

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE GELES DE QUITOSÁN-Fe Y SU EFECTO EN EL CULTIVO DE
TOMATE

Tesis

Que presenta MELISA MÉNDEZ MARTÍNEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Junio de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE GELES DE QUITOSÁN-Fe Y SU EFECTO EN EL CULTIVO
DE TOMATE

Tesis

Que presenta MELISA MÉNDEZ MARTÍNEZ
Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Dr. Antonio Juárez Maldonado
Director

Dr. Gregorio Cadenas Pliego
Co-Director

Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de postgrado
UAAAN

EVALUACIÓN DE GELES DE QUITOSÁN-Fe Y SU EFECTO EN EL CULTIVO
DE TOMATE

Tesis

Elaborada por MELISA MÉNDEZ MARTÍNEZ como requisito parcial para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA con la
supervisión y aprobación de comité de asesoría



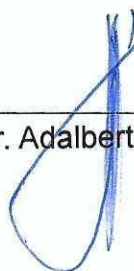
Dr. Antonio Juárez Maldonado
Director de tesis



Dr. Gregorio Cadenas Pliego
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente
Asesor



Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de postgrado
UAAAN

Agradecimientos

A través de estas palabras quiero expresar el profundo agradecimiento a todo aquello que hizo posible por medio del aporte científico y colaboración la realización de este trabajo. En primer lugar, agradezco a Dios por darme fuerza en momentos difíciles y sostén para seguir adelante en mis proyectos de vida.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por acogerme y brindarme la oportunidad de recibir esta formación, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo y al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) por el material proporcionado. Gracias por el apoyo y confianza brindada.

A mi director de tesis, el Dr. Antonio Juárez Maldonado por su orientación y crítica acertada que me permitió enriquecer este trabajo a través de sus conocimientos y experiencia.

Al Dr. Gregorio Cadenas Pliego por el apoyo y asesoría brindados para la realización de este trabajo.

A mis asesores de tesis los doctores Marcelino Cabrera de la Fuente, Adalberto Benavides Mendoza y Alberto Sandoval Rangel por el apoyo, asesoría y conocimientos compartidos durante la realización de este trabajo.

A la Dra. Yolanda por el apoyo y conocimientos compartidos en el invernadero y laboratorio, por sus consejos y buen trato que sin lugar a duda fueron de gran aporte para la realización de este trabajo.

A mis compañeras Paola y Rocío por recordarme el valor de la humanidad a través del apoyo incondicional que me brindaron, a Juanita por las ovaciones y apoyo en todo momento.

Finalmente, agradezco a mi familia por haber estado en momentos difíciles que coincidieron con este periodo, especialmente a mi madre quien me acompañó en la etapa más dolorosa de mi vida y a mi hijo en quien encontré fuerzas para llegar hasta este momento.

Dedicatoria

Mi hija representa el regalo más bello de Dios, el amor más puro e incondicional, fue la mayor inspiración para estar en este lugar, mientras estuvo entre nosotros me enseñó a amar y valorar cada instante de la vida.

Ha sido sin lugar a duda mi mejor maestra.

Por eso te dedico el resultado de este trabajo ya que sin todas las enseñanzas que me dejó tu vida no habría tenido la valentía para retomar el camino y culminar este proyecto.

Aunque tu recorrido fue breve, tu recuerdo vivirá siempre en mi corazón, hasta el cielo mi bello ángel.

CHLOE NATALIA MENDOZA MÉNDEZ
(24/09/2021-13/06/2022)

Índice general

Índice general	iii
Índice de cuadros.....	vi
Índice de figuras.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS.....	3
OBJETIVO	3
Objetivos específicos.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Antecedentes.....	4
Elementos esenciales para las plantas.....	5
Nutrición de los cultivos	5
Fierro (Fe).....	6
Vía de absorción y metabolismo del Fe en las plantas.....	7
Papel del Fe en la regulación redox de las plantas	8
Especies reactivas de oxígeno	9
Cultivo de tomate.....	11
Compuestos bioactivos y antioxidantes en tomate.....	12
Carotenoides	12
β-caroteno	12
Licopeno.....	13
Acido ascórbico	13
Compuestos fenólicos	14

Flavonoides	14
Deficiencias de Fe en el cultivo de tomate	15
Complejo de quitosan	15
MATERIALES Y MÉTODOS	17
Tratamientos.....	17
Geles de quitosán-Fe	18
Variables agronómicas	18
Calidad del fruto	19
Contenido de clorofilas	19
Compuestos antioxidantes	19
Vitamina C.....	19
Flavonoides	20
Fenoles.....	20
β-caroteno y Licopeno.....	21
Contenido de minerales en hojas	21
Análisis estadístico	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
Variables agronómicas	22
Calidad del fruto	23
Contenido de clorofilas	25
Antioxidantes en hojas y frutos.....	25
Vitamina c.....	25
Flavonoides	26
Fenoles.....	27
β-caroteno	28

Licopeno..... 29

Contenido mineral 30

CONCLUSIONES 37

REFERENCIAS 38

Índice de cuadros

Cuadro 1. Principales especies reactivas de oxígeno.....	10
Cuadro 2. Tratamientos	18

Índice de figuras

Figura 1. Variables Agronómicas	23
Figura 2. Calidad del fruto.....	24
Figura 3. Contenido de Clorofilas.....	25
Figura 5. Flavonoides..	27
Figura 6. Fenoles.....	28
Figura 7. Contenido de β -caroteno en tomates.....	29
Figura 8. Contenido de licopeno en tomate.	30
Figura 9. Macronutrientes en hojas de tomate.....	31
Figura 10. Micronutrientes en hojas de tomate.....	33

RESUMEN

EVALUACIÓN DE GELES DE QUITOSÁN-Fe Y SU EFECTO EN EL CULTIVO DE TOMATE

Por

MELISA MÉNDEZ MARTÍNEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ANTONIO JUÁREZ MALDONADO-ASESOR

Saltillo, Coahuila.

Junio 2023.

El tomate es uno de los cultivos de mayor importancia a nivel mundial por su alta producción, consumo y comercialización, es considerado como un alimento benéfico para la salud por sus características, especialmente por el contenido de compuestos bioactivos que promueven la prevención de enfermedades cardiovasculares y degenerativas. El aumento desmedido de la población demanda cada día mayor productividad y calidad en los productos agrícolas, en el tomate puede alcanzarse atendiendo las deficiencias de hierro (Fe) que presenta a causa de su baja disponibilidad y absorción. En este sentido, fueron evaluadas tres dosis de quitosan-Fe (DB, DM y DA) para comparar su efecto en el cultivo de tomate con FeSO_4 y Fe-EDTA aunado a las múltiples características del quitosán y al papel que desempeña el Fe en el metabolismo de las plantas. Con el objetivo de evaluar el impacto de los geles de quitosán-Fe en la nutrición del cultivo de tomate. De esta manera, se encontró que el quitosán-Fe influyó de manera positiva en variables que mejoran la calidad del fruto a través de la reducción de la conductividad eléctrica (CE) en un 35.64% y disminución del potencial de oxido reducción (ORP) en un 266.97%, incremento de flavonoides en 23.17% en hojas y 30.46% en frutos, fenoles un 20.88% en frutos, β -caroteno un 12.46% y licopeno 50.66% con DA quitosán-Fe, así como en la inducción del aumento de la concentración de macronutrientes (S, Ca, Mg y Na) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, B y Mn) en hojas. Donde DA quitosán-Fe resultó ser óptima en esta investigación.

Palabras clave: Quitosán-Fe, potencial óxido reducción, metabolitos secundarios, antioxidantes.

ABSTRACT

EVALUACIÓN DE GELES DE QUITOSÁN-Fe Y SU EFECTO EN EL CULTIVO
DE TOMATE

Por

MELISA MÉNDEZ MARTÍNEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ANTONIO JUÁREZ MALDONADO-ASESOR

Saltillo, Coahuila.

Junio 2023.

The tomato is one of the most important crops worldwide due to its high production, consumption, and commercialization; it is considered a beneficial food for health due to the characteristics it possesses, especially due to the content of bioactive compounds that promote the prevention of cardiovascular diseases and degenerative. The excessive increase in the population demands greater productivity and quality in agricultural products every day; in tomato, it can be achieved by addressing the deficiencies of iron (Fe) that it presents due to its low availability and absorption. In this sense, three doses of chitosan-Fe (DB, DM, and DA) were evaluated to compare the effect of this complex in the tomato crop with FeSO_4 and Fe-EDTA together with the multiple characteristics of chitosan and the role played by Fe in plant metabolism. The study aimed to evaluate the impact of chitosan-Fe gels on the nutrition of the tomato crop. In this way, it was found that the chitosan-Fe complex positively influenced variables that improve fruit quality through the reduction of electrical conductivity (EC) by 35.64% and reduction of the oxidation reduction potential (ORP) decrease by 266.97%, production of secondary metabolites and antioxidants such as the increase of flavonoids in 23.17% in leaves and 30.46% in fruits, phenols 20.88% in fruits, β -carotene 12.46% and lycopene 50.66% with DA chitosan-Fe, as well as in the induction of increased concentration of macronutrients such as S, Ca, Mg and Na and micronutrients such as Fe, Cu, Zn, B and Mn in the leaves of this crop. Where DA chitosan-Fe turned out to be optimal in this investigation through the conclusive results.

Keywords: Chitosan-Fe, oxidation reduction potential, secondary metabolites, antioxidants.

INTRODUCCIÓN

El tomate es uno de los cultivos de mayor producción, comercialización y consumo a nivel mundial, por sus características (Nagamine *et al.*, 2023). Es considerado un alimento funcional debido a las propiedades benéficas que se le atribuyen (Navarro-González & Periago, 2016). Representa una fuente importante de vitaminas, minerales, antioxidantes, compuestos fenólicos y flavonoides (Collins *et al.*, 2022), licopeno, β -caroteno y agentes anticancerígenos (Supraja *et al.*, 2020). Estos elementos determinan la calidad de la fruta misma que puede ser afectada por las deficiencias de hierro en el cultivo a causa de su baja disponibilidad y absorción para las plantas (Ahammed *et al.*, 2020). Por esta razón se deben buscar alternativas que permitan que las raíces absorban Fe y pueda distribuirse por toda la planta para mejorar sus funciones fisiológicas como respiración, fotosíntesis, asimilación de minerales y producción de antioxidantes (Malhotra *et al.*, 2020).

El hierro (Fe) es un micronutriente indispensable para todos los seres vivos, necesario para el funcionamiento fisiológico de las plantas debido a que participa en diferentes funciones celulares y es cofactor de más de 140 enzimas que participan en varias funciones fisiológicas y bioquímicas (Zhang *et al.*, 2022).

El hierro es un elemento abundante en el suelo, sin embargo, la baja disponibilidad y solubilidad de Fe (III) principalmente en suelos calcáreos y con pH neutro y alcalino, dificulta su disponibilidad para las plantas y causa reducción del rendimiento y calidad en los cultivos (Guo *et al.*, 2020).

De manera convencional, los productores utilizan quelatos sintéticos de Fe para mitigar su deficiencia en cultivos comerciales, estos fertilizantes representan costos elevados, pueden lixiviarse, evitar que el Fe se precipite y mejorar la movilidad de metales pesados (Cieschi *et al.*, 2019). Por lo que resulta importante

buscar nuevas alternativas que permitan proporcionar Fe a los cultivos aportando mayores beneficios.

El quitosano es un polímero con capacidades de formación, estabilidad, biocompatibilidad y fuerte adherencia a la superficie de electrodos y puede actuar como dispersante (Gholivand *et al.*, 2019). Es biocompatible y biodegradable, presenta grandes cantidades de grupos amino e hidroxilo, puede formar películas y proporcionar muchos grupos funcionales orgánicos para la modificación funcional (Han *et al.*, 2022). Se obtiene de la desacetilación de la quitina aislada de la cutícula de insectos y hongos, expuesta a medios alcalinos concentrados (De Lima Batista *et al.*, 2018). Este compuesto se ha empleado para la modificación de suelos, producción de películas biodegradables y de empaque antimicrobianos. También se ha comprobado su efecto como estimulador de la germinación y mejora de los rendimientos en diferentes cultivos (Rodríguez *et al.*, 2019).

Esta mezcla de características convierte al quitosán en un excelente medio para encapsular elementos minerales que los cultivos no pueden aprovechar directamente del suelo como el Fe que además es un elemento esencial para las plantas y fuente de esta investigación.

OBJETIVO

Evaluar el impacto de los geles de quitosán-Fe en la nutrición del cultivo de tomate

Objetivos específicos

1. Evaluar el impacto de los geles de quitosán-Fe en el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate
2. Determinar la eficiencia de absorción de Fe a través de los geles de quitosán por las plantas de tomate
3. Determinar el impacto de los compuestos relacionados al proceso de fotosíntesis.

HIPÓTESIS

El uso de geles de quitosán-Fe en la producción de tomate favorecerá la nutrición del cultivo y sus procesos fisiológicos.

REVISIÓN DE LITERATURA

Antecedentes

La historia evidencia la importancia del desarrollo de la agricultura para la humanidad ya que desde sus orígenes ha permitido al hombre ir evolucionando en conjunto con el desarrollo de técnicas y estrategias que le permiten enfrentar los retos derivados del crecimiento demográfico.

La agricultura juega un papel importante en el desarrollo económico de los países, contribuye al sustento de los otros sectores, incentiva la disminución de la pobreza y es el principal medio de suministro de alimentos en todo el mundo (Bula, 2020). Es el principal sostén de los países en desarrollo ya que gran parte de sus ingresos proviene del sector agrícola y buen porcentaje de su población depende de este para subsistir (Manjunatha *et al.*, 2019).

