hortalizas se han empleado cada vez más los programas
68 de biofortificación con fertilizantes (Hernández, *et al.*, 2019). La Biofortificación es
69 una técnica para superar las deficiencias de los microelementos en los alimentos,
70 mejorando las cualidades nutricionales de las plantas con una adecuada nutrición
71 mineral (Yudicheva, 2014).

72 Los microelementos Fe, Cu y Zn son esenciales para la dieta humana (Mejía *et al.*,
73 2006; Molina *et al.*, 2016); el Fe es importante para algunas funciones celulares, como
74 la síntesis del ADN, la respiración y detoxificación de los radicales libres (Aguado *et*
75 *al.*, 2012), mientras que el Cu es un cofactor de muchas enzimas, participa en la
76 respiración mitocondrial, defensa antioxidante, entre otras muchas funciones (Mejía *et*
77 *al.*, 2006), por su parte el Zn es un componente esencial de diversas deshidrogenasas,
78 proteasas y peptidasas (Morales *et al.*, 2016), ayudando a la formación y activación de
79 enzimas que impactan en el crecimiento, desarrollo y producción de plantas (Estrada
80 *et al.*, 2018).

81 La eliminación de ROS mediante sistemas enzimáticos y no enzimáticos, podría ser
82 una herramienta eficaz para mejorar la calidad del fruto, mejorando además la vida de
83 anaquel. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue estudiar un programa de
84 biofortificación mediante la aplicación de diferentes concentraciones de Fe, Cu y Zn
85 durante el periodo de crecimiento de las plantas de tomate y su efecto en la capacidad
86 antioxidante y contenidos enzimáticos.

87 **MATERIALES Y MÉTODOS**

88 **Ubicación y desarrollo del experimento**

89 El experimento se realizó en un túnel plástico en la Universidad Autónoma Agraria
90 Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo Coahuila México, con temperaturas
91 medias de 28 a 30 °C. La variedad de tomate utilizada fue Río Grande, es tipo saladette
92 y de crecimiento determinado, las cuales se sembraron en charolas de poliestireno de
93 200 cavidades en sustrato peat moss marca premier, el trasplante se dio 30 días después
94 de la siembra en bolsas de polietileno con peat moss-perlita como sustrato en una
95 proporción 75 %-25 % respectivamente.

96 **Aplicación de tratamientos**

97 Tres días después del trasplante se aplicaron los tratamientos, los cuales fueron siete
98 con un testigo. Al testigo sólo se le aplicó la solución nutritiva Steiner correspondiente
99 al ciclo fenológico de la planta, mientras que los otros seis tratamientos consistieron
100 en la aplicación suplementaria de los microelementos de Fe, Cu y Zn a diferentes
101 concentraciones según el Cuadro 1. Las aplicaciones de la solución nutritiva se
102 realizaron en el inicio del crecimiento el 25%, en crecimiento vegetativo pleno el 50%,
103 en floración el 75% y en el llenado de frutos y cosecha se aplicó el 100% de la solución.

104 **Biomasa seca**

105 La producción de materia seca se determinó mediante muestreo destructivo, a los 80
106 días después del trasplante (DDT) cuando las plantas estaban al término de la cosecha.
107 Se cortaron tres plantas por tratamiento, a cada planta se le separaron los órganos
108 vegetativos (tallos, hojas y raíz); la suma de estos representó el peso total de la planta,
109 secando en una estufa marca MAPSA modelo HDP 334 durante 72 horas a 70 °C.

110 **Cuantificación de los Microelementos de Fe, Cu y Zn en hojas y frutos**

111 Las muestras de hojas se secaron a 70°C durante tres días y 5 días para los frutos,
112 después se molieron las muestras, de las cuales se tomó un gramo para digerirlas en
113 ácido nítrico concentrado hasta destruir toda la materia orgánica; la solución se filtró
114 con papel Whatman número 42, posteriormente se cuantificaron los microelementos
115 en un espectrofotómetro de emisión de plasma, marca Thermo Scientific Jarrel Ash,
116 modelo iCAP 7000 series.

117 **Extracción enzimática en frutos**

118 Las muestras de frutos se congelaron a -20°C y se liofilizaron durante cinco días, luego
119 se maceraron en un mortero. Posteriormente, 200 mg de cada repetición se colocaron
120 en tubos Eppendorf con 20 mg de polivinil pirrolidona (estabilizador de enzimas) y

121 1.5 mL de buffer fosfatos (PBS) 0.1 M de pH 7.2, luego la mezcla se sónico por cinco
122 minutos y centrifugó a 15000 rpm durante 20 minutos a 4 °C en una microcentrífuga
123 marca PrismR Labnet international, Inc. En seguida el sobrenadante se filtró en un
124 filtro de membrana de nylon, para después realizar una dilución a una proporción de
125 1:15 con 0.5 mL del extracto y 7.5 mL del PBS), luego las muestras se almacenaron a
126 4 °C para la cuantificación de alguna enzima. Las variables evaluadas fueron: proteínas
127 totales, catalasa, glutatión peroxidasa y actividad antioxidante.

128 **Cuantificación de Proteínas totales**

129 La concentración de proteínas se determinó mediante la técnica colorimétrica de
130 Bradford (1976), haciendo primero una curva de calibración con albúmina sérica
131 bovina partiendo de una solución a 1000 ppm (10 mg de ABS aforado en 10 ml de
132 buffer de fosfatos), haciendo luego diferentes diluciones (10, 30, 50, 70, 100, 300, 500,
133 700 ppm) que se leyeron en un lector de placa a 630 nm. Posteriormente, se lee cada
134 muestra y se determina la concentración de las proteínas en base a la curva de
135 calibración realizada.

136 **Cuantificación de Catalasa**

137 La enzima catalasa se analizó por el método espectrofotométrico de Dhindsa *et al.*,
138 (1981). Se cuantifico en dos tiempos: tiempo cero (t_0) y tiempo uno (t_1), haciendo
139 previamente una curva de calibración con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% a las
140 concentraciones de 0 (sólo PBS), 20, 40, 60, 80 y 100 mM leyendo a 270 nm.

141 Para la preparación del blanco (t_0) se colocan en un tubo eppendorf 100 μ L de PBS,
142 400 μ L de H_2SO_4 al 5% y 1 mL de H_2O_2 (100 mM) y para la lectura de las muestras
143 (t_1) se agregaron en un tubo Eppendorf 100 μ L del extracto enzimático, 400 μ L de
144 H_2SO_4 al 5%, 1 mL de H_2O_2 y se leyó en el espectrofotómetro a 270 nm.