La productividad agrícola se ha magnificado en los últimos años sin embargo se estima que para el 2050 se enfrentara a grandes retos, deberá de producir más del 50% de lo que generaba en el 2012 como consecuencia del crecimiento demográfico y afrontar los desequilibrios ambientales que perjudicaran el rendimiento de los cultivos a causa del abuso de malas prácticas agrícolas (Velasco-Jiménez *et al.*, 2020) por lo que tendrá que buscar nuevas estrategias que permitan alcanzar las metas de producción y calidad para nutrir al mundo.

Las nuevas técnicas de agricultura no solo buscaran incrementar la productividad sino también que los productos sean de mayor calidad nutricional, si bien es cierto que las plantas requieren de 16 elementos para subsistir, el Fe es esencial para completar su ciclo de vida y no puede ser sustituido por ningún otro elemento hecho que convierte a las deficiencias de este nutriente en un problema mundial denominado como clorosis férrica.

La clorosis férrica se presenta en aproximadamente el 30-50% de los suelos de cultivo y es una de las principales limitantes de la producción en suelos calcáreos,

en la actualidad se aplican fertilizantes comerciales para mitigar las deficiencias, pero a pesar de los altos costos de estos productos tienden a lixiviarse (Cieschi *et al.*, 2019). El tomate es uno de los cultivos que se ve afectado por los desequilibrios nutricionales que ocasiona la clorosis férrica en los cuales se ha visto afectado el crecimiento, rendimiento y calidad (Grioui *et al.*, 2020).

El quitosán posee un conjunto de características que lo convierten en una alternativa para aliviar las deficiencias de Fe por falta de disponibilidad y lixiviación ya que se pueden formar complejos con minerales para nutrir a las plantas a través de un sistema de encapsulación y liberación controlada (Reyes, 2020). Además, funciona como bioestimulante capaz de producir efectos biológicos en las plantas a través de la activación del metabolismo vegetal, induce tolerancia a los diferentes tipos de estrés y activa varias proteínas para desintoxicar de las especies reactivas de oxígeno (Malerba & Cerana, 2016).

Elementos esenciales para las plantas

En la nutrición vegetal se consideran 16 elementos fundamentales para que las plantas se desarrollen de manera adecuada y optimicen sus funciones, de los cuales requiere en mayor cantidad nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre considerados macronutrientes y en menor proporción boro, cobre, cloro, hierro, manganeso, molibdeno y zinc conocidos como micronutrientes (Njinga *et al.*, 2013). Estos elementos son sustancias químicas inorgánicas que son fundamentales en la formación de tejidos (biomoléculas), metaloenzimas y metaloproteínas que participan en el desarrollo y regulación del metabolismo (Hernández *et al.*, 2015).

Nutrición de los cultivos

A nivel mundial, las deficiencias de nutrientes propician condiciones negativas en la producción de cultivos lo que desencadena disminución del rendimiento y calidad de cosecha, sumado a esto el uso inapropiado y desmedido de fertilizantes causa daños al medio ambiente y la salud (de Bang *et al.*, 2021) por

lo que se debe conocer las formas de absorción, detección, transporte y uso de los minerales por las plantas para poder optimizar su uso en la agricultura (Wang *et al.*, 2021).

Además, es necesario garantizar el abasto de alimentos ante el crecimiento desmedido de la población al mismo tiempo que frenar o disminuir el daño que la fertilización convencional a provocado por lo que es prioritario apostar a nuevas técnicas de manejo implícitas en la agricultura sostenible (Aasfar *et al.*, 2021), tales como el uso de biofertilizantes (Raklami *et al.*, 2019), bioestimulantes vegetales (De Pascale *et al.*, 2017) uso de complejos de fertilizantes con micronutrientes a través de sistema de liberación lenta y controlada (Mikula *et al.*, 2020) tal es el caso del complejo de geles de quitosán-Fe.

Fierro (Fe)

El fierro (Fe) es uno de los minerales más abundantes sobre la superficie de la tierra, ocupa el cuarto lugar, sin embargo, su biodisponibilidad se restringe a la insolubilidad de sus hidróxidos (Rodríguez-Celma *et al.*, 2019). Es considerado como un micronutriente indispensable para el crecimiento de las plantas, participa en varios procesos celulares como respiración, síntesis de clorofila y fotosíntesis además de ser cofactor de enzimas que participan en la transferencia de electrones (Kobayashi *et al.*, 2019).

La disponibilidad de este elemento en el suelo limita el rendimiento y nutrición de los cultivos (Schmidt *et al.*, 2020). Por lo que se considera como un factor clave en la producción de biomasa y calidad de los frutos.

Las deficiencias de Fe en los cultivos, afecta al sistema fotosintético pues altera la estructura de los cloroplastos, la síntesis de clorofila, provoca amarillamiento intervenal en las hojas, altera el transporte de electrones en los fotosistemas 1 y 2 así como la disminución del contenido de proteínas en estos y en el citocromo (Briat *et al.*, 2015).

El Fe es imprescindible en la mitigación del estrés causado por salinidad, sequía y metales pesados debido a que activa enzimas antioxidantes (catalasa, peroxidasa y super oxido dismutasa) que eliminan las especies reactivas de oxígeno que se forman cuando este es deficiente o excesivo ya que altera la tasa fotosintética y respiración y causa mayor acumulación de iones de Ca y Na (Tripathi *et al.*, 2018).

Vía de absorción y metabolismo del Fe en las plantas

Autores mencionan que la absorción del fierro se basa en 2 estrategias (I: reductora y II: quelante) que dependen del tipo de planta, es decir, los cultivos como el tomate y todas las plantas que no son gramíneas lo obtienen a través de la reducción del Fe^{3+} que es reducido por la Oxidasa de Reducción Férrica (FRO_2) en la membrana plasmática antes del transporte a través de la membrana por el Transportador 1 Regulado por Fierro (IRT1). Por otro lado, las plantas como el arroz, cebada y maíz que son gramíneas, absorben Fe a través de la estrategia II liberando fitosideróforos (MA) de la familia del ácido mugineico desde sus raíces para quelar Fe (III) en el suelo así pues los quelatos del fitosideróforo Fe^{3+} son importados por el transportador de oligopéptidos YS1 e YSL (Connorton *et al.*, 2017; Kobayashi *et al.*, 2019).

La estrategia I basada en la reducción de Fe III, implica la acidificación del apoplasto de la raíz y la rizosfera regulada por ATPasas de tipo P, de esta forma, el Fe^{3+} será quelado en la solución del suelo por compuestos fenólicos exudados por las raíces donde participa la enzima PRO2 la cual reduce el Fe III con electrones derivados del NADH citosólico a través de un cofactor hemo, así pues el Fe es transportado a la membrana plasmática de las células rizodérmicas y corticales por proteínas de la familia ZIP, principalmente IRT1. En la estrategia II los fitosideróforos se sintetizan a partir de metionina vía NA, el paso crítico de su biosíntesis lo realiza la nicotianamina aminotransferasa (NAAT). Los quelatos de hexadentado de los fitosideróforos con Fe^{3+} son absorbidos por las células de la raíz a través de las proteínas Yellow Stripe1 denominadas así por el fenotipo

clorótico del mutante YS1 que no puede captar complejos Fe-fitosideróforo (Andresen *et al.*, 2018).

El IRT1 pertenece a una familia de transportadores de membrana, útil para la absorción de iones metálicos divalentes en las células, característica que lo hace esencial para absorber Fe del suelo. Las plantas controlan la actividad de este transportador para catalizar la formación de radicales libres de oxígeno (ROS) (Hornbergs *et al.*, 2022).

Las proteínas bHLH desempeñan un papel clave en la regulación de la absorción de hierro ya que al momento se han demostrado que 16 de estas están implicados en el control de la homeostasis celular del hierro (Schmidt *et al.*, 2020).

Papel del Fe en la regulación redox de las plantas

El Fe puede causar toxicidad en las plantas por ser excesivo, o deficiente. Es un factor importante en la respiración, fotosíntesis, procesos de fijación de nitrógeno y en las reacciones redox de las proteínas Fe-S y los citocromos (sistemas de transporte de electrones) (Tripathi *et al.*, 2018).

Los sistemas férricos y ferrosos favorecen gran cantidad de potenciales redox que se pueden ajustar con precisión mediante distintos ligantes de gran importancia para los sistemas biológicos, hecho que explica la idoneidad de los complejos de Fe en procesos y reacciones catalíticas de importancia biológica (Lesjak & Srai, 2019).

Las reacciones redox en el suelo definen la disposición de metales pesados en este, causa de que los suelos agrícolas contengan grandes cantidades además de otros contaminantes por lo que el Fe es esencial en un conjunto de reacciones geoquímicas que controlan la movilidad y el destino de los metales (Lin *et al.*, 2021).

En las plantas, las enzimas del ciclo del glutatión-ascorbato (Asc-GSH), los compuestos fenólicos y los antioxidantes lipofílicos como los carotenoides y los

tocoferoles deben proporcionar protección en conjunto bajo estrés oxidativo (Dumanović *et al.*, 2021).

Especies reactivas de oxígeno

Las plantas a menudo producen ROS en diferentes organelos celulares (mitocondrias, cloroplastos, peroxisomas, retículo endoplásmico y membrana plasmática) por medio del metabolismo aeróbico como resultado del funcionamiento normal de las células que en condiciones óptimas pueden removerlos fácilmente a través de la activación del sistema antioxidante en el que participan enzimas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasas (POP) además de metabolitos como ascorbato (ASC), glutatión (GSH), tocoferol, entre otros (Lira-Saldivar *et al.*, 2016).

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son moléculas con uno o más electrones desapareados que se originan cuando un átomo pierde o gana un electrón o durante la escisión homolítica de un enlace covalente (Dumanović *et al.*, 2021). Incluyen radicales libres como el anión superóxido (O_2^-), hidroxilo ($\cdot OH$), moléculas no radicales como peróxido de hidrógeno (H_2O_2), oxígeno singlete (1O_2), entre otras (Sharma *et al.*, 2012). Actúan como moléculas de señalización en las células, detectan niveles inseguros de oxígeno atmosférico y cambios en las reacciones metabólicas, en las plantas superiores regulan el desarrollo, diferenciación, niveles redox, señalización de estrés, interacciones con otros organismos, respuestas sistémicas y muerte celular (Mittler, 2017).

Las NADPH oxidasas participan principalmente en la producción de ROS, pues transfieren electrones desde el NADPH citosólico al oxígeno apoplástico generando O_2^- . Por la enzima superóxido dismutasa (SOD), los superóxidos se convierten rápidamente en H_2O_2 , que es igual de tóxico, pero más estable que el O_2^- y capaz de atravesar la bicapa lipídica de la membrana plasmática (Molinari & Leonetti, 2023).

Las ROS se producen principalmente en cloroplastos, mitocondrias y peroxisomas, son responsables de la peroxidación de la membrana, lípidos y

fuga celular (Dumanović *et al.*, 2021). La cadena de transporte de electrones de la mitocondria, los peroxisomas, la NADPH oxidasa, el óxido nítrico sintetasa desacoplada y el sistema del citocromo P450 son las fuentes más importantes de producción de los ROS, el equilibrio entre la producción de los ROS y su eliminación permite una función celular normal, mientras que un desequilibrio causa estrés oxidativo con consecuencias patológicas (Carvajal, 2019).

El oxígeno es el radical libre más común en la atmósfera, si en su reducción a agua solo recibe un electrón, se producen ROS, el oxígeno puede recibir un exceso de energía y producir un singlete de oxígeno, $^1\text{O}_2$, una molécula altamente reactiva cuando se compara con el O_2 . El singlete puede transferir su energía a otras moléculas biológicas o reaccionar con ella misma, produciendo endoperóxidos o hidroperóxidos, el radical superóxido reacciona reduciendo quinonas y complejos de metales de transición Fe-Cu, alterando la actividad de las enzimas que contienen estos metales (Camarena-Gutiérrez, 2006). Se producen de manera inevitable en la reducción a agua pero en condiciones de estrés pueden ser excesivas y causar daños irreversibles (Sepulvéda-Jiménez *et al.*, 2005) por lo que se deben mantener en equilibrio.

Cuadro 1. Principales especies reactivas de oxígeno

Especies reactivas de oxígeno (ROS)	
Radicales	
Superóxido: $\text{O}_2^{\cdot-}$	Radical alcoxilo: RO
Hidroxilo: $\cdot\text{OH}$	Radical peroxilo: ROO
No radicales	
Peróxido de hidrógeno: H_2O_2	Ozono: O_3
Oxígeno singlete: $^1\text{O}_2$	Peróxido orgánico: ROOH
Acido hipocloroso: HOCl	Ácido hipobromoso: HOBr

Fuente: adaptado de Carvajal, 2019.

Cultivo de tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) forma parte de la familia de las solanáceas (Quinet *et al.*, 2019), es una de las hortalizas que más se cultiva a nivel mundial y ocupa el tercer lugar en la producción (Tran & Camps, 2021). Su demanda incrementa constantemente de la mano con su producción, consumo y distribución (Terry *et al.*, 2017). En México ocupa el tercer lugar en la exportación de cultivos agrícolas por sus características físicas, químicas y nutricionales (Flores *et al.*, 2021).

Las plantas de tomate durante la germinación poseen todos los nutrientes que requieren para la emergencia, en la etapa de plántula absorben nutrientes para un mejor crecimiento y adquieren mayor cantidad de nutrientes durante el crecimiento vegetativo que al acercarse a la madurez, en la etapa vegetativa requieren principalmente N, K, P, Ca, Mg y S (Bodale *et al.*, 2021).