145

146 Capacidad antioxidante

147 Se evaluó la actividad antioxidante por el método del radical libre 2,2-difenil-1-
148 picrilhidracilo (DPPH), preparando una solución concentrada DPPH de metanol 2.53
149 mM. Primero se hizo una curva de calibración partiendo de una solución de Trolox
150 2.5mM en metanol; usando como concentración cero sólo de PBS y se midió la
151 solución de Trolox a las siguientes concentraciones: 0.015, 0.045, 0.105, 0.210 y de
152 0.420 mM.

153 Posteriormente, se hizo una curva de calibración con los estándares anteriores
154 colocándolos en microplacas de 96 pocillos; tomando 50 µL de cada estándar y 50 µL
155 de la solución de DPPH a una concentración de 0.5 mM dejando reaccionar por 15
156 minutos en la obscuridad y se leyó en un lector de placas modelo ELX808 a 530 nm.
157 Para la lectura de las muestras se siguió el mismo procedimiento que para los
158 estándares de Trolox.

159 Cuantificación del glutatión peroxidasa (GPX)

160 Se utilizó el método modificado por Flohé y Günzler (1984) adaptado por Xue *et al.*,
161 (2001) usando H₂O₂ como sustrato. Para el blanco se toman 200 µl del PBS y partiendo
162 del glutatión reducido (GSH) 1 mM en PBS se hace una curva de calibración tomando
163 200 µL de cada una de las concentraciones: 0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1,
164 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 mM. para la cuantificación del GSH, en las muestras se utilizaron
165 200 µL del extracto enzimático, y se leyó en el espectrofotómetro de UV-VIS a 412
166 nm.

167 Análisis estadístico

168 Para el diseño de los tratamientos se emplearon tres factores que fueron los fertilizantes
169 de Fe, Cu y Zn en dos niveles de concentración para cada caso (dosis bajas y altas),

170 además del tratamiento testigo (solución Steiner). Los tratamientos fueron evaluados
171 en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3X2, con 4 repeticiones por
172 tratamiento (consistiendo en una planta por tratamiento) para todas las variables
173 excepto para la biomasa seca, los cuales se utilizaron 3 repeticiones, los datos fueron
174 analizados en el programa Infostat.

175

176 **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

177 **Biomasa seca**

178 Las aplicaciones de Fe no mostraron efecto en la biomasa seca (Figura 1) datos
179 similares reportaron Przybysz *et al.*, (2016) al realizar aplicaciones de 6, 12, 24 y 36
180 mg/L de Fe en plantas de frijol, las cuales no presentaron diferencias significativas. En
181 las aplicaciones de Zn y Cu si hubo un efecto significativo entre los tratamientos. La
182 dosis baja de Zn (3.5 g de Zn/ha) disminuyó en un 32% la biomasa seca, datos
183 reportados por Lizarazo, *et al.*, (2013) señalan que el exceso de Zn (0.95 mg L⁻¹)
184 disminuyó la materia seca; mientras que las dosis altas (4.2 g de Zn/ha) que se probaron
185 presentaron valores similares al testigo, resultados similares obtuvo Ghasemian *et al.*,
186 (2010) donde los valores de biomasa entre las dosis altas (40 kg / ha de zinc) y las
187 medias (20 kg / ha de zinc) no presentaron diferencias estadísticas, mientras que la
188 deficiencias de Zn presentó bajo rendimiento de biomasa en el cultivo de *Glycine max*,
189 esto podría deberse al papel tan importante que juega el Zn en la producción de
190 biomasa, por su parte, las aplicaciones de Cu en dosis altas (0.86 g de Cu/ha),
191 mejoraron la biomasa seca de las plantas de tomate, contrario a lo reportado por Wang
192 *et al.*, (2013) que aplicaron dosis de Cu de 10 y 100 µM y 1 mM, las cuales inhibieron
193 el crecimiento y disminuyó el peso seco de *Brassica campestris*.

194

195 **Efecto del Fe en la asimilación de los minerales Fe, Cu y Zn**

196 No hubo diferencias estadísticas en el contenido de Fe en hojas, aunque el contenido
197 de Fe fue mucho más alto en hojas que en frutas (cuadro 2) resultados similares obtuvo
198 Gürel y Başar, (2018) al realizar aplicaciones de Fe en suelo en dosis de 500 y 1000 g
199 de sulfato de hierro por árbol de peral; mientras que en frutos si se observaron
200 diferencias estadísticas, las dosis de 550 g de Fe/ha presentaron mayor contenido de
201 Fe superando al testigo en un 101 %; Márquez-Quiroz *et al.*, (2015) por su parte
202 reportan que la aplicación de Fe aumentó el contenido de Fe al aplicar sulfato ferroso
203 en dosis de 0, 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ en semillas de *Vigna unguiculata*.

204 Las aplicaciones bajas de Fe (450 g de Fe/ha) aumentaron el contenido de Zn en hojas
205 en un 216% y el contenido de Cu en un 143 %; Ghasemi y Ronaghi (2016) por su parte
206 reportan que al realizar aplicaciones de quelato de hierro a 10 mg de Fe kg^{-1} aumentó
207 la concentración media de Fe, Zn y Cu en brotes de garbanzo, sin embargo, a 5 mg de
208 Fe kg^{-1} no tuvo efecto sobre las concentraciones de Cu.

209 **Efecto del Zn en la asimilación de los minerales Fe, Cu y Zn**

210 Los contenidos de Zn en hojas, hubo diferencias estadísticas, (como se puede observar
211 en el cuadro 3) las dosis de 0.86 g de Cu/ha superaron al testigo un 426%; la respuesta
212 de las plantas a las dosis bajas de Zn (3.5 g de Zn/ha) mejoran las concentraciones de
213 Fe en hojas en un 13.5 %, mientras que las dosis altas de Zn (4.2 g de Zn/ha) afectaron
214 los contenidos de Fe en 6.5 %, esto puede deberse al efecto antagónico entre el Zn y
215 Fe, tendencias similares se observaron en frutos, donde las dosis bajas de Zn (3.5 g de
216 Zn/ha) mejoró el contenido de Fe en un 5.9 %, Kaya y Higgs, (2002), señalan que
217 cuando las dosis de Zn incrementaban las concentraciones de Zn, Fe, P y K también
218 incrementaban en plantas de tomate.

219 Por su parte, Rajaie *et al.*, (2009), señalan que las aplicaciones de Zn (0, 5 y 10 mg kg⁻¹)
220 ¹) en brotes de *Citrus Aurantifolia* disminuyeron las concentraciones de Fe, Mn y Cu
221 en las dosis altas.

222 El Zn en dosis 4.2 g de Zn/ha favoreció un 256 % el contenido de Zn en hojas y en
223 frutos un 46 %, datos similares reporta Dimkpa *et al.*, (2014) quienes señalan que las
224 aplicaciones de nanopartícula de óxido de Zinc aumentaron la concentración de Zn, en
225 brotes de *Phaseolus vulgaris*, por su parte Benáková *et al.*, (2017) al realizar
226 aplicaciones de Cd y Zn, a las plantas de *B. napus* que se les aplicó 10 µM de Zn
227 presentaron un aumento dramático en el contenido de Zn.

228 Efecto del Zn en el contenido del Cu en hojas paso de 7.5 µg/g (testigo) a 13.5 µg/g
229 en las dosis bajas y 15.25 µg/g en dosis altas (4.2 g de Zn/ha), datos diferentes encontró
230 Imtiaz *et al.*, (2003) quienes observaron que a medida que las dosis de Zn aumentan
231 las concentraciones de Cu disminuyen, el Zn presentó un efecto negativo en las
232 concentraciones de Cu que su concentración cayó al nivel de deficiencia, en raíz de
233 trigo. En frutos el Zn en dosis altas (4.2 g de Zn/ha) afectó negativamente los
234 contenidos de Fe y Cu en 18 % y 64 %, respectivamente, por su parte Samreen *et al.*,
235 (2017) mencionan que las aplicaciones de Zn aumentaron los contenidos de Cu y Mg
236 de *Vigna radiata*, mientras que Fe compitió con Zn.

237 **Efecto del Cu en la asimilación de los minerales Fe, Cu y Zn**

238 El contenido de cobre en hojas no presentó diferencias significativas, mientras que en
239 los frutos si, el testigo superó todos los tratamientos. El cobre en altas (0.86 g de Cu/ha)
240 y bajas dosis (0.71 g de Cu/ha) en hojas afectó negativamente las concentraciones de
241 Fe en un 16 % y 38 %, respectivamente, datos diferentes fueron reportados por
242 Mourato *et al.*, (2009) quienes señalan que las concentraciones altas de Cu favorecen

243 la concentración de Fe en raíz de *Lupinus albus* a dosis de 0.001, 0.10, 0.15 y 0,20 mM
244 de Cu. En el presente trabajo las dosis altas de Cu (0.86 g de Cu/ha) mejoraron la
245 concentración de Zn y Fe en hojas en un 424 % y 50 %, respetivamente.

246 Las aplicaciones de Cu (altas y bajas dosis) afectaron negativamente los contenidos de
247 Cu en frutos, resultados diferentes observaron Li *et al.*, (2019) al aplicar dosis de 0.5
248 100, 200, 300, 400 y 500 μM de Cu reportan que las altas dosis de Cu aumentaron los
249 contenidos de Cu en los órganos hojas, tallo y raíz de *Citrus grandis*.

250 **Proteínas en frutos**

251 En las proteínas, se puede observar en la gráfica 1, que no hubo diferencia significativa
252 entre los tratamientos, de manera que las dosis bajas y altas disminuyeron la cantidad
253 de proteínas, pero los tratamientos más afectados fueron las dosis altas para Fe y Zn,
254 por otro lado, en las aplicaciones de Cu, se observó que, en las dosis altas y bajas, el
255 testigo fue superior en un 25% y 28 %, respetivamente, por su parte Habiba *et al.*,
256 (2014) reportaron que al aplicar dosis de 50 y 100 μM de Cu en hojas de *Brassica*
257 *napus*, se reduce el contenido de proteínas en dosis altas (100 μM), por lo que
258 concluyen que el estrés por Cu disminuye las proteínas, por otro lado, se puede
259 observar que el tratamiento considerado como dosis altas de Zn (4,2 g de Zn/ha)
260 presentó menor cantidad de proteínas totales con un promedio de 59.4 mg/g, estos
261 resultados contrastan a los obtenidos por Kandoliya *et al.*, (2018) quienes señalan que
262 la aplicación de altas dosis (1.5%) de quelato de Zn mejoró el contenido de proteínas.

263 **Catalasa en frutos**

264 La catalasa es una enzima importante debido a que se encarga de la eliminación del
265 peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) en las células (Rhee *et al.*, 2005), en el presente trabajo
266 los tratamientos con Fe, no presentaron diferencias significativas en catalasa, los

267 valores más altos lo presentaron las dosis altas de Fe (550 g de Fe/ha), seguida de las
268 dosis bajas; mientras que en los tratamientos de Zn y Cu si hubo diferencias
269 estadísticas, presentándose una tendencia similar, donde las dosis altas de los dos
270 microelementos presentaron mayores valores, seguidas de las dosis bajas. Las dosis
271 bajas de Zn (3.5 g de Zn/ha) superaron al testigo en un 380 % mientras que las altas
272 (4.2 g de Zn/ha) en 582 %, lo que representa algo bueno para la planta, debido a que
273 la catalasa es una enzima antioxidante que integra el sistema de defensa oxidativo,
274 convirtiendo el peróxido de hidrogeno a oxigeno molecular y agua (Hussain *et al.*,
275 2017) por su parte el Cu, aunque presentó la misma tendencia, los valores de la enzima
276 catalasa fueron menores que Zn, superando al testigo en un 250 % para las dosis bajas
277 (0.86 g de Cu/ha) y un 447 % para las dosis altas (0.71 g de Cu/ha), en realidad los
278 efecto del Cu en la actividad de las enzimas antioxidantes dependerá de la especie
279 hortícola, el órgano analizado (Hoja, tallo, raíz y fruto), la concentración y duración a
280 la que se exponga la planta (Finalgo *et al.*, 2013).

281 Branco *et al.*, (2017) señalan que la deficiencia de Cu (control) favorece la enzima
282 catalasa, mientras que las dosis de 250 $\mu\text{Mol L}^{-1}$ de Cu el nivel de la enzima disminuye
283 en brotes y raíces de *S. lycopersicum*, por su parte Finalgo *et al.*, (2013) observaron
284 que las enzimas Superóxido dismutasa y catalasa no mostraron variaciones
285 significativas al aplicar dosis de 100 y 200 $\mu\text{mol / L}$ de cobre en brotes y raíz de
286 *Solanum nigrum*.