El cultivo de tomate se ve afectado por diferentes condiciones bióticas y abióticas, es sensible a la salinidad, su crecimiento y desarrollo disminuyen cuando la conductividad eléctrica del riego suministrado es mayor a 2.5-4.0 dS.m⁻¹ (Rodríguez-Ortega *et al.*, 2019) por lo que se origina estrés iónico, osmótico, oxidativo e hídrico (Flemer *et al.*, 2022). Además, se ve afectado por la sequía, contaminación de metales pesados, luz, temperaturas extremas, deficiencias de nutrientes y ataques de hongos, virus, bacterias, nematodos e invasión de hervencias (Ashrafi-Dehkordi *et al.*, 2018).

Las plantas de tomate como muchos otros cultivos demandan gran cantidad de nutrientes por lo que la calidad de sus frutos depende de la nutrición ya que las deficiencias o excesos de nutrientes afecta su metabolismo y cambia las características morfológicas y anatómicas de las hojas (Maia *et al.*, 2019). Entre los minerales que requiere el cultivo de tomate en mayor cantidad se encuentran el nitrógeno, potasio, magnesio, calcio, fosforo y azufre y en menor proporción hierro, boro, manganeso, cobre, cloro, zinc y molibdeno (Tran *et al.*, 2019).

El tomate es una fruta sensorialmente atractiva por sus componentes químicos y antioxidantes, vitaminas, compuestos bioactivos, metabolitos y por poseer características anticancerígenas (Quinet *et al.*, 2019). Representa una fuente importante de nutrición por su contenido de metabolitos secundarios como carotenoides, compuestos fenólicos, ácido ascórbico y flavonoides.

Compuestos bioactivos y antioxidantes en tomate

Los tomates poseen compuestos bioactivos conocidos como metabolitos secundarios a los cuales se les atribuye la prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer y enfermedades neurodegenerativas. Se encuentran en altas concentraciones β -carotenos, licopeno, ácido ascórbico, tocoferol y compuestos fenólicos que además del valor nutritivo y aporte a la salud contribuyen en sus características sensoriales (Ali *et al.*, 2021).

Estos productos varían de acuerdo con el tipo de cultivo, variedad, manejo y condiciones ambientales (Kelebek *et al.*, 2017).

Carotenoides

Los carotenoides son pigmentos responsables de los colores amarillo, naranja y rojo de muchas frutas y verduras con propiedades antioxidantes capaz de mejorar el sistema inmunológico y reducir del riesgo de enfermedades degenerativas como varios tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares, cataratas y degeneración macular, además son provitamina A y se incorporan como ingredientes bioactivos a las formulaciones de alimentos (Szabo *et al.*, 2021). Los principales carotenoides del tomate son β -caroteno, licopeno y luteína (Kelebek *et al.*, 2017).

β -caroteno

El β -caroteno se acumula durante la maduración de los frutos de tomate, su incremento promueve características de maduración como retraso del ablandamiento y prolongación de la vida útil, estimula el aumento del ácido

abscísico, reduce la producción de etileno, aumenta el volumen del material de la pared celular y propicia una cutícula más gruesa (Diretto *et al.*, 2020).

El β -caroteno elimina el oxígeno singulete y tiene actividad antioxidante significativa (Black *et al.*, 2020).

Bakker *et al.* (2016) Encontró que las mujeres con un contenido plasmático alto de β -caroteno y α -caroteno tienen menor riesgo de presentar cáncer de mama.

Licopeno

El licopeno es un pigmento natural con cualidades benéficas en la salud humana, protege a los lípidos, proteínas y ADN del daño oxidativo, estimula la modulación del crecimiento celular y la expresión de conexina 43, regula los niveles sanguíneos de las proteínas de unión a IGF y actúa como intermediario en procesos inmunitarios e inflamatorios (Caseiro *et al.*, 2020). Es un componente bioactivo para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, crónicas y reducción de riesgos de cáncer (Li *et al.*, 2018).

Este antioxidante se obtiene principalmente del tomate y subproductos, representa más del 80% de los pigmentos presentes en frutos de tomate maduros (Ilahy *et al.*, 2018).

Ácido ascórbico

El ácido ascórbico, mejor conocido como vitamina C, es un conocido antioxidante que actúa eliminando radicales libres que promueven el envejecimiento de las células a través del estrés oxidativo y es fundamental en la síntesis de colágeno (Njus *et al.*, 2020). Tiene capacidades redox y funciona como cofactor de varias reacciones enzimáticas, por lo que desempeña funciones importantes en varios procesos fisiológicos del ser humano (Gorkom *et al.*, 2019).

Entre las vitaminas más importantes del tomate se encuentra la vitamina C en concentraciones de 85.5 a 560 mg kg⁻¹ dw, y representa una de las principales fuentes de aporte a la dieta humana (Martí *et al.*, 2018).

Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios que evidencian su participación en la prevención de varias enfermedades (cardiovasculares, cáncer, diabetes, envejecimiento, etc.) por poseer múltiples efectos como antioxidante, antimicrobiano, anticancerígeno y antiinflamatorio, se encuentran presentes en varias especies vegetales, poseen una estructura química que comprende uno o más anillos aromático con uno o más sustituyentes hidroxilo que pueden expresarse como flavonoides, fenoles, taninos, etc. (XU *et al.*, 2017).

En tomates, el contenido de compuestos fenólicos es deferente con relación a su morfología, en frutos maduros se encuentran principalmente el ácido clorogénico, la quercetina y la naringenina chalcona mientras que en frutos más rojos y amarillos destaca el ácido cafeico, sin embargo, se encuentran presentes en todos los tejidos mientras que los flavonoides y derivados se concentran en la epidermis (Lima *et al.*, 2022).

Flavonoides

Los flavonoides son compuestos fenólicos reconocidos por los beneficios que aportan a la salud a través de aplicaciones nutraceuticas, farmacéuticas, medicinales y cosméticas, sus efectos bioquímicos y antioxidantes se asocian con beneficios ante enfermedades como cáncer, Alzheimer, aterosclerosis, entre otras. En las plantas funcionan como protectores ante diferentes tipos de estrés, protegen de la radiación, actúan como moléculas de señalización, compuestos alopatóicos, fitoalexinas, compuestos detoxificantes y compuestos defensivos antimicrobianos y promueven la aclimatación de las plantas a través de la generación de tolerancia a heladas y sequias (Panche *et al.*, 2016).

En los tomates, la acumulación de flavonoides en la epidermis se asocia con la maduración de los frutos (Wu *et al.*, 2020).

Deficiencias de Fe en el cultivo de tomate

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial en la nutrición de las plantas, interviene en la síntesis de clorofila, la fotosíntesis, transporte de electrones, síntesis de ADN y en el proceso de fijación de nitrógeno, además, actúa como cofactor dentro de muchas enzimas antioxidantes, como la catalasa (CAT) y el superóxido dismutasa (SOD), que se encargan de la protección de especies reactivas de oxígeno. La poca disponibilidad de Fe, principalmente en suelos calcáreos con pH alcalino conlleva a la reducción de la productividad y calidad de los cultivos (Carrasco-Gil *et al.*, 2021).

La deficiencia de Fe en plantas de tomate reduce el crecimiento y se puede observar como clorosis férrica en hojas ya que disminuye el contenido de clorofila y por ende afecta el metabolismo del cultivo (Astolfi *et al.*, 2020). Se ha visto que estimula la acumulación de NO para promover la ramificación de raíces para tolerar las deficiencias de este nutriente a través del aumento de la biosíntesis de etileno (Chen *et al.*, 2022). Así mismo, la falta de Fe elimina la disponibilidad del azufre y genera tallos acortados (Tran & Camps, 2021).

Complejo de quitosán

El quitosán es un polímero y oligómero de glucosamina que se obtienen por desacetilación básica del polímero de quitina del exoesqueleto de crustáceos, está considerado dentro del grupo de los bioestimulantes agrícolas además de tener una amplia aplicación en la agricultura por sus características biológicas que han demostrado ser promotor de crecimiento y desarrollo vegetal en cultivos de interés económico (Terry *et al.*, 2017).

Este polímero contiene capacidad mucoadhesiva que permite mejorar la permeabilidad a través de las superficies biológicas, modificar su estructura química y ser biocompatible con otros elementos por lo que puede ser empleado como encapsulador para proteger elementos, controlar su liberación y reducir su toxicidad para alcanzar suministros de pesticidas, nutrientes y micronutrientes a través de este medio (Qu & Luo, 2020).

Las características fundamentales del quitosán como biomaterial son su citocompatibilidad, mucoadhesión y actividad hemostática, relacionadas con la presencia de grupos amino protonables dentro de los restos de d-glucosamina que se exponen a partir de las unidades originales de acetilglucosamina de la quitina por medio de la desacetilación del polisacárido, mientras más unidades se desacetilan, quedan más grupos amino reactivos expuestos para formar una reacción o unión química con otro elemento, en este mismo sentido una de las propiedades de interés del quitosán es su capacidad para formar quelatos con un amplio espectro de iones metálicos (Gritsch *et al.*, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en un invernadero tipo multitunel y en el laboratorio de fisiología vegetal en el departamento de botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada en Saltillo, Coahuila, México (25° 21'LN, 101° 01'LO, altitud 1743 m). Se utilizaron semillas de tomate saladette "El cid F1" (Harris Moran) de crecimiento indeterminado. El trasplante se llevó a cabo en macetas de polietileno negro de 10 L de capacidad con sustrato peat moss/perlita 1:1 (v/v), el cultivo fue suministrado con solución Steiner (Steiner, 1961) a través de un sistema de riego dirigido. Las partículas de gel de quitosán-Fe, fueron sintetizadas y proporcionadas por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), estas fueron dispersadas formando una pequeña capa sobre el sustrato mientras estaba al 50% de capacidad de la maceta y posteriormente fue cubierto por el mismo hasta el 100% de capacidad de la maceta.

El experimento se desarrolló durante los meses de junio a octubre del año 2021, el diseño experimental consistió en cuadro latino con un arreglo de 6 filas, 6 columnas y 6 repeticiones. El manejo agronómico se desarrolló de acuerdo con el manual de prácticas para este cultivo de López & Ligia (2016).

Tratamientos

Los tratamientos consistieron en tres diferentes dosis: 1, 2 y 3 g de gel de quitosán-Fe respectivamente, seleccionadas para probar en un rango de dosis baja, media y alta, fueron aplicadas de manera dispersa al sustrato en el trasplante. Además de tres controles, uno únicamente con solución Steiner sin aplicaciones de Fe (control absoluto), sulfato FeSO_4 y quelato Fe-EDTA (controles comerciales), los cuales se aplicaron cada 7 días vía drench a partir del trasplante durante todo el desarrollo del cultivo.

Cuadro 2. Tratamientos

T0	Testigo absoluto
S	FeSO ₄ (aplicado cada 7 días)
Q	Fe-EDTA (aplicado cada 7 días)
DB	1 g de quisán+ FeSO ₄
DM	2 g de quisán+ FeSO ₄
DA	3 g de quisán+ FeSO ₄

Geles de quitosán-Fe

Los geles de quitosán-Fe fueron proporcionados por el Centro de Investigación en Química Aplicada donde se obtuvieron a través del siguiente procedimiento, a un litro de agua destilada se adicionaron cinco gotas de ácido acético, la solución se agito manual y posteriormente se adicionaron 45 g de sulfato férrico Fe₂(SO₄)₃, se agitaron manualmente durante cinco minutos hasta disolución. La solución con sales de hierro se agregó a 150 g de quitosán (CS) contenidos en un refractario, la mezcla de reacción se agito manualmente hasta homogenizar la solución en el CS, la cual fue absorbida después de 30 min en el CS y se dejó reposar 30 min para que se impregnara completamente. Después la mezcla se mantiene por 72 h a una temperatura de 75-80 °C, luego se deja secar en una estufa a 95 °C con vacío por 2 h. De este proceso se obtuvieron 183 g de CS, donde el 24.5% es Fe₂(SO₄)₃.

Variables agronómicas

Para evaluar crecimiento y desarrollo del cultivo, se midió altura con un flexómetro, diámetro de tallo con vernier, se contabilizaron número de hojas, número de racimos y número de frutos por planta, además se midió la biomasa fresca de tallo y hojas con una balanza digital Adventurer Pro (OHAUS).

Calidad del fruto

Para estimar la calidad del fruto, se cosecharon tres frutos por planta de tamaño uniforme del segundo racimo, en la etapa de maduración 6 de acuerdo con la escala del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2017), en estos se midió la firmeza de los frutos con un penetrómetro manual FDK 20 (Wagner Instruments), sólidos solubles totales (TSS) a través de un refractómetro digital MASTER-100H (ATAGO), mientras que el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE) se estimaron con un potenciómetro digital HI 98130 (Hanna Instruments), el potencial redox (ORP) se midió con un potenciómetro de pH/potencial de oxidación-reducción HI2211 (Hanna Instruments).

Contenido de clorofilas

Las clorofilas se determinaron de acuerdo con (Nagata & Yamashita, 1992). Se midieron absorbancias (Abs) a longitudes de onda de 645 y 663 nm en un espectro UV-Vis UV2150 (UNICO Spectrophotometer). Para determinar clorofila a, clorofila b y clorofilas totales se utilizaron las Ecuaciones 1, 2 y 3.

- (1) Clorofila a = $0.999 * Abs_{663} + 0.0989 * Abs_{645}$
- (2) Clorofila b = $-3.28 * Abs_{663} + 1.77 * Abs_{645}$
- (3) Clorofilas totales = Clorofila a + Clorofila b

Compuestos antioxidantes

Vitamina C

La vitamina C (ácido ascórbico) se determinó por el método de Hung & Yen. (2002). Se pesaron 10 mg de tejido liofilizado, colocándolo en un tubo eppendorf de 2 mL, se agregó 1 mL de ácido metafosfórico (HPO_3) al 1% y se homogenizó en vortex, después se centrifugó en microcentrifuga FC5515 R (OHAUS Frontier) a 12,500 rpm por 5 min a 4 °C. Se tomaron 0.2 mL de extracto y se agregaron 1.8 mL de 2-6 diclorofenolindofenol. Finalmente se leyó en espectrofotómetro

UV2150 (UNICO Spectrophotometer) a una longitud de onda de 515 nm en celdilla de cuarzo.