287 **Glutación peroxidasa**

288 En el caso del glutatión peroxidasa las tendencias fueron similares a la catalasa. Las
289 plantas tratadas con diferentes dosis de Fe, no presentaron diferencias estadísticas,
290 pero las altas dosis (550 g de Fe/ha) fueron superiores al testigo un 33 %; las dosis

291 bajas (450 g de Fe/ha), también superaron al testigo en un 6 %, mientras que los
292 tratamientos con Zn y Cu si presentaron diferencias estadísticas. Las plantas tratadas
293 con altas dosis Zn (4.2 g de Zn/ha) superaron al testigo en un 35 % y un 11 % para las
294 dosis bajas. Los tratamientos con Cu tanto las dosis altas como bajas también
295 superaron al testigo, aunque para este caso las dosis bajas presentaron mayor Glutación
296 peroxidasa superando al testigo en un 30 %, esto sugiere que las plantas presentaban
297 un mayor mecanismo de defensa ante las especies reactivas de oxígeno
298 (Hasanuzzaman *et al.*, 2017); un exceso de Cu provoca una producción mayor de
299 especies reactivas de Oxígeno, de manera que genera un estrés oxidativo (Moller,
300 2001), como respuesta de defensa al estrés por exceso de Cu, las plantas generan
301 mecanismos como la activación del sistema antioxidante enzimático y no enzimático
302 (Fidalgo *et al.*, 2013).

303 **Actividad antioxidante**

304 Para medir la capacidad antioxidante un valor bajo de equivalente de Trolox en μM
305 significa una mayor actividad antioxidante. El efecto de Fe en la capacidad
306 antioxidante mostró un efecto significativo, las dosis bajas de Fe (450 g de Fe/ha)
307 presentaron valores mayores en la actividad antioxidante (cuadro 3), datos similares
308 fueron obtenidos por Valentinuzzi *et al.*, (2014), quienes mencionan que las
309 deficiencias de Fe benefician la actividad antioxidante. Las dosis de Zn también
310 presentaron diferencias significativas, para este caso, las dosis bajas de Zn (3.5 g de
311 Zn/ha) presentaron mayor capacidad antioxidante, estos resultados contrasta a los
312 obtenidos por Davarpanah *et al.*, (2016) quienes señalan que las aplicaciones de
313 quelato de nano- Zn a dosis de 0, 60 y 120 mg L^{-1} de Zn, no produjo efecto alguno en
314 *Punica granatum*. Por su parte las dosis de Cu no mostraron efecto alguno entre los
315 tratamientos.

316

CONCLUSIONES

317 Los resultados obtenidos indican que los microelementos Fe, Zn y Cu si tienen un
318 efecto en la biofortificación del cultivo de tomate, induciendo en dosis de 10 %
319 mayores al óptimo mayor contenido de Zn en hojas y frutos y mayor contenido de Fe
320 en frutos, la fertilización con 10 % mayor al óptimo también indujeron mejoras
321 significativas en biomasa seca, proteínas, glutatión peroxidasa y catalasa, mientras que
322 las dosis de 10 % menos al óptimo sólo indujeron a mejorar el contenido de Fe en
323 hojas. Los efectos de los tratamientos fueron más evidentes en dosis mayores al
324 óptimo.

325

AGRADECIMIENTOS

326 Al Dr. Germán Alvarado Tenorio y al LCQ Jesús Alejandro Espinosa Muñoz, por su
327 apoyo en la digestión y cuantificación de minerales en el Centro de Investigación de
328 Química Aplicada.

329

REFERENCIAS

330 Aguado-Santacruz, G. A., Moreno-Gómez, B., Jiménez-Francisco, B., García-Moya,
331 E., y Preciado-Ortiz, R. E. (2012). Impacto de los sideróforos microbianos y
332 fitosideróforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. *Revista*
333 *fitotecnia mexicana*, 35(1), 9-21.

334 Benáková, M., Ahmadi, H., Dučaiová, Z., Tylová, E., Clemens, S., y Tůma, J. (2017).
335 Effects of Cd and Zn on physiological and anatomical properties of
336 hydroponically grown *Brassica napus* plants. *Environmental Science and*
337 *Pollution Research*, 24(25), 20705–20716.

- 338 Bradford, M.M., 1976: A Rapid and sensitive method for the quantification of
339 microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding.
340 Anal. Biochem. 72, 248-254.
- 341 Branco-Neves, S., Soares, C., de Sousa, A., Martins, V., Azenha, M., Gerós, H., y
342 Fidalgo, F. (2017). An efficient antioxidant system and heavy metal exclusion
343 from leaves make *Solanum cheesmaniae* more tolerant to Cu than its cultivated
344 counterpart. Food and Energy Security, 6(3): 123-133.
- 345 Casierra-Posada, F., y Avendaño, Ó. A. (2008). Calidad en frutos de tomate (*Solanum*
346 *lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez. Agronomía
347 Colombiana, 26(2): 300-307.
- 348 Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., y Khorasani, R. (2016).
349 Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate
350 (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. Scientia horticulturae,
351 210, 57-64.
- 352 Dhindsa, R.S., Plumb-Dhindsa, P. y Thorpe, T.A., 1981: Leaf senescence: correlated
353 with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and
354 decrease levels of superoxide dismutase and catalase. J. Exp. Bot. 32, 93-101.
- 355 Dimkpa, C. O., Hansen, T., Stewart, J., McLean, J. E., Britt, D. W., y Anderson, A. J.
356 (2015). ZnO nanoparticles and root colonization by a beneficial pseudomonad
357 influence essential metal responses in bean (*Phaseolus vulgaris*).
358 Nanotoxicology, 9(3), 271-278.
- 359 Estrada-Domínguez, V., Márquez-Quiroz, C., Cruz-Lázaro, E. D. L., Osorio-Osorio,
360 R., y Sánchez-Chávez, E. (2018). Biofortificación de frijol caupí (*Vigna*
361 *unguiculata* L. Walp) con zinc: efecto en el rendimiento y contenido
362 mineral. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 9(SPE20): 4149-4160.

- 363 Fidalgo, F., Azenha, M., Silva, A. F., de Sousa, A., Santiago, A., Ferraz, P., y Teixeira,
364 J. (2013). Copper-induced stress in *Solanum nigrum* L. and antioxidant
365 defense system responses. *Food and Energy Security*, 2(1): 70-80.
- 366 Flohé, L. y Günzler, W.A., 1984: Assays of glutathione peroxidase. In: *Methods in*
367 *enzymology*. Academic Press. New York.
- 368 Ghasemi Fasaei, R., y Ronaghi, A. (2016). The influence of iron chelate and zinc
369 sulfate on the growth and nutrient composition of chickpea grown on a
370 calcareous soil. *Iran Agricultural Research*, 34(2), 35-40.
- 371 Ghasemian, V., y Ghalavand, A. (2010). The Effect of Iron, Zinc and Manganese on
372 Quality and Quantity of Soybean Seed. *Journal of Phytology*.
- 373 Habiba, U., Ali, S., Farid, M., Shakoor, M. B., Rizwan, M., Ibrahim, M. y Ali, B.
374 (2014). EDTA enhanced plant growth, antioxidant defense system, and
375 phytoextraction of copper by *Brassica napus* L. *Environmental Science and*
376 *Pollution Research*, 22(2): 1534-1544.
- 377 Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., y Fujita, M. (2017). Glutathione in plants:
378 biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance.
379 *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23(2), 249–268.
380 doi:10.1007/s12298-017-0422-2
- 381 Hernández-Hernández, M., León-Morales, J., López-Bibiano, Y., Saldaña-Sánchez,
382 W. D., y García-Morales, S. (2019). Efecto comparativo del selenito y selenato
383 en el crecimiento y contenido de pigmentos fotosintéticos en plantas de
384 pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Bioteología y Sustentabilidad*, 3(2): 12-12.
- 385 Hussain, I., Ashraf, M. A., Rasheed, R., Iqbal, M., Ibrahim, M., Zahid, T., ... y Saeed,
386 F. (2017). Cadmium-induced perturbations in growth, oxidative defense

- 387 system, catalase gene expression and fruit quality in tomato. *International*
388 *Journal of Agriculture and Biology*, 19(1).
- 389 Imtiaz, M., Alloway, B. J., Shah, K. H., Siddiqui, S. H., Memon, M. Y., Aslam, M., y
390 Khan, P. (2003). Zinc nutrition of wheat: II: interaction of zinc with other trace
391 elements. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2(2): 156-160.
- 392 Juroszek, P., Lumpkin, H. M., Yang, R. Y., Ledesma, D. R., y Ma, C. H. (2009). Fruit
393 quality and bioactive compounds with antioxidant activity of tomatoes grown
394 on-farm: comparison of organic and conventional management
395 systems. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(4): 1188-1194.
- 396 Kandoliya, R. U., Sakarvadiya, H. L., y BB, K. (2018). Effect of zinc and iron
397 application on leaf chlorophyll, carotenoid, grain yield and quality of wheat in
398 calcareous soil of Saurashtra region. *IJCS*, 6(4): 2092-2096.
- 399 Kaya, C., y Higgs, D. (2002). Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.)
400 cultivars to foliar application of Zinc when grown in sand culture at low Zinc.
401 *Scientia Horticulturae*, 93(1), 53-64.
- 402 Li, J., Wu, X. D., Hao, S. T., Wang, X. J., & Ling, H. Q. (2008). Proteomic response
403 to iron deficiency in tomato root. *Proteomics*, 8(11), 2299-2311.
- 404 Li, Q., Chen, H. H., Qi, Y. P., Ye, X., Yang, L. T., Huang, Z. R., y Chen, L. S. (2019).
405 Excess copper effects on growth, uptake of water and nutrients, carbohydrates,
406 and PSII photochemistry revealed by OJIP transients in Citrus seedlings.
407 *Environmental Science and Pollution Research*, 1-18.
- 408 Lizarazo, M. Á., Hernández, C. A., Fischer, G., y Gómez, M. I. (2013). Biomasa,
409 parámetros foliares y sintomatología en respuesta a diferentes niveles de
410 manganeso, zinc y boro en curuba (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*).
411 *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(1), 31-45.

- 412 Luna-Guevara, M. L., y Delgado-Alvarado, A. (2014). Importancia, contribución y
413 estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum*
414 *lycopersicum* L.). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1): 51-66.
- 415 Márquez-Quiroz, C., De-la-Cruz-Lázaro, E., Osorio-Osorio, R., y Sánchez-Chávez, E.
416 (2015). Biofortification of cowpea beans with iron: iron's influence on mineral
417 content and yield. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(4): 839-847.
- 418 Mejía, O. R., Ruiz, M., Clavijo Grimaldi, D., García, G. A., Ruiz, A. L., García
419 Cardona, A., y Casadiego, C. A. (2006). Bases biológicas y patobiológicas
420 humanas del metabolismo del cobre. *Universitas Médica*, 47(1).
- 421 Molina, M. G., Quiroz, C. M., de la Cruz Lázaro, E., Martínez, J. R. V., Parra, J. M.
422 S., Carrillo, M. G., y Vidal, J. A. O. (2016). Biofortificación de frijol caupí
423 (*Vigna unguiculata* L. Walp) con hierro y zinc. *Revista mexicana de ciencias*
424 *agrícolas*, (17):3427-3438.
- 425 Møller, I. M. (2001). Plant mitochondria and oxidative stress: electron transport,
426 NADPH turnover, and metabolism of reactive oxygen species. *Annual review*
427 *of plant biology*, 52(1): 561-591.
- 428 Morales-Morales, A. E., de la Cruz-Lázaro, E., Osorio-Osorio, R., Sánchez-Chávez,
429 E., Trejo, A. M., y Márquez-Quiroz, C. (2016). Contenido mineral y
430 rendimiento de germinados de frijol caupí biofortificados. *Revista Mexicana*
431 *de Ciencias Agrícolas*, (17): 3415-3425.
- 432 Mourato, M. P., Martins, L. L., y Cuypers, A. (2009). Effect of Copper on Antioxidant
433 Enzyme Activities and Mineral Nutrition of White Lupin Plants Grown in
434 Nutrient Solution. *Journal of Plant Nutrition*, 32(11): 1882–1900.