Flavonoides

La cuantificación de flavonoides se realizó mediante el método de Dowd, adaptado por Turan & Mammadov. (2018) con algunas modificaciones. Se pesaron 20 mg de tejido liofilizado, se colocaron en tubo eppendorf de 2 mL, se agregaron 2 mL de metanol grado reactivo, y posteriormente se homogenizó en vortex, luego se centrifugó en una microcentrífuga FC5515 R (OHAUS Frontier) a 10,000 rpm por 2 min a -4 °C. La mezcla resultante se filtró con papel Whatman N° 1. Posteriormente se agregaron 1 mL del extracto y 1 mL de solución metanólica de tricloruro de aluminio ($AlCl_3$) al 2% en un tubo eppendorf y se dejó en reposo durante 20 min en oscuridad a 4 °C. Transcurrido el tiempo se tomó la lectura en espectrofotómetro UV-Vis UV2150 (UNICO Spectrophotometer) a una longitud de onda de 415 nm en una celdilla de cuarzo. Para el blanco se utilizó 1 mL de metanol grado reactivo y 1 mL de Tricloruro de Aluminio ($AlCl_3$). La curva de calibración se realizó con quercetina (0-30 mg L⁻¹). De esta manera, el contenido de flavonoides fue expresado en mg por 100 g de muestra en base a peso seco.

Fenoles

Para la extracción de fenoles se utilizó el método de Folin Ciocalteu descrita por Pérez-Nájera *et al.* (2013). Se pesaron 50 mg del tejido liofilizado y se colocaron en tubo eppendorf de 2 mL. Se agregó 1 mL de solución agua:acetona (1:1), se agitó en vortex por 30 s y se sonicó por 5 min a 0 °C. Se centrifugó a 12500 rpm por 10 min a 4 °C, se extrajo el sobrenadante en un tubo eppendorf. Se dejó reposar durante 20 min en oscuridad a 4 °C. En un tubo eppendorf se agregaron 18 µL del sobrenadante, 70 µL del reactivo Folin-Ciocalteu, 175 µL de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20%, 1.74 mL de agua destilada (fría), se sometió a vortex durante 30 s. Las muestras se colocaron en baño maría a 45 °C por 30 min (Nsor-

Atindana *et al.*, 2012). La cuantificación de fenoles se realizó mediante espectrofotometría UV-Vis UV2150 (UNICO Spectrophotometer). Las absorbancias de las muestras se leyeron a una longitud de onda de 750 nm en una celdilla de cuarzo. Para el blanco se sustituyó el extracto por una solución agua:acetona (1:1). La curva de calibración se realizó con ácido gálico (0-250 mg L⁻¹). Los fenoles totales se expresaron en mg por g en base a peso seco.

β-caroteno y Licopeno

Los carotenoides se determinaron de acuerdo con Nagata & Yamashita, (1992). Se midieron a absorbancias de 453, 505, 663 y 645 nm en un espectro UV-Vis UV2150 (UNICO Spectrophotometer). El licopeno y β-caroteno se determinaron con las ecuaciones 4 y 5. Los resultados se expresaron en mg 100 g⁻¹ de peso seco.

$$(4) \quad \text{Licopeno} = 0.0458 * \text{Abs}_{663} + 0.204 * \text{Abs}_{645} + 0.372 * \text{Abs}_{505} - 0.0806 * \text{Abs}_{453}$$

$$(5) \quad \beta \text{ caroteno} = 0.216 * \text{Abs}_{663} - 1.22 * -0.304 * \text{Abs}_{505} + 0.452 * \text{Abs}_{453}$$

Contenido de minerales en hojas

El contenido de minerales se determinó utilizando un espectrofotómetro de emisión de plasma 7400 (ICP, Thermo Jarrel Ash Irish Advantage). Se pesó un gramo de cada muestra y se añadió HNO₃ a 400 °C para la digestión siguiendo la metodología de Hernández-Hernández *et al.* (2018).

Análisis estadístico

El diseño experimental consistió en un cuadro latino con arreglo de 6 filas, 6 columnas y 6 repeticiones. Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza con prueba de medias LSD Fisher ($p \leq 0.05$) empleando el programa estadístico Info Stat 2021.

RESULTADOS

Variables agronómicas

Las variables agronómicas evaluadas no se vieron afectadas con los tratamientos de quitosán-Fe en comparación con los testigos ya que no mostraron diferencias estadísticamente significativas (Figura 1).

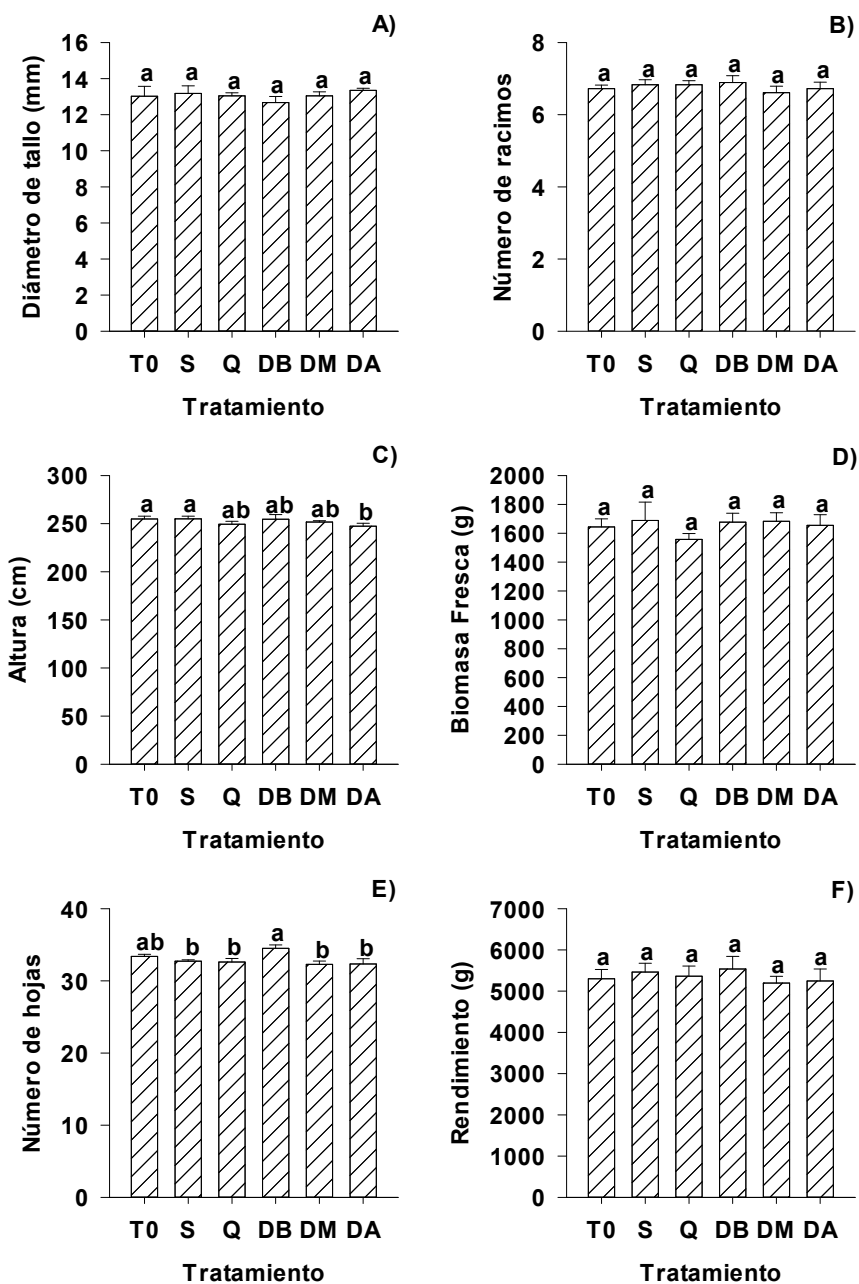


Figura 1. Variables Agronómicas. Diámetro del tallo (A), altura (B), número de hojas (C), número de racimos (D), biomasa fresca (E), número de frutos (F) y rendimiento (G). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

Calidad del fruto

En este parámetro, las variables diámetro polar, diámetro ecuatorial, firmeza, sólidos solubles totales, pH y grosor de pericarpio no se vieron influenciadas entre los distintos tratamientos, caso contrario en conductividad eléctrica (CE) y potencial de óxido reducción (ORP). Donde CE presentó reducción del 35.64% en frutos de plantas tratadas con DA quitosán-Fe, 19.55% en el tratamiento DM quitosán-Fe y 13.56% en DB quitosán-Fe en comparación con el control absoluto mientras que, con S, DA quitosán-Fe se redujo 32.49 y 30.28% contra Q, DM quitosán-Fe 16.45% comparado con S y 14.19% con Q y, DB quitosán-Fe se redujo 10.41% contra S y 8.2% con Q (Figura 2 D). Del mismo modo, ORP presentó mayor disminución en los tratamientos de quitosán-Fe, DA quitosán-Fe 266.97%, DM quitosán-Fe 228.12% y DB quitosán-Fe 210.41% en comparación con el control absoluto, mientras que con S 243.94, 205.095 y 187.37% respectivamente y 235.25, 196.395 y 178.685% contra Q respectivamente. (Figura 2 E).

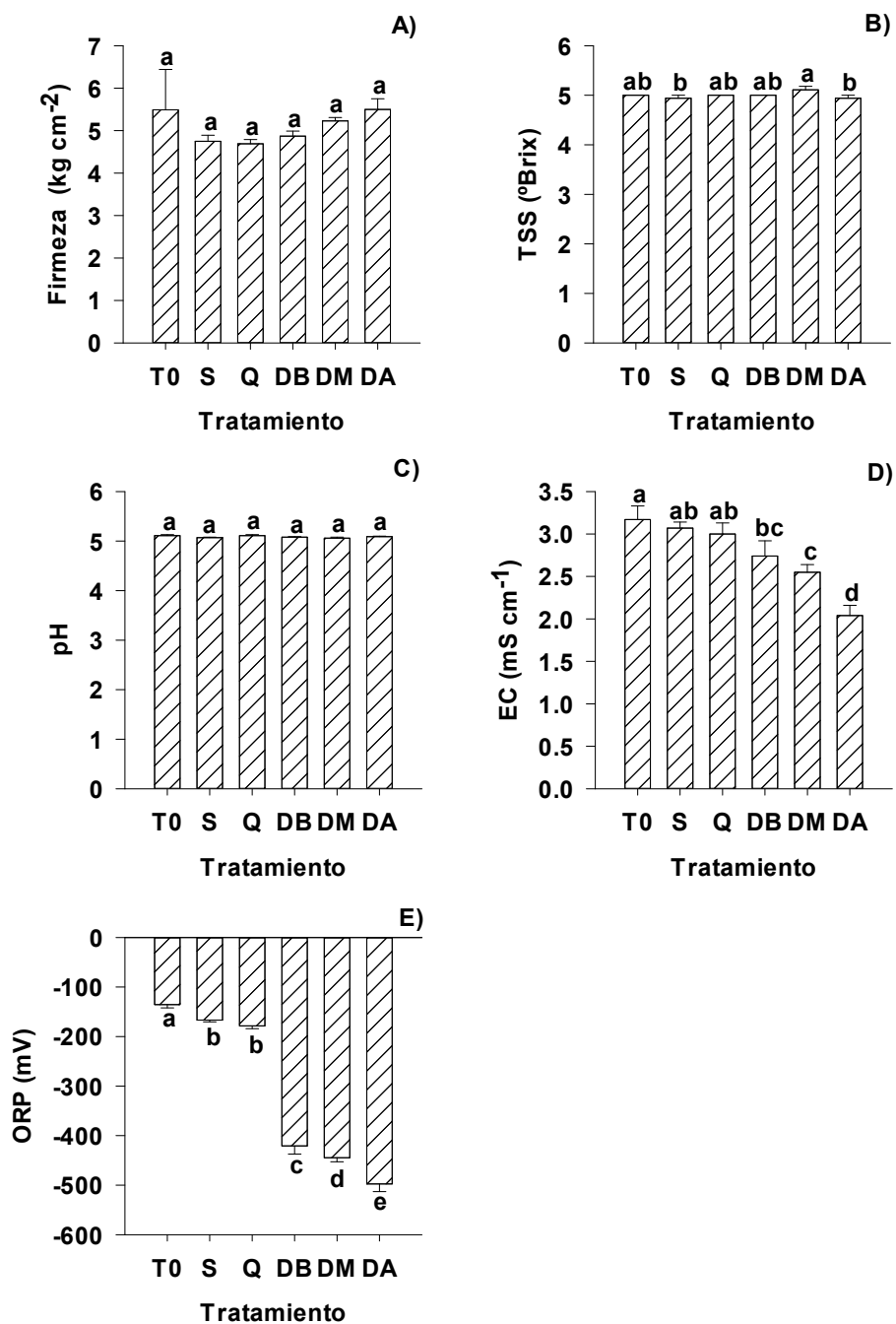


Figura 2. Calidad del fruto. Firmeza (A), TSS Sólidos solubles totales (B), pH Potencial de hidrógeno (C), EC Conductividad eléctrica (D) y ORP Potencial oxido reducción (E). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

Contenido de clorofilas

Los tratamientos DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe aumentaron la clorofila *a* en 20.09 y 19.16% respectivamente, en comparación con el control. Lo mismo ocurre contra S donde DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe fueron superiores en un 6,93% y en un 6% respectivamente (Figura 4A). De manera similar los tratamientos DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe incrementaron la clorofila *b* en un 26.62 y 22.07% respectivamente y fueron superiores S 7.51 y 5.97% respectivamente (Figura 3 B). Así mismo, DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe incrementaron las clorofilas totales en un 22.01 y 20.47% respectivamente además de crecer un 7.51 y 5.97% en comparación a S (Figura 3 C).

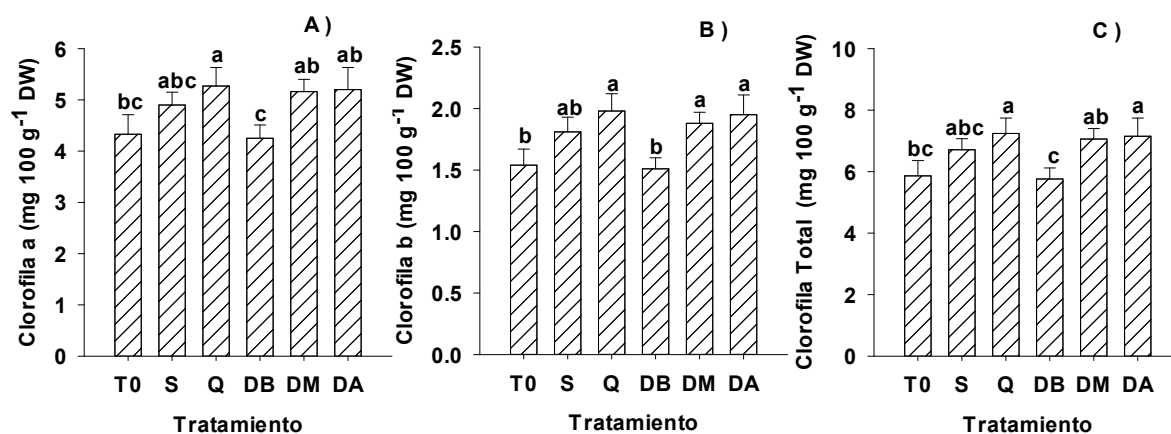


Figura 3. Contenido de Clorofilas. Clorofila *a* (A), Clorofila *b* (B) y Clorofila total (C). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

Antioxidantes en hojas y frutos

Vitamina C

El ácido ascórbico en hojas disminuyó 4.92, 8.33 y 2.65% en DA quitosán-Fe, DM quitosán-Fe y DB quitosán-Fe respectivamente en comparación con el control, sin embargo, en todos los tratamientos de quitosán-Fe se incrementó con respecto a S en 6.06, 2.65 y 8.33% respectivamente y DB quitosán-Fe con 3.78% y Da quitosán-Fe con 1.51% con respecto a Q. (Figura 4A). En cambio, en frutos el ácido ascórbico fue ligeramente superior en todos los tratamientos con

respecto al control, 3.057, 1.97 y 0.17% en DB quitosán-Fe, DM quitosán-Fe y DA quitosán-Fe respectivamente y en un 1.44 y 0.36% superior a S y 2.345 y 1.26% por encima de Q en DB quitosán-Fe y DM quitosán-Fe respectivamente. (Figura 4B).

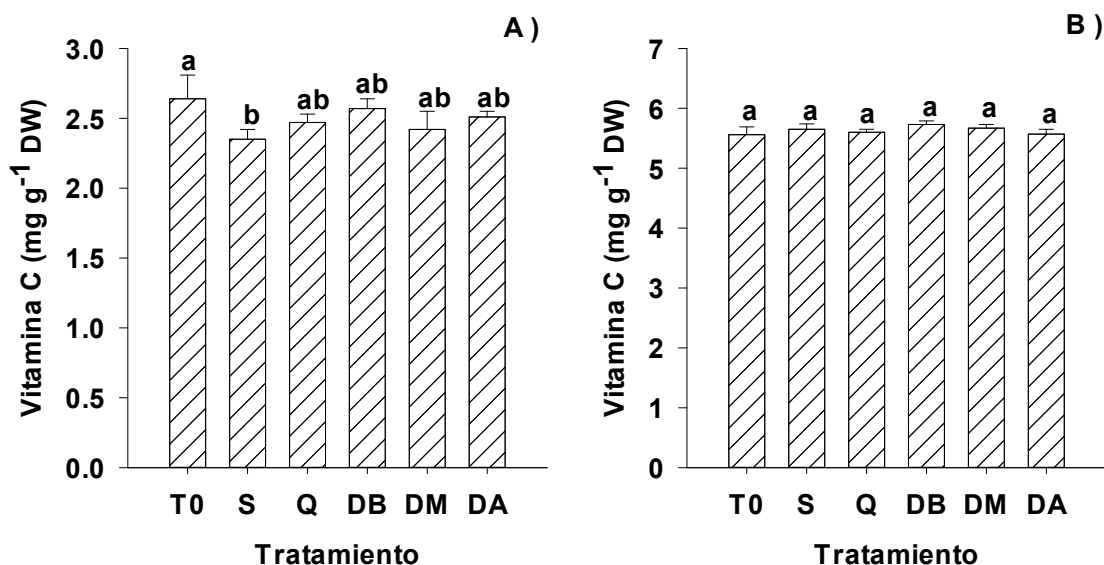


Figura 4. Vitamina C en hojas y fruto. Vitamina C en hoja (A) y vitamina C en fruto (B). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

Flavonoides

En hojas se encontró que los flavonoides incrementaron en DB quitosán-Fe, DM quitosán-Fe y DA quitosán-Fe en un 0.77, 7.42 y 23.17% respectivamente en comparación con el control además de que DA quitosán-Fe aumentó 4.8% contra S y 8.80% con respecto de Q. (Figura 5A).

Los hallazgos para frutos indicaron que DA quitosán-Fe aumento 30.46% en comparación con el control diferente de DB quitosán-Fe y DM quitosán-Fe que disminuyeron con respecto al control en 17.30 y 7.16% correspondientemente. (Figura 5B).

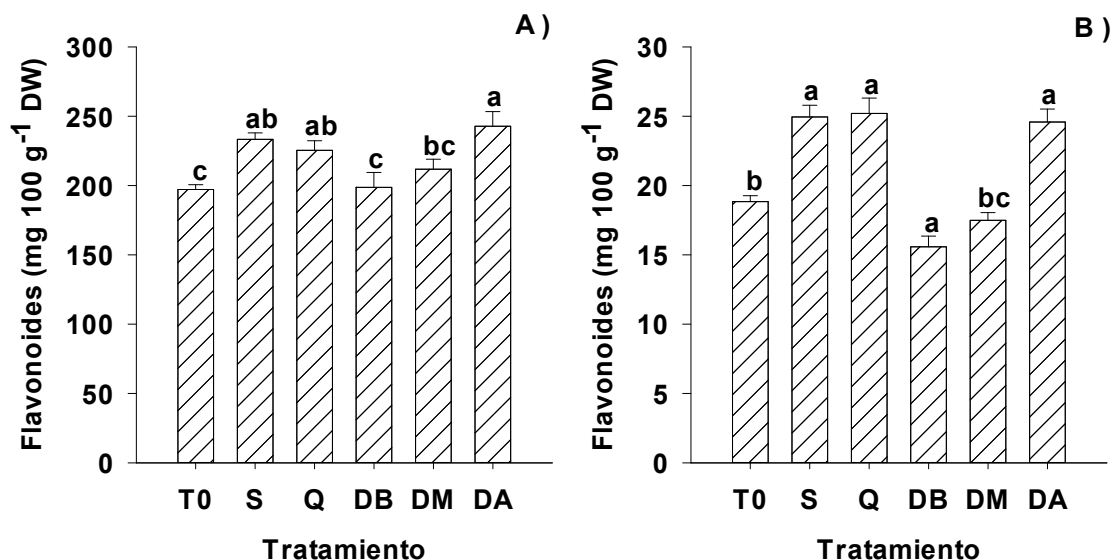


Figura 5. Flavonoides. Flavonoides en hojas (A) y Flavonoides en Fruto (B). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

Fenoles

En hojas se observó que los tratamientos con quitosán-Fe disminuyeron con respecto al control, pero fueron mayores a S por 16.79, 4.8 y 0.21% en DM quitosán-Fe, DB quitosán-Fe y DA quitosán-Fe respectivamente igual que superiores a Q en 17.48, 5.49 y 0.69% correspondientemente. (Figura 6A)

Contrario a lo anterior, en frutos resultaron incrementarse en todos los tratamientos, DB quitosán-Fe, DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe en un 19.27, 20.88 y 62.80% respectivamente en función del control, además, DM quitosán-Fe supero a S en un 32.48% y a Q en un 33.63%. (Figura 6B). Así pues, los compuestos fenólicos disminuyeron con respecto al control, pero se incrementaron en función de Q.

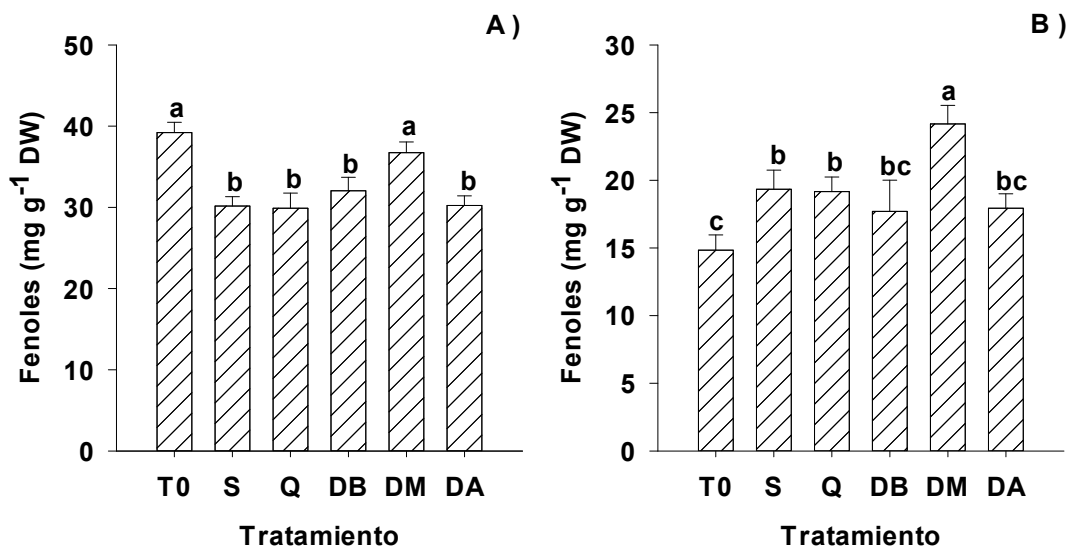


Figura 6. Fenoles. Fenoles en hojas A y Fenoles en Fruto B. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

β -caroteno

En hojas el contenido de β -caroteno fue superior en DM quitosán-Fe en un 12.86% y en DA quitosán-Fe en un 12.46% con respecto al control, pero disminuyó en DB quitosán-Fe un 0.80%. así mismo, DM quitosán-Fe superó a S un 9.25% y a Q 3.63% mientras que DA quitosán-Fe lo hizo en un 8.85% y en un 8.82% respectivamente. (Figura 7A).

En frutos todos los tratamientos aumentaron el contenido de este compuesto con respecto al control. DA quitosán-Fe incrementó en un 79.24%, DB quitosán-Fe en un 20.12% y DM quitosán-Fe en un 9.43%. Además, DA quitosán-Fe incrementó su contenido un 49.69% en comparación a S y 56.60% con respecto a Q. (Figura 7B).

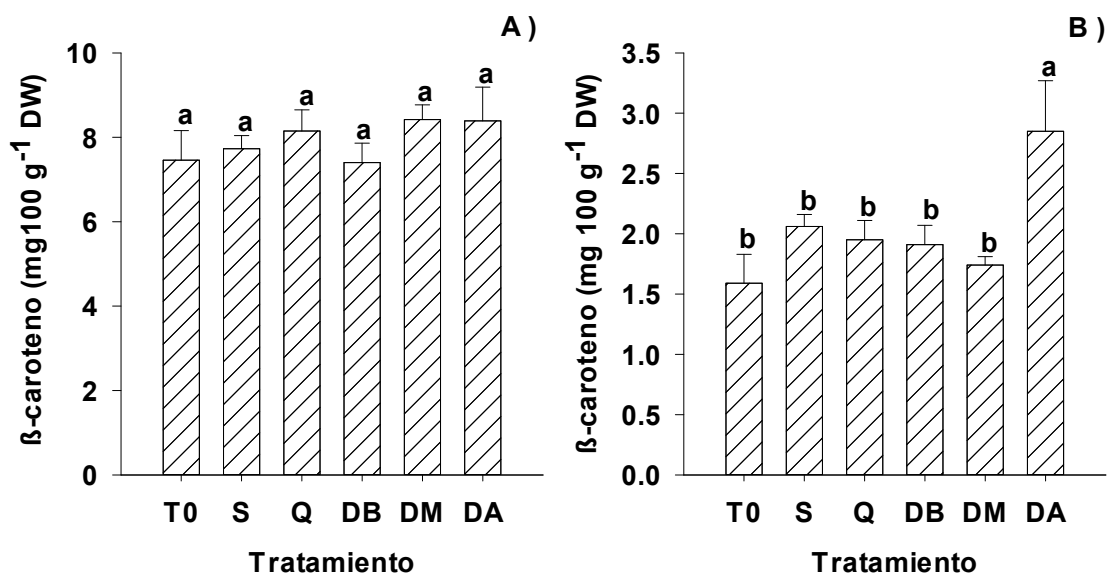


Figura 7. Contenido de β -caroteno en tomates. β -caroteno en hojas (A) y β -caroteno en frutos (B). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

Licopeno

Se encontró que DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe incrementaron su contenido en un 50.66 y 2.33% correspondientemente con respecto al control contrario a DB quitosán-Fe que lo redujo en un 6.50% al mismo tiempo que DA quitosán-Fe resulto ser 3% mayor que Q. (Figura 8).