- 435 Navarro-González, I., García-Valverde, V., García-Alonso, J., y Periago, M. J. (2011).
436 Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel
437 fiber. *Food Research International*, 44(5): 1528-1535.
- 438 Przybysz, A., Wrochna, M., Małecka-Przybysz, M., Gawrońska, H., y Gawroński, S.
439 W. (2016). Vegetable sprouts enriched with iron: Effects on yield, ROS
440 generation and antioxidative system. *Scientia horticulturae*, 203, 110-117.
- 441 Rajaie, M., Ejraie, A. K., Owliaie, H. R., y Tavakoli, A. R. (2009). Effect of zinc and
442 boron interaction on growth and mineral composition of lemon seedlings in a
443 calcareous soil. *International Journal of Plant Production*, 3(1): 39-50.
- 444 Rhee, S. G., Yang, K. S., Kang, S. W., Woo, H. A., y Chang, T. S. (2005). Controlled
445 elimination of intracellular H₂O₂: regulation of peroxiredoxin, catalase, and
446 glutathione peroxidase via post-translational modification. *Antioxidants &*
447 *redox signaling*, 7(5-6), 619-626.
- 448 SAGARPA, 2017. Planeación Agrícola Nacional. 20 Págs.
- 449 Samreen, T., Shah, H. U., Ullah, S., y Javid, M. (2017). Zinc effect on growth rate,
450 chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mungbeans
451 plant (*Vigna radiata*). *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1802-S1807.
- 452 Valentinuzzi, F., Mason, M., Scampicchio, M., Andreotti, C., Cesco, S., y Mimmo, T.
453 (2015). Enhancement of the bioactive compound content in strawberry fruits
454 grown under iron and phosphorus deficiency. *Journal of the Science of Food*
455 *and Agriculture*, 95(10): 2088-2094.
- 456 Wang, X. H., Song, Y. P., Ren, J., Liu, T. K., Hou, X. L., y Li, Y. (2013). Response
457 of biomass and photosynthesis in non-heading chinese cabbage to excess
458 copper. *J Anim Plant Sci*, 23, 1659-1665.

459 Xue, T., Hartikainen, H. y Piironen, V., 2001: Antioxidative and growth-promoting
 460 effect of selenium on senescing lettuce. *Plant Soil*. 237, 55- 61.

461 Yudicheva, O. (2014). Study of zinc content in biofortified tomato. *The advanced
 462 science journal*, 15-18.

463

464

TABLAS Y FIGURAS

465 **Cuadro 1.** Tratamientos y dosis de Fe, Cu y Zn en el cultivo de tomate.

466 **Table 1.** Treatments and doses of Fe, Cu and Zn in tomato cultivation.

Tratamientos	Descripción
Testigo	Solución Steiner normal
550 g de Fe/ha	+10 % de Fe
450 g de Fe/ha	-10 % de Fe
4.2 g de Zn/ha	+10 % de Zn
3.5 g de Zn/ha	-10 % de Zn
0.86 g de Cu/ha	+10 % de Cu
0.71 g de Cu/ha	-10 % de Cu

467

468

469

470

471

472

473

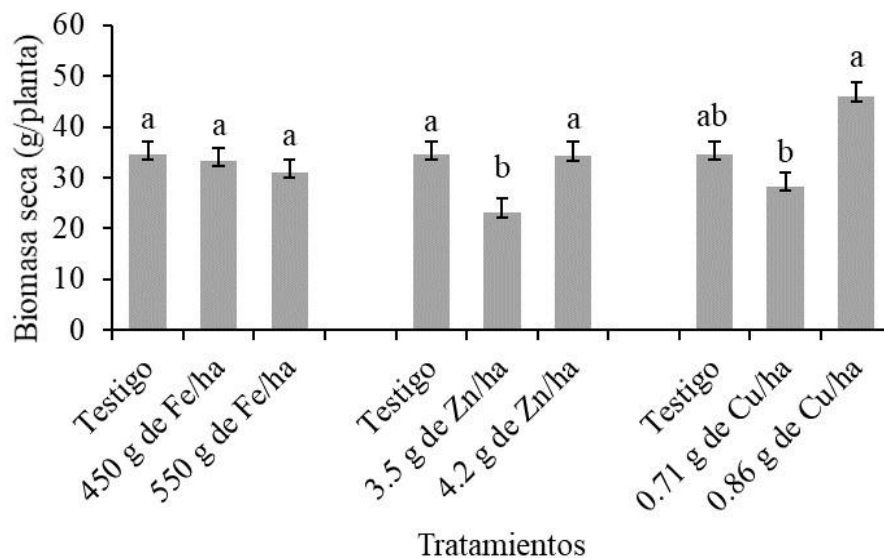
474

475 **Cuadro 2.** Contenido de Fe, Cu y Zn en Hojas y frutos de tomate sometidos a
 476 diferentes niveles de Fe, Cu y Zn.

477 **Table 2.** Content of Fe, Cu and Zn in Leaves and fruits of tomato subjected to different
 478 levels of Fe, Cu and Zn.

HOJAS			
Tratamiento	Fe µg/g	Zn µg/g	Cu µg/g
Testigo	184.25a	6.25ab	7.50a
550 g de Fe/ha	127.75a	9.25ab	9.00a
450 g de Fe/ha	209.25a	19.75ab	18.25a
4.2 g de Zn/ha	172.25a	22.25ab	15.25a
3.5 g de Zn/ha	209.25a	4.75b	13.50a
0.86 g de Cu/ha	155.25a	32.75a	11.25a
0.71 g de Cu/ha	114.00a	4.50b	13.75a
FRUTO			
Tratamiento	Fe µg/g	Zn µg/g	Cu µg/g
Testigo	28.46bc	16.61a	1.89a
550 g de Fe/ha	57.31a	31.91a	1.23ab
450 g de Fe/ha	49.29ab	17.34a	1.11ab
4.2 g de Zn/ha	23.98c	24.26a	0.68b
3.5 g de Zn/ha	30.16bc	17.34a	1.13ab
0.86 g de Cu/ha	33.61bc	36.39a	1.56ab
0.71 g de Cu/ha	39.54abc	24.41a	1.50ab

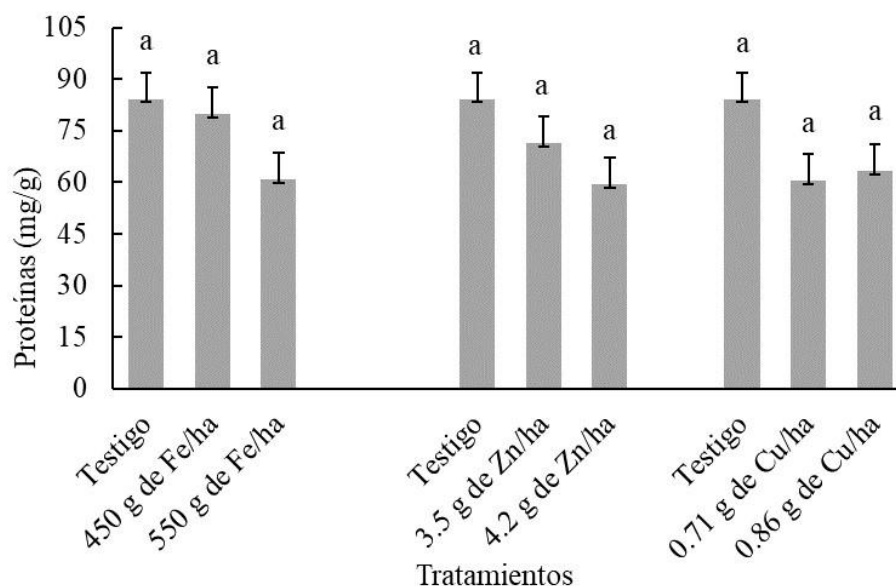
479 µg/g= Microgramos del metal por cada gramo de muestra. Letras distintas entre niveles
 480 de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD
 481 ($P \leq 0.05$).