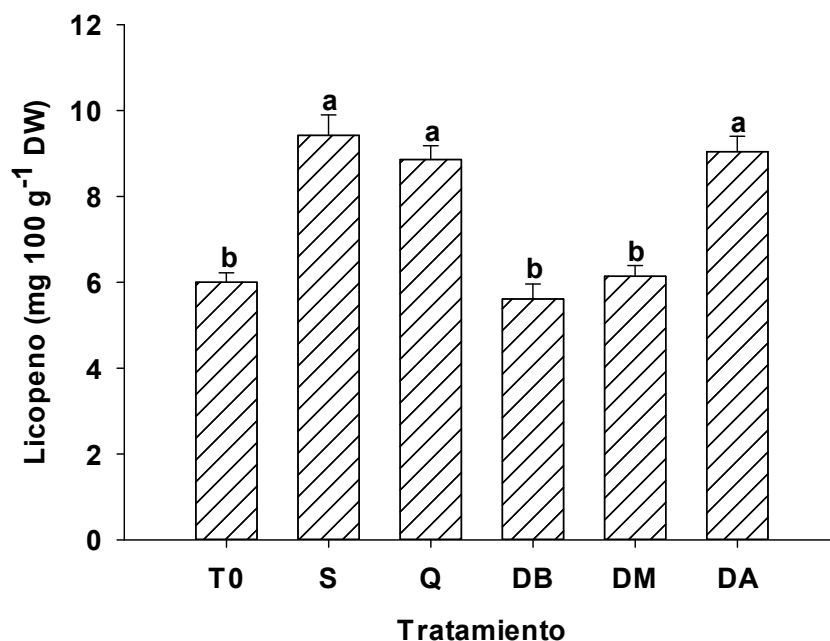


Figura 8. Contenido de licopeno en tomate. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

Contenido mineral

El contenido de macronutrientes en hojas de plantas de tomate tratadas con quitosán-Fe fue diferente para cada elemento mineral. En el contenido de P y K no tuvo ninguna influencia ya que no presentaron diferencias significativas.

En el contenido de Ca la DA quitosán-Fe indujo un mayor contenido, con un incremento del 28.62% con respecto al control y 1 y 22.87% con respecto a S y Q respectivamente.

El contenido de S se incrementó con la DA quitosán-Fe en un 14.20, 12.52 y 1% con respecto al T0, Q y S respectivamente.

El contenido de Mg se incrementó con la DA quitosán-Fe en un 23.48, 19.24 y 6.76% con respecto al control, Q y S respectivamente, mientras que con DM quitosán-Fe aumento en un 7.11 y 3.43% con respecto al control y Q.

El contenido de Na aumento 70.23 y 15.28% en las plantas tratadas con DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe correspondientemente con respecto al control. Además, el tratamiento DA quitosán-Fe incremento su contenido en un 66.05 y 30.98% en comparación con Q y S.

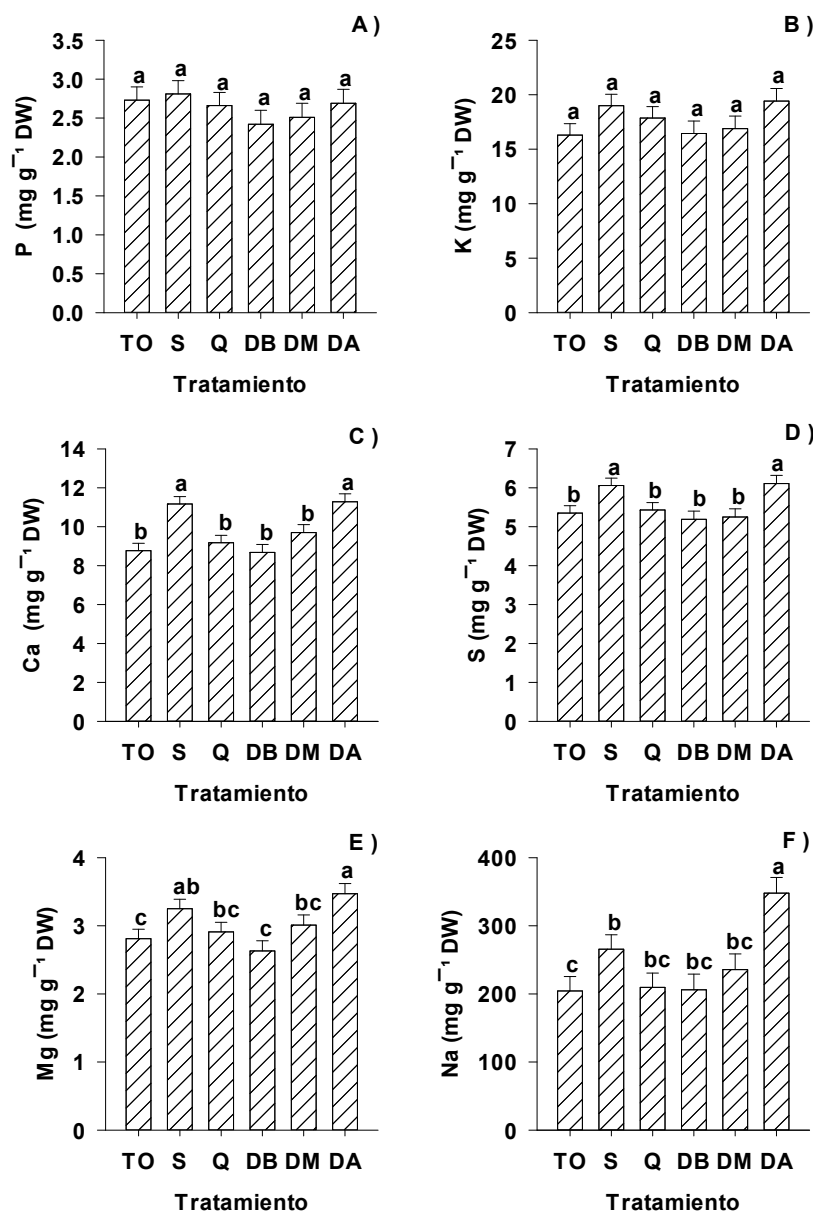


Figura 9. Macronutrientes en hojas de tomate. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

El contenido de micronutrientes en hojas de tomate presentó diferencias significativas en los diferentes elementos. El contenido de Fe aumento 72.43, 31.76 y 1.23% en las plantas tratadas con DA quitosán-Fe, DM quitosán-Fe y DB quitosán-Fe respectivamente en comparación con el control, además DA quitosán-Fe presento un incremento del 39.94 y 19.98% con comparación con Q y S respectivamente mientras que DM quitosán-Fe 6.93% con respecto a Q.

El contenido de Cu mostro incremento del 25.07, 20 y 3.66% en las plantas tratadas con DA quitosán-Fe en comparación con el control, Q y S, mientras que DB quitosán-Fe solo tuvo un ligero incremento del 3.09% con respecto al control. El contenido de Zn presento un aumento del 92.26 y 5.25% en las plantas tratadas con DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe, así como diferencias del 88.12 y 59.33% en DA quitosán-Fe con respecto a Q y S.

El contenido de boro aumento en plantas tratadas con DA quitosán-Fe y DM quitosán-Fe en un 7.81 y 7.1% en comparación con el control.

El contenido de Mn incremento 24.78 y 3.74% en plantas tratadas con DA quitosán-Fe y DB quitosán-Fe. Así mismo, aumento con DA quitosán-Fe un 19.77 y 7.19% con respecto a Q y S.

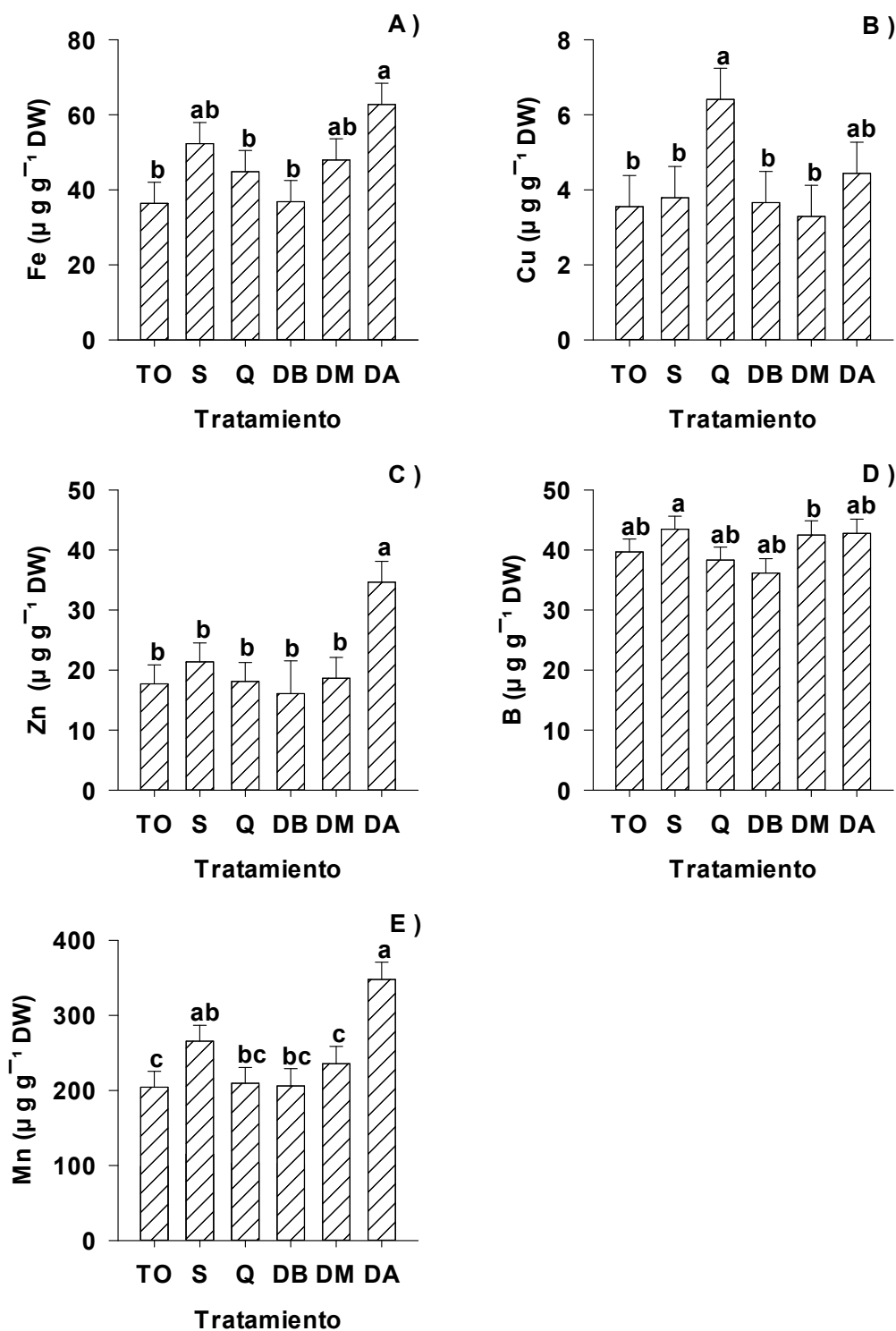


Figura 10. Micronutrientes en hojas de tomate. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$) $n=6$, valores promedio \pm error estándar.

DISCUSIÓN

Las variables agronómicas evaluadas no se vieron afectadas con los tratamientos de quitosán-Fe en comparación con los testigos, estas respuestas son similares a las que obtuvo Boonlertnirun *et al.* (2006) en plantas de arroz tratadas con quitosán de diferente masa molecular aplicado a la semilla y por aspersion foliar y difiere de los hallazgos de Reyes-Pérez *et al.* (2020) en cultivo de tomate tratado con diferentes dosis de quitosán vía foliar. Estos resultados parecen indicar que los efectos del quitosán varían en función del cultivo y modo de aplicación.

Por otro lado, en las variables de calidad del fruto se logró reducir significativamente la conductividad eléctrica (CE) con el uso de geles de quitosán-Fe lo que indica un menor contenido de sales (Barbaro *et al.*, n.d.) en comparación con los otros tratamientos y por lo tanto equilibrio en el intercambio de minerales, adecuada presión osmótica (Moya *et al.*, 2017) y menor pérdida de energía en la respiración celular (Banti, 2020). Así mismo, el potencial de óxido reducción (ORP) presento diferencias significativas en las plantas tratadas con quitosán-Fe lo que indica mayor calidad en los frutos (Lu *et al.*, 2022) ya que se incrementó su capacidad antioxidante. Estos datos coinciden con los reportados por (Hernández-Hernández *et al.*, 2018) en frutos de tomate tratados con Cu NPs + quitosano.

Por otra parte, DA y DM de quitosán-Fe empleadas en este experimento, originaron cambios fisiológicos favorables en el cultivo que propiciaron mayor producción de clorofilas a, clorofila b y clorofilas totales asociados al papel que desempeña el Fe en la formación de grupos hemo, fundamentales para la síntesis de clorofilas (Briat *et al.*, 2007) y a que el quitosano promueve la producción de clorofila y fotosíntesis (Iriti *et al.*, 2009). De esta manera se pudo incrementar las cantidades de clorofilas y mejorar el sistema fotosintético a tal grado que se consigue mejorar la calidad de los frutos (Salmerón-Bravo *et al.*, 2020). Estos resultados concuerdan con los reportados por Costales-Menéndez *et al.* (2020)

el cual encontró que el contenido de clorofilas totales incremento entre un 6 y 8.4% en plantas de soya tratadas con concentraciones de 10-500 mg L⁻¹ de quitosán por aspersion foliar.

En cuanto al contenido de ácido ascórbico en hojas disminuyo a causa de que el quitosano actúa como elicitador aumentando la síntesis de enzimas y metabolitos defensivos como soporte para las plantas (Malerba & Cerana, 2016). Por otro lado, como consecuencia del efecto estimulante del quitosán (Reyes, 2020), el ácido ascórbico pudo incrementarse en los frutos.

El quitosán es percibido por las plantas como un elicitador biótico que promueve la generación de metabolitos secundarios que funcionan como mecanismos de defensa para las plantas (Ramírez *et al.*, 2021). Así pues, los compuestos flavonoides tanto en hojas como en frutos aumentaron significativamente con respecto a los controles, hecho que se asemeja al incremento de flavonoides en triticale tratados con diferentes dosis de NPs quitosán (Ramírez *et al.*, 2021).

En cuanto al contenido de fenoles, los datos están de acuerdo con los reportados por Pinedo-Guerrero *et al.* (2017) el cual informo un incremento del 5.9% al aplicar Cu NPs + Chitosán-PVA. En Chile jalapeño.

En cuanto al contenido de antioxidantes, el quitosano resulto ser benéfico para la producción de carotenoides tanto en hojas como en frutos así pues, la DM y DA de quitosán-Fe aumentaron el contenido de β-caroteno en hojas con respecto al control y a Q, igual que en frutos en las tres dosis empleadas, de manera muy similar, las concentraciones de licopeno se incrementaron notoriamente con DA quitosán-Fe principalmente, hallazgos que coincide con López-Vargas *et al.* (2018) quien reportó un incremento del 12% en comparación con el control al aplicar Cu NPs + quitosano en tomate.

El quitosán es un compuesto mucoadhesivo que puede unirse químicamente a otros elementos a través de los grupos aminos que posee (Gritsch *et al.*, 2018). Así mismo, la presencia de Fe favorece la disponibilidad de S para las plantas ya que están ampliamente relacionados (Tran & Camps, 2021). Se conoce que las

deficiencias de Fe limitan el transporte de otros micronutrientes en las plantas por lo que al encontrarse disponible favoreció el contenido de Mn y Zn de acuerdo con Morrissey & Guerinot, (2009), aunque se sabe que algunos minerales son antagónicos del Fe pudieron incrementarse de igual forma debido a las características del quitosán.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran el efecto estimulante y elicitor del quitosán en las plantas, además indican que el complejo de geles de Quitosán-Fe mejora la calidad del fruto en tanto que incrementaron la capacidad antioxidante, conductividad eléctrica y contenido de metabolitos secundarios en hojas y frutos. Así mismo, el uso de este complejo incrementó el contenido de minerales como S, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, B y Mn de la mano con al incremento del Fe en hojas.

La dosis alta de quitosán-Fe resultó ser la dosis óptima para mejorar las características nutraceuticas en este cultivo y el incremento de las concentraciones de macronutrientes y micronutrientes en hojas de plantas de tomate.

REFERENCIAS

- Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. (2021). Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 12). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
- Ahammed, G. J., Wu, M., Wang, Y., Yan, Y., Mao, Q., Ren, J., Ma, R., Liu, A., & Chen, S. (2020). Melatonin alleviates iron stress by improving iron homeostasis, antioxidant defense and secondary metabolism in cucumber. *Scientia Horticulturae*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109205>
- Ali, M. Y., Sina, A. A. I., Khandker, S. S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., Khalil, M. I., & Gan, S. H. (2021). Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: A review. *Foods*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/foods10010045>
- Andresen, E., Peiter, E., & Küpper, H. (2018). Trace metal metabolism in plants. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 69, Issue 5, pp. 909–954). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx465>
- Ashrafi-Dehkordi, E., Alemzadeh, A., Tanaka, N., & Razi, H. (2018). Meta-analysis of transcriptomic responses to biotic and abiotic stress in tomato. *PeerJ*, 2018(7). <https://doi.org/10.7717/peerj.4631>
- Astolfi, S., Pii, Y., Mimmo, T., Lucini, L., Miras-Moreno, M. B., Coppa, E., Violino, S., Celletti, S., & Cesco, S. (2020). Single and combined fe and s deficiency differentially modulate root exudate composition in tomato: A double strategy for fe acquisition? *International Journal of Molecular Sciences*, 21(11), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijms21114038>
- Bakker, M. F., Peeters, P. H. M., Klaasen, V. M., Bueno-De-Mesquita, H. B., Jansen, E. H. J. M., Ros, M. M., Travier, N., Olsen, A., Tjønneland, A., Overvad, K., Rinaldi, S., Romieu, I., Brennan, P., Boutron-Ruault, M. C., Perquier, F., Cadeau, C., Boeing, H., Aleksandrova, K., Kaaks, R., ... Van Gils, C. H. (2016). Plasma carotenoids, Vitamin C, tocopherols, and retinol and the risk of breast cancer in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition cohort. *American Journal of Clinical Nutrition*, 103(2), 454–464. <https://doi.org/10.3945/ajcn.114.101659>
- Banti, M. (2020). Review on Electrical Conductivity in Food, the Case in Fruits and Vegetables. *World Journal of Food Science and Technology*, 4(4), 80. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20200404.11>
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (n.d.). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*.

- Black, H. S., Boehm, F., Edge, R., & Truscott, T. G. (2020). The benefits and risks of certain dietary carotenoids that exhibit both anti-and pro-oxidative mechanisms—A comprehensive review. In *Antioxidants* (Vol. 9, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/antiox9030264>
- Bodale, I., Mihalache, G., Achiței, V., Teliban, G. C., Cazacu, A., & Stoleru, V. (2021). Evaluation of the nutrients uptake by tomato plants in different phenological stages using an electrical conductivity technique. *Agriculture (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/agriculture11040292>
- Boonlertnirun, S., Sarobol, E., & Sooksathan, I. (2006). Effects of Molecular Weight of Chitosan on Yield Potential of Rice Cultivar Suphan Buri 1. In *Nat. Sci.* (Vol. 40).
- Briat, J. F., Curie, C., & Gaymard, F. (2007). Iron utilization and metabolism in plants. In *Current Opinion in Plant Biology* (Vol. 10, Issue 3, pp. 276–282). <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003>
- Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. In *Trends in Plant Science* (Vol. 20, Issue 1, pp. 33–40). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>
- Bula, A. (2020). Importancia de la agricultura en el desarrollo socio-económico. *Puente Académico*.
- Camarena-Gutiérrez, G. (2006). Las especies reactivas de oxígeno en defensa de las plantas contra patógenos.
- Carrasco-Gil, S., Allende-Montalbán, R., Hernández-Apaolaza, L., & Lucena, J. J. (2021). Application of seaweed organic components increases tolerance to Fe deficiency in tomato plants. *Agronomy*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy11030507>
- Carvajal, C. C. (2019). Revista medicina legal de costa rica especies reactivas del oxígeno: formación, función y estrés oxidativo reactive oxygen species: training, function and oxidative stress. 36(1).
- Caseiro, M., Ascenso, A., Costa, A., Creagh-Flynn, J., Johnson, M., & Simões, S. (2020). Lycopene in human health. In *LWT* (Vol. 127). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109323>
- Chen, W. W., Zhu, H. H., Wang, J. Y., Han, G. H., Huang, R. N., Hong, Y. G., & Yang, J. L. (2022). Comparative Physiological and Transcriptomic Analyses Reveal Altered Fe-Deficiency Responses in Tomato Epimutant Colorless Non-ripening. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.796893>

- Cieschi, M. T., Polyakov, A. Y., Lebedev, V. A., Volkov, D. S., Pankratov, D. A., Veligzhanin, A. A., Perminova, I. V., & Lucena, J. J. (2019). Eco-friendly iron-humic nanofertilizers synthesis for the prevention of iron chlorosis in soybean (*Glycine max*) grown in calcareous soil. *Frontiers in Plant Science*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00413>
- Collins, E. J., Bowyer, C., Tsouza, A., & Chopra, M. (2022). Tomatoes: An Extensive Review of the Associated Health Impacts of Tomatoes and Factors That Can Affect Their Cultivation. In *Biology* (Vol. 11, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/biology11020239>
- Connorton, J. M., Balk, J., & Rodríguez-Celma, J. (2017). Iron homeostasis in plants—a brief overview. In *Metallomics* (Vol. 9, Issue 7, pp. 813–823). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c7mt00136c>
- Costales-Menéndez, D., Falcón-Rodríguez, A. B., García-Domínguez, R., & Zenón Capdevila-Valera, J. (2020). Effect of chitosan foliar spray on the vegetative development of inoculated soybean. *Cultivos Tropicales*, *41*(4), 7. <http://ediciones.inca.edu.cu/octubre-diciembre>
- de Bang, T. C., Husted, S., Laursen, K. H., Persson, D. P., & Schjoerring, J. K. (2021). The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. In *New Phytologist* (Vol. 229, Issue 5, pp. 2446–2469). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.17074>
- de Lima Batista, A. C., de Souza Neto, F. E., & de Souza Paiva, W. (2018). Review of fungal chitosan: past, present and perspectives in Brazil. In *Polimeros* (Vol. 28, Issue 3, pp. 275–283). Associacao Brasileira de Polimeros. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.08316>
- De Pascale, S., Rouphael, Y., & Colla, G. (2017). Plant biostimulants: Innovative tool for enhancing plant nutrition in organic farming. In *European Journal of Horticultural Science* (Vol. 82, Issue 6, pp. 277–285). Verlag Eugen Ulmer. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2017/82.6.2>
- Diretto, G., Frusciante, S., Fabbri, C., Schauer, N., Busta, L., Wang, Z., Matas, A. J., Fiore, A., K.C. Rose, J., Fernie, A. R., Jetter, R., Mattei, B., Giovannoni, J., & Giuliano, G. (2020). Manipulation of β -carotene levels in tomato fruits results in increased ABA content and extended shelf life. *Plant Biotechnology Journal*, *18*(5), 1185–1199. <https://doi.org/10.1111/pbi.13283>
- Dumanović, J., Nepovimova, E., Natić, M., Kuča, K., & Jačević, V. (2021). The Significance of Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense System in Plants: A Concise Overview. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 11). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>

- Flemer, B., Gulati, S., Bergna, A., Rändler, M., Cernava, T., Witzel, K., Berg, G., & Grosch, R. (2022). Biotic and Abiotic Stress Factors Induce Microbiome Shifts and Enrichment of Distinct Beneficial Bacteria in Tomato Roots. *Phytobiomes Journal*, 6(4), 276–289. <https://doi.org/10.1094/pbiomes-10-21-0067-r>
- Flores, I. R., Vásquez-Murrieta, M. S., Franco-Hernández, M. O., Márquez-Herrera, C. E., Ponce-Mendoza, A., & del Socorro López-Cortéz, M. (2021). Bioactive compounds in tomato (*Solanum lycopersicum*) variety saladette and their relationship with soil mineral content. *Food Chemistry*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128608>
- Gholivand, M. B., Shamsipur, M., & Ehzari, H. (2019). Cetirizine dihydrochloride sensor based on nano composite chitosan, MWCNTs and ionic liquid. *Microchemical Journal*, 146, 692–700. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.01.068>
- Grioui, I., Ouri, A., Nouri, M., & Hatira, A. (2020). The use of natural iron ore Tamra as ferric treatment to correct iron chlorosis in Tomato grown on calcareous soil. *Journal of Research in Environmental and Earth Sciences*, 257–263. www.knowledgejournals.com
- Gritsch, L., Lovell, C., Goldmann, W. H., & Boccaccini, A. R. (2018). Fabrication and characterization of copper(II)-chitosan complexes as antibiotic-free antibacterial biomaterial. *Carbohydrate Polymers*, 179, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.095>
- Guo, Z., Du, N., Li, Y., Zheng, S., Shen, S., & Piao, F. (2020). Gamma-aminobutyric acid enhances tolerance to iron deficiency by stimulating auxin signaling in cucumber (*Cucumis sativus*L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110285>
- Han, B., Wen, X., Wang, J., & Sun, Y. (2022). A Novel Nanocomposite of Zn(II)-Protoporphyrin-Chitosan-Multi Walled Carbon Nanotubes and the Application to Caffeic Acid Sensing. *Nanomaterials*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/nano12193412>
- Hernández, J. R., José Bonete, M., & Martínez-Espinosa, R. M. (2015). Propuesta de una nueva clasificación de los oligoelementos para su aplicación en nutrición, oligoterapia, y otras estrategias terapéuticas. *Nutricion Hospitalaria*, 31(3), 1020–1033. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.31.3.8325>
- Hernández-Hernández, H., González-Morales, S., Benavides-Mendoza, A., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Effects of chitosan–PVA and Cu nanoparticles on the growth and