482

483 **Figura 1:** Efecto del Fe, Cu y Zn en la biomasa seca de plantas de tomate. Las barras
 484 superiores representan el error estándar. Letras distintas entre niveles de un mismo
 485 elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD ($P \leq 0.05$).

486 **Figure 1:** Effect of Fe, Cu and Zn on the dry biomass of tomato plants. The upper bars
 487 represent the standard error. Different letters between levels of the same element,
 488 indicate significant difference according to the LSD test ($P \leq 0.05$).

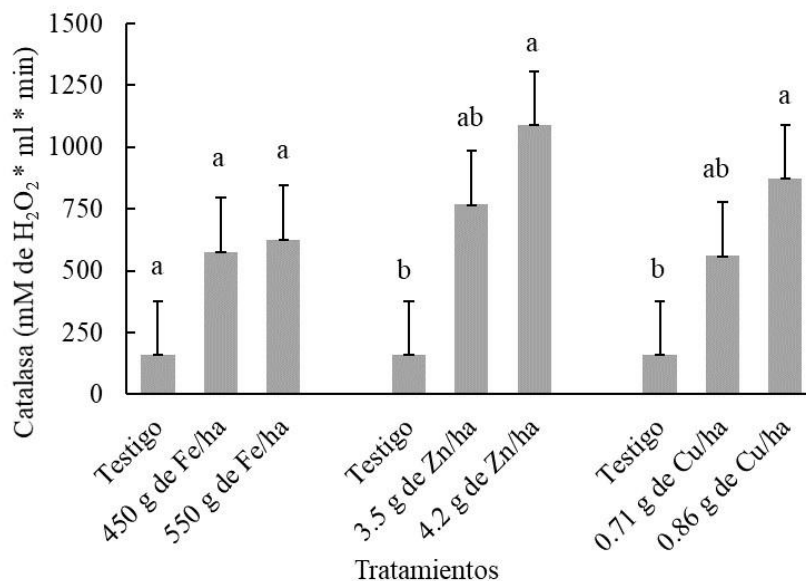


489

490 **Figura 2:** Proteínas totales en frutos de tomate suplementado con niveles de Fe, Zn y
 491 Cu. Las barras superiores representan el error estándar. Letras distintas entre niveles

492 de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD
 493 ($P \leq 0.05$).

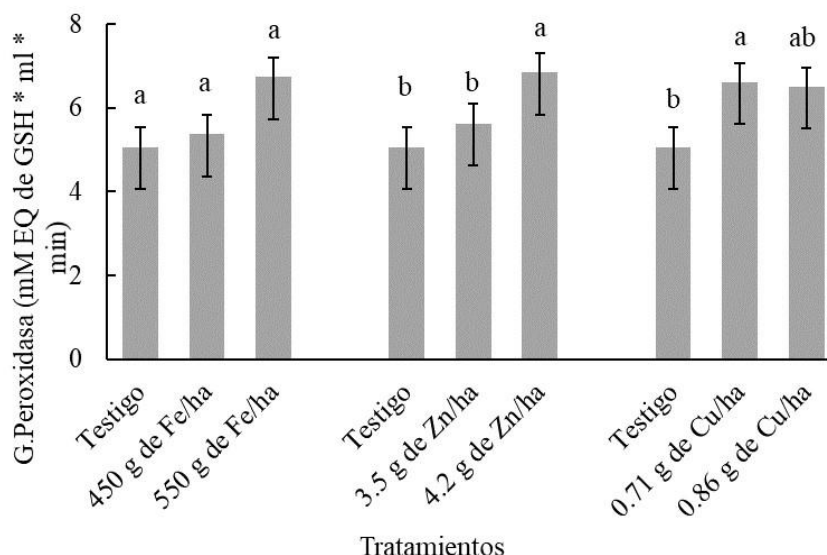
494 **Figure 2:** Total proteins in tomato fruits supplemented with Fe, Zn and Cu levels. The
 495 upper bars represent the standard error. Different letters between levels of the same
 496 element, indicate significant difference according to the LSD test ($P \leq 0.05$).



497

498 **Figura 3:** Actividad de catalasa en frutos de tomate suplementado con niveles de Fe,
 499 Zn y Cu. Las barras superiores representan el error estándar. Letras distintas entre
 500 niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD
 501 ($P \leq 0.05$).

502 **Figure 3:** Catalase activity in tomato fruits supplemented with Fe, Zn and Cu levels.
 503 The upper bars represent the standard error. Different letters between levels of the
 504 same element, indicate significant difference according to the LSD test ($P \leq 0.05$).



505

506 **Figura 4:** Glutación peroxidasa en frutos de tomate suplementado con niveles de Fe,
 507 Zn y Cu. Las barras superiores representan el error estándar. Letras distintas entre
 508 niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa según la prueba de LSD
 509 ($P \leq 0.05$).

510 **Figure 4:** Glutathione peroxidase in tomato fruits supplemented with Fe, Zn and Cu
 511 levels. The upper bars represent the standard error. Different letters between levels of
 512 the same element, indicate significant difference according to the LSD test ($P \leq 0.05$).

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523 **Cuadro 3.** Capacidad antioxidante por el método DPPH en frutos de tomate.

524 **Table 3.** Antioxidant capacity by DPPH method in tomato fruits.

Fe	
TRATAMIENTOS	DPPH ET ($\mu\text{M}/200\text{ mg}$)
Testigo	134.84b
550 g de Fe/ha	131.48ab
450 g de Fe/ha	129.15a
Zn	
TRATAMIENTOS	DPPH ET ($\mu\text{M}/200\text{ mg}$)
Testigo	134.84b
0.71 g de Zn/ha	129.52a
0.86 g de Zn/ha	130.52ab
Cu	
TRATAMIENTOS	DPPH ET ($\mu\text{M}/200\text{ mg}$)
Testigo	134.84a
3.5 g de Cu/ha	129.89a
4.2 g de Cu/ha	130.63a

525 DPPH=2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl; ET=Equivalente de Trolox. Promedios con
 526 letras distintas, entre niveles de un mismo elemento, indican diferencia significativa
 527 según la prueba de LSD ($P \leq 0.05$).