- antioxidant capacity of tomato under saline stress. *Molecules*, 23(1).
<https://doi.org/10.3390/molecules23010178>
- Hornbergs, J., Montag, K., Loschwitz, J., Mohr, I., Poschmann, G., Schnake, A., Gratz, R., Brumbarova, T., Eutebach, M., Angrand, K., Fink-Straube, C., Stühler, K., Zeier, J., Hartmann, L., Strodel, B., Ivanov, R., & Bauer, P. (2022). SEC14-GOLD protein PATELLIN2 binds IRON-REGULATED TRANSPORTER1 linking root iron uptake to vitamin E. *Plant Physiology*.
<https://doi.org/10.1093/plphys/kiac563>
- Hung, C. Y., & Yen, G. C. (2002). Antioxidant activity of phenolic compounds isolated from *Mesona procumbens* Hemsl. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 2993–2997. <https://doi.org/10.1021/jf011454y>
- Ilahy, R., Siddiqui, M. W., Tlili, I., Montefusco, A., Piro, G., Hider, C., & Lenucci, M. S. (2018). When Color Really Matters: Horticultural Performance and Functional Quality of High-Lycopene Tomatoes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 37(1), 15–53. <https://doi.org/10.1080/07352689.2018.1465631>
- Iriti, M., Picchi, V., Rossoni, M., Gomarasca, S., Ludwig, N., Gargano, M., & Faoro, F. (2009). Chitosan antitranspirant activity is due to abscisic acid-dependent stomatal closure. *Environmental and Experimental Botany*, 66(3), 493–500. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.01.004>
- Kelebek, H., Selli, S., Kadiroğlu, P., Kola, O., Kesen, S., Uçar, B., & Çetiner, B. (2017). Bioactive compounds and antioxidant potential in tomato pastes as affected by hot and cold break process. *Food Chemistry*, 220, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.190>
- Kobayashi, T., Nozoye, T., & Nishizawa, N. K. (2019). Iron transport and its regulation in plants. In *Free Radical Biology and Medicine* (Vol. 133, pp. 11–20). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.10.439>
- Lesjak, M., & Srai, S. K. S. (2019). Role of dietary flavonoids in iron homeostasis. In *Pharmaceuticals* (Vol. 12, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ph12030119>
- Li, X., Wang, Y., Chen, S., Tian, H., Fu, D., Zhu, B., Luo, Y., & Zhu, H. (2018). Lycopene is enriched in tomato fruit by CRISPR/Cas9-mediated multiplex genome editing. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00559>
- Lima, G. P. P., Gómez, H. A. G., Seabra Junior, S., Maraschin, M., Tecchio, M. A., & Borges, C. V. (2022). Functional and Nutraceutical Compounds of Tomatoes as Affected by Agronomic Practices, Postharvest Management,

- and Processing Methods: A Mini Review. In *Frontiers in Nutrition* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.868492>
- Lin, J., He, F., Owens, G., & Chen, Z. (2021). How do phytogetic iron oxide nanoparticles drive redox reactions to reduce cadmium availability in a flooded paddy soil? *Journal of Hazardous Materials*, 403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123736>
- Lira-Saldivar, R. H., Méndez-Argüello, B., & Vera-Reyes, I. (2016). *Producción de Especies Reactivas de Oxígeno en Plantas Elicitadas con Nanopartículas (1)*.
- López, M., & Ligia, M. (2016). *Innovación para la seguridad alimentaria y nutricional en Centroamérica y Panamá*.
- López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Romenus, K. de A., de la Fuente, M. C., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/app8071020>
- Lu, T., Yu, H., Wang, T., Zhang, T., Shi, C., & Jiang, W. (2022). Influence of the Electrical Conductivity of the Nutrient Solution in Different Phenological Stages on the Growth and Yield of Cherry Tomato. *Horticulturae*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050378>
- Maia, J. T. L. S., Martinez, H. E. P., Clemente, J. M., Ventrella, M. C., & Do Carmo Milagres, C. (2019). Growth, nutrient concentration, nutrient accumulation and visual symptoms of nutrient deficiencies in cherry tomato plants. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(2), 585–598. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p585>
- Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 17, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms17070996>
- Malhotra, H., Pandey, R., Sharma, S., & Bindraban, P. S. (2020). Foliar fertilization: possible routes of iron transport from leaf surface to cell organelles. In *Archives of Agronomy and Soil Science* (Vol. 66, Issue 3, pp. 279–300). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1616288>
- Manjunatha, R., Naik, D., & Usharani, K. (2019). *Nanotechnology application in agriculture: A review*.
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.102>
- Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Mironiuk, M., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2020). Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review. *Science of the Total Environment*, 712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136365>
- Mittler, R. (2017). ROS Are Good. In *Trends in Plant Science* (Vol. 22, Issue 1, pp. 11–19). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Molinari, S., & Leonetti, P. (2023). *Inhibition of ROS-Scavenging Enzyme System Is a Key Event in Tomato Genetic Resistance against Root-Knot Nematodes*. <https://doi.org/10.3390/ijms24087324>
- Moya, C., Oyanedel, E., Verdugo, G., Flores, M. F., Urrestarazu, M., & Álvaro, J. E. (2017). Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato. *HortScience*, 52(6), 868–872. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12026-17>
- Nagamine, A., Takayama, M., & Ezura, H. (2023). Genetic improvement of tomato using gene editing technologies. In *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* (Vol. 98, Issue 1, pp. 1–9). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2091489>
- Nagata, M., & Yamashita, I. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. In *J. Japan. Soc. Food Sci. Technol. (Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi)* (Vol. 39, Issue 10).
- Navarro-González, I., & Periago, M. J. (2016). El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional? *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 20(4). <https://doi.org/10.14306/renhyd.20.4.208>
- Njinga, R. L., Moyo, M. N., & Abdulmaliq, S. Y. (2013). Analysis of Essential Elements for Plants Growth Using Instrumental Neutron Activation Analysis. *International Journal of Agronomy*, 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/156520>
- Njus, D., Kelley, P. M., Tu, Y. J., & Schlegel, H. B. (2020). Ascorbic acid: The chemistry underlying its antioxidant properties. In *Free Radical Biology and Medicine* (Vol. 159, pp. 37–43). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.07.013>

- Nsor-Atindana, J., & Zhong, F. (2012). Quantification of Total Polyphenolic Content and Antimicrobial Activity of Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Bean Shells. *Pakistan Journal of Nutrition*, 672–677.
- Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: An overview. In *Journal of Nutritional Science* (Vol. 5). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/jns.2016.41>
- Pérez-Nájera, V., Lugo-Cervantes, E., Gutierrez-Lomeli, M., & Del Toro-Sanchez, C. (2013). *Extracción de compuestos fenólicos de la cascara de lima (Citrus limetta Risso) y determinación de su actividad antioxidante*. www.biotecnia.uson.mx
- Pinedo-Guerrero, Z. H., Delia Hernández-Fuentes, A., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Cadenas-Pliego, G., & Juárez-Maldonado, A. (2017). Cu nanoparticles in hydrogels of chitosan-PVA affects the characteristics of post-harvest and bioactive compounds of jalapeño pepper. *Molecules*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/molecules22060926>
- Qu, B., & Luo, Y. (2020). Chitosan-based hydrogel beads: Preparations, modifications and applications in food and agriculture sectors – A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 152, pp. 437–448). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.240>
- Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J. P., & Lutts, S. (2019). Tomato Fruit Development and Metabolism. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
- Raklami, A., Bechtaoui, N., Tahiri, A. I., Anli, M., Meddich, A., & Oufdou, K. (2019). Use of rhizobacteria and mycorrhizae consortium in the open field as a strategy for improving crop nutrition, productivity and soil fertility. *Frontiers in Microbiology*, 10(MAY). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01106>
- Ramírez, Silvia. C., Ortega, H., Fortis, M., Santos, Juan. M., Orozco, J. A., & Rangel, P. (2021). *Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale*.
- Reyes, J. J. (2020). *Chitosan application increases the emergence, growth and yield of tomato crop (Solanum lycopersicum L.) under greenhouse conditions*. <http://biotecnia.unison.mx>
- Reyes-Pérez, J., Alexander Enríquez-Acosta, E., Ángel Ramírez-Arrebató, M., Zúñiga Valenzuela, E., Lara-Capistrán, L., & Guillermo Hernández-Montiel,

- L. (2020). *Efecto del quitosano sobre variables del crecimiento, rendimiento y contenido nutricional del tomate*.
- Rodríguez, Aida. T., Reyes, Juan. J., & Méndez, Y. (2019). Efecto del Quitomax® en el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa*, L.) var. J-104. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. , 36, 98–110.
- Rodríguez-Celma, J., Connorton, J. M., Kruse, I., Green, R. T., Franceschetti, M., Chen, Y. T., Cui, Y., Ling, H. Q., Yeh, K. C., & Balk, J. (2019). Arabidopsis BRUTUS-LIKE E3 ligases negatively regulate iron uptake by targeting transcription factor FIT for recycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(35), 17584–17591. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907971116>
- Rodríguez-Ortega, W. M., Martínez, V., Nieves, M., Simón, I., Lidón, V., Fernandez-Zapata, J. C., Martínez-Nicolas, J. J., Cámara-Zapata, J. M., & García-Sánchez, F. (2019). Agricultural and Physiological Responses of Tomato Plants Grown in Different Soilless Culture Systems with Saline Water under Greenhouse Conditions. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42805-7>
- Salmerón-Bravo, S. A., Zermeño-González, A., Méndez-González, J., Ramírez-Rodríguez, H., & Cadena-Zapata, M. (2020). FOLIAR BIOFERTILIZATION WITH SEA WEEDS (Algae (L.)) ON A VINEYARD IN RELATION TO IRON CONTENT, PHOTOSYNTHESIS AND YIELD. *Agrociencia*, 54(7), 967–976. <https://doi.org/10.47163/AGROCIENCIA.V54I7.2246>
- Schmidt, W., Thomine, S., & Buckhout, T. J. (2020). Editorial: Iron Nutrition and Interactions in Plants. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01670>
- Sepulvéda-Jiménez, G., Trejo-Tapia, G., & Trejo-Espino, J. L. (2005). *La producción de las especies reactivas de oxígeno en las interacciones de las plantas con patógenos*. 23.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. *Journal of Botany*, 2012, 1–26. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>
- Steiner, A. A. (n.d.). *A UNIVERSAL METHOD FOR PREPARING NUTRIENT SOLUTIONS OF A CERTAIN DESIRED COMPOSITION*.
- Supraja, K. B., Behera, B., & Balasubramanian, P. (2020). Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato

- cultivation. *Industrial Crops and Products*, 151.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453>
- Szabo, K., Vasile Dulf, F., Oke Teleky, B.-E. ", Eleni, P., Boukouvalas, C., Krokida, M., Kapsalis, N., Rusu, A. V., Socol, C. T., & Cristian Vodnar, D. (2021). *Evaluation of the Bioactive Compounds Found in Tomato Seed Oil and Tomato Peels Influenced by Industrial Heat Treatments*.
<https://doi.org/10.3390/foods1001>
- Terry, E., Falcón, A., & Ruiz, J. (2017). Agronomic tomato crop response to bioproduct QuitoMax®. *Cultivos Tropicales*, 38, 147–154.
- Tran, D., & Camps, C. (2021a). Early Diagnosis of Iron Deficiency in Commercial Tomato Crop Using Electrical Signals. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.631529>
- Tran, D., & Camps, C. (2021b). Early Diagnosis of Iron Deficiency in Commercial Tomato Crop Using Electrical Signals. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.631529>
- Tran, T. T., Choi, J. W., Le, T. T. H., & Kim, J. W. (2019). A comparative study of deep CNN in forecasting and classifying the macronutrient deficiencies on development of tomato plant. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(8).
<https://doi.org/10.3390/app9081601>
- Tripathi, D. K., Singh, S., Gaur, S., Singh, S., Yadav, V., Liu, S., Singh, V. P., Sharma, S., Srivastava, P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., Chauhan, D. K., & Sahi, S. (2018). Acquisition and homeostasis of Iron in higher plants and their probable role in abiotic stress tolerance. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 5, Issue FEB). Frontiers Media S.A.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00086>
- Turan, M., & Mammadov, R. (2018). Antioxidant, Antimicrobial, Cytotoxic, Larvicidal and Anthelmintic Activities and Phenolic Contents of <i>Cyclamen alpinum</i>. *Pharmacology & Pharmacy*, 09(04), 100–116. <https://doi.org/10.4236/pp.2018.94008>
- USDA. (2017). *Index of official visual aids*.
http://www.ascr.usda.gov/complaint_filing_cust.html
- van Gorkom, G. N. Y., Lookermans, E. L., Van Elssen, C. H. M. J., & Bos, G. M. J. (2019). The effect of vitamin C (Ascorbic acid) in the treatment of patients with cancer: A systematic review. In *Nutrients* (Vol. 11, Issue 5). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/nu11050977>
- Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Rhizospheric bacteria with

potential benefits in agriculture. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 343–355.
<https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>

Wang, Y., Chen, Y. F., & Wu, W. H. (2021). Potassium and phosphorus transport and signaling in plants. In *Journal of Integrative Plant Biology* (Vol. 63, Issue 1, pp. 34–52). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/jipb.13053>

Wu, M., Xu, X., Hu, X., Liu, Y., Cao, H., Chan, H., Gong, Z., Yuan, Y., Luo, Y., Feng, B., Li, Z., & Deng, W. (2020). SIMYB72 regulates the metabolism of chlorophylls, carotenoids, and flavonoids in tomato fruit. *Plant Physiology*, 183(3), 854–868. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00156>

XU, C. C., WANG, B., PU, Y. Q., TAO, J. S., & ZHANG, T. (2017). Advances in extraction and analysis of phenolic compounds from plant materials. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 15(10), 721–731.
[https://doi.org/10.1016/S1875-5364\(17\)30103-6](https://doi.org/10.1016/S1875-5364(17)30103-6)

Zhang, R., Zhang, W., Kang, Y., Shi, M., Yang, X., Li, H., Yu, H., Wang, Y., & Qin, S. (2022). Application of different foliar iron fertilizers for improving the photosynthesis and tuber quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) and enhancing iron biofortification. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00346-8>