CONCLUSIÓN GENERAL

La aplicación de la solución nutritiva Steiner adicionada con los microelementos hierro, cobre y zinc, fue beneficiosa para las plantas de tomate, reflejándose en una buena calidad de los frutos, las dosis altas favorecieron firmeza y sólidos solubles totales, mientras que las dosis bajas de Zn incrementaron vitamina C, sin embargo, las dosis altas de Cu favorecieron el rendimiento.

En la producción de biomasa las dosis altas de Fe mejoraron las variables AF, IAF y PRF, mientras que una deficiencia de los microelementos Fe, Cu y Zn limitó el área foliar y las dosis altas mejoraron el IAF y rendimiento. En cuanto a calidad nutracéutica los microelementos en dosis altas indujeron mayor contenido de glutatión peroxidasa y catalasa.

REFERENCIAS

- Askary, M., Amirjani, M. R., y Saberi, T. (2017). Comparison of the effects of nano-iron fertilizer with iron-chelate on growth parameters and some biochemical properties of *Catharanthus roseus*. *Journal of Plant Nutrition*, 40(7), 974–982.
- Branco-Neves, S., Soares, C., de Sousa, A., Martins, V., Azenha, M., Gerós, H., & Fidalgo, F. (2017). An efficient antioxidant system and heavy metal exclusion from leaves make *Solanum cheesmaniae* more tolerant to Cu than its cultivated counterpart. *Food and Energy Security*, 6(3), 123-133.
- Choudhury, S., Panda, P., Sahoo, L., & Panda, S. K. (2013). Reactive oxygen species signaling in plants under abiotic stress. *Plant signaling & behavior*, 8(4), e23681.
- Da Costa M, Sharma P (2016) Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica* 54:110–119.
- Filipek-Mazur, B., Tabak, M., Koncewicz-Baran, M., & Bobowiec, A. (2019). Mineral fertilizers with iron influence spring rape, maize and soil properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*.
- Hernández-Hernández, M., León-Morales, J., López-Bibiano, Y., Saldaña-Sánchez, W. D., & García-Morales, S. (2019). Efecto comparativo del selenito y selenato en el crecimiento y contenido de pigmentos fotosintéticos en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Biotechnología y Sustentabilidad*, 3(2), 12-12.
- Islam, M. Z., Mele, M. A., Baek, J. P., & Kang, H.-M. (2018). Iron, Iodine and Selenium Effects on Quality, Shelf Life and Microbial Activity of Cherry Tomatoes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(2), 388-392.
- Krohling, C. A., Eutrópio, F. J., Bertolazi, A. A., Dobbss, L. B., Campostrini, E., Dias, T., & Ramos, A. C. (2016). Ecophysiology of iron homeostasis in plants. *Soil science and plant nutrition*, 62(1), 39-47.
- Luna-Guevara, M. L., & Delgado-Alvarado, A. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1), 51-66.
- Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J. & Guo, T. (2017). Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Frontiers in plant science*, 8, 860.
- Manoharan, R. K., Jung, H. J., Hwang, I., Jeong, N., Kho, K. H., Chung, M. Y., & Nou, I. S. (2017). Molecular breeding of a novel orange-brown tomato fruit with enhanced beta-carotene and chlorophyll accumulation. *Hereditas*, 154(1), 1.

- Marreiro, D., Cruz, K., Morais, J., Beserra, J., Severo, J., & de Oliveira, A. (2017). Zinc and oxidative stress: current mechanisms. *Antioxidants*, 6(2), 24.
- Martí, R., Leiva-Brondo, M., Lahoz, I., Campillo, C., Cebolla-Cornejo, J., & Roselló, S. (2018). Polyphenol and l -ascorbic acid content in tomato as influenced by high lycopene genotypes and organic farming at different environments. *Food Chemistry*, 239, 148–156.
- Migocka, M., & Malas, K. (2018). Plant Responses to Copper: Molecular and Regulatory Mechanisms of Copper Uptake, Distribution and Accumulation in Plants. *Plant Micronutrient Use Efficiency*, 71–86.
- Owusu, J., Ma, H., Wang, Z., Afoakwa, N. A., Zhou, C., & Amissah, A. (2015). Effect of pH and Temperature on Antioxidant Levels of Tomato Wine. *Journal of Food Biochemistry*, 39(1), 91–100.
- Ozougwu, J. C. (2016). The role of reactive oxygen species and antioxidants in oxidative stress. *International Journal of Research*, 1.
- Sağlam, A., Yetişsin, F., Demiralay, M., & Terzi, R. (2016). Copper Stress and Responses in Plants. *Plant Metal Interaction*, 21–40.
- Shi, P., Li, B., Chen, H., Song, C., Meng, J., Xi, Z., & Zhang, Z. (2017). Iron supply affects anthocyanin content and related gene expression in berries of *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon. *Molecules*, 22(2), 283.
- Shi, P., Song, C., Chen, H., Duan, B., Zhang, Z., & Meng, J. (2018). Foliar applications of iron promote flavonoids accumulation in grape berry of *Vitis vinifera* cv. Merlot grown in the iron deficiency soil. *Food chemistry*, 253, 164-170.
- Singh, A., Singh, N. B., Afzal, S., Singh, T., & Hussain, I. (2017). Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants. *Journal of Materials Science*, 53(1), 185–201.
- Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M., & Vitti, A. (2015). Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International journal of molecular sciences*, 16(6), 13561-13578.
- Tilahun, S., Do, S. P., Mu, H. S., & Cheon, S. J. (2017). Review on factors affecting the quality and antioxidant properties of tomatoes. *African Journal of Biotechnology*, 16(32), 1678-1687.
- Tomas, M., Beekwilder, J., Hall, R. D., Sagdic, O., Boyacioglu, D., & Capanoglu, E. (2017). Industrial processing versus home processing of tomato sauce: Effects on phenolics, flavonoids and in vitro bioaccessibility of antioxidants. *Food Chemistry*, 220, 51–58.

Yashin, A., Yashin, Y., Xia, X., & Nemzer, B. (2017). Antioxidant activity of spices and their impact on human health: A review. *Antioxidants*, 6(3), 70.