

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Influencia de la Radiación UV-A en el Desarrollo de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y el Contenido de Compuestos Bioactivos en los Frutos

Por:

JORDAN RAMOS HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Influencia de la Radiación UV-A en el Desarrollo de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y el Contenido de Compuestos Bioactivos en los Frutos

Por:

JORDAN RAMOS HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal



M.C. Diego Iván Escobar Hernández
Asesor Principal Externo



Dr. Fabián Pérez Labrada
Coasesor



Dra. Michelle Ivonne Ramos Robles
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Saltillo, Coahuila, enero de 2023

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor Principal



Jordan Ramos Hernández

Firma y Nombre

Asesor Principal



Antonio Juárez Maldonado

Firma y Nombre

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por la educación y todos los recursos que me proporcionó para asegurar mis estudios y adquirir una profesionalidad muy digna.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y parte de su proyecto, por la confianza y el conocimiento adquirido, así como los recursos que me facilitó para poder realizar el presente trabajo de investigación. Agradezco también el compromiso y la vocación como docente y como persona, lo cual me ayudó a tomar una direccionalidad y tener una visión diferente con respecto a mi carrera profesional y vida personal.

A la Dra. Yolanda González García, por el tiempo compartido, los conocimientos, y la comprensión para la realización de este trabajo. También agradezco la confianza, los consejos y momentos compartidos que hicieron muy cómoda mi estadía en la realización del proyecto y formando parte de su equipo de trabajo.

Al M.C. Diego Iván Hernández Escobar, por el tiempo, el esfuerzo y todo el conocimiento proporcionado para la realización de esta investigación. Por todos los consejos en el ámbito laboral, personal y profesional que contribuyeron a mi formación educativa y forma de ver y comprender diversos aspectos de la vida.

A la empresa ISB SOLA BASIC, dedicada al desarrollo de equipos de iluminación y energías eléctricas, por su apoyo con los recursos y el equipamiento de luminaria tipo LED y sus complementos, los cuales fueron herramientas fundamentales para la realización de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

A mi familia, a mis padres Elizabeth Hernández Yescas, Tomas Ramos Manzano a mis queridos hermanos Alan, Estrella e Iván que los son todo para mí y que fueron mi inspiración para lograr una meta más y sobrevivir a todas las adversidades y superar todos los obstáculos que me impuso la vida.

A los profesores del BIC 44 que me ayudaron y me motivaron a seguir con mis estudios y buscar nuevas oportunidades, conocer “que más hay afuera” y creer que tenía potencial para seguir adelante.

A mis mejores amigos y familia Alexis Alberto Pérez Vázquez y Adolfo Morales Navarro, que compartimos un sin fin de historia juntos, todos los momentos felices y todas las adversidades que tuvimos que enfrentar para llegar juntos a la meta final. Las lecciones de vida que adquirimos juntos y que adquirí de ellos y que siempre formarán parte de mí y de mis recuerdos.

A todos mis compañeros de generación y personas que fueron parte del proceso, con todos aquellos que compartí algún momento y que me dieron algún consejo, una lección o aprendizaje y que contribuyeron a mi formación como profesionista y como persona.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN	X
I INTRODUCCIÓN	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.2.3 Hipótesis	4
II REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.2 Cultivo de tomate.....	5
2.2.1 Descripción e importancia económica del tomate	5
2.3 Morfología y fisiología de la maduración de frutos de tomate.....	6
2.4 Composición bioquímica de frutos de tomate	7
2.4.1 Antioxidantes en tomate y su impacto en la salud humana.....	8
2.4.2 Licopeno y otros carotenoides presentes en tomate.....	9
2.4.3 Compuestos fenólicos	11
2.4.4 Vitaminas	11
2.5 Factores que influyen en la composición bioquímica de los frutos de tomate.....	12

2.6	Radiación ultravioleta (UV)	12
2.6.1	Percepción de las plantas a la radiación ultravioleta: mecanismo de los fotorreceptores.....	13
2.6.2	Radiación UV-A: impacto y uso en la agricultura	15
III	MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.2	Establecimiento del experimento	17
3.3	Material vegetal	17
3.4	Características de las lámparas.....	17
3.5	Desarrollo de cultivo	17
3.6	Tratamientos.....	18
3.7	Variables agronómicas.....	18
3.8	Variables bioquímicas	19
3.8.1	Carotenoides.....	19
3.8.2	Vitamina C.....	19
3.8.3	Fenoles	20
3.8.4	Flavonoides.....	20
3.8.5	Capacidad antioxidante (DPPH)	21
3.9	Calidad de fruto	21
3.10	Análisis estadístico	22
IV	RESULTADOS.....	23
V	DISCUSIÓN	33
VI	CONCLUSIÓN	39
VII	LITERATURA CITADA	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impacto de la radiación UV-A en (A) Rendimiento por planta (B) Número de frutos por planta.	23
Figura 2. Impacto de la radiación UV-A en (A) Altura de planta (B) Diámetro de tallo, (C) Número hojas, (D) Número de racimos	24
Figura 3. Impacto de la radiación UV-A en (A) Biomasa fresca, (B) Biomasa seca, (C) Longitud de raíz (D) Biomasa seca de raíz.	25
Figura 4. Impacto de la radiación UV-A en (A) pH, (B) Conductividad Eléctrica...	26
Figura 5. Impacto de la radiación UV-A en (A) Firmeza, (B) Sólidos Solubles Totales (C) Potencial de Óxido Reducción	27
Figura 6. Impacto de la radiación UV-A en (A) Fenoles, (B) Vitamina C Totales (C) Flavonoides.....	28
Figura 8. Impacto de la radiación UV-A en con contenido de clorofila A, clorofila B y clorofilas totales en frutos de tomate.....	30
Figura 9. Impacto de la radiación UV-A en la capacidad antioxidante Hidrofílica, Lipofílica y total en frutos de tomate.....	31

RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es considerado uno de los alimentos más importantes a nivel mundial. Además, sus cualidades de aroma y sabor, su contenido nutricional de compuestos bioactivos como los antioxidantes, lo posicionan como un recurso muy valioso para la salud humana debido a sus beneficios en la prevención de enfermedades crónicas, trastornos cardiovasculares y padecimientos ligados al daño por radicales libres de oxígenos y la oxidación celular. Por ende, múltiples trabajos y herramientas se han integrado al sistema de producción para mantener y aumentar los diversos compuestos bioactivos presentes, con el objetivo de obtener un producto de buena calidad y con óptimo contenido nutricional. La luz ultravioleta (UV) ha demostrado ser un recurso complementario eficaz en la mejora de propiedades nutraceuticas, el aumento en la síntesis de metabolitos secundarios, la capacidad antioxidante y beneficios en el tratamiento postcosecha de frutos debido a su efecto estimulante en diversas especies vegetales. Así mismo, es un recurso potencial para la inhibición y control de agentes patógenos. Se estableció un cultivo de tomate para determinar la influencia de la radiación UV-A en la producción de compuestos bioactivos en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Se utilizaron lámparas con radiación UV-A (385 nm) con una capacidad de irradiación de 50 W m^{-2} . Cada planta recibió una dosis de 16.7 W durante 30 minutos al día, a lo largo de un periodo de 66 días. Los resultados mostraron cambios en el contenido de fenoles en los frutos de tomate favorecido por el tratamiento UV con una diferencia 18.54% mayor con respecto a T0, la capacidad antioxidante también refleja un alza con relación al tratamiento UV2 presentando un 7.5% mayor respecto a T0, la tendencia del resultado se reflejó tanto en la capacidad de antioxidantes hidrofílicos como lipofílicos. En relación a parámetros de calidad de fruto, el tratamiento UV reflejó valores mayores entorno al pH, que se modificó con un valor 21.5% mayor que T0. El Potencial de Óxido-Reducción (ORP) se modificó con un valor estadísticamente superior de 18.54%

con respecto al testigo. La altura de la planta se vio modificada con los tratamientos UV y UV2, ambos con una diferencia de +4.2% con respecto a T0. La biomasa seca de la planta y raíz se modificaron con la aplicación de UV-A, indicando efectos en los cambios morfológicos como mecanismo de adaptación al estrés ocasionado por la radiación ultravioleta. Los resultados en esta investigación sugieren que la aplicación de UV-A induce cambios en el metabolismo, fisiología y morfología de las plantas de tomate generados por el mecanismo de tolerancia al estrés inducido por la radiación ultravioleta; la inducción de compuestos antioxidantes y cambios en la calidad de los frutos de tomate.

Palabras clave: Antioxidantes, Estrés, Fisiología, Radiación ultravioleta.

I INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, su relevancia radica tanto en su alto valor económico de producción, como en la aceptación por parte de los consumidores debido a sus múltiples usos gastronómicos y características organolépticas como el sabor, color, y su alto valor nutricional (Mariz *et al.*, 2019). El cultivo de tomate en México es significativo, con un consumo per cápita de 12.4 kg y representando el 20.8% de la producción nacional de hortalizas. En 2022, de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAOSTAT) México fue el 9° productor mundial, con 3.4 millones de toneladas, de las cuales 1.7 millones se exportaron principalmente a Estados Unidos (FAOSTAT, 2023). Las principales regiones productoras son Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco, Baja California Sur, Morelos y Zacatecas (SIAP, 2022).

La tendencia en las investigaciones asociados al tomate demuestra una variedad de beneficios asociados a la salud humana, como la reducción y prevención de enfermedades cardiovasculares, neurológicas, hormonales asociados a la influencia de radicales libres y la consecuente oxidación celular (Dyshlyuk *et al.*, 2020). La actividad antioxidante presente en frutos y derivados de tomate, ejerce funciones biológicas como anticancerígenas, antimutagénicas, antienvjecimiento y antiinflamatorias. Estos beneficios se atribuyen a la presencia de compuestos lipofílicos (ácidos grasos, tocoferoles, carotenoides) e hidrófilos (azúcares, ácido ascórbico, fenoles, folatos), oligoelementos como Zn, Mn y Cu, cofactores de enzimas antioxidantes que brindan protección contra células dañinas y las interacciones que ocurren entre ellas en las distintas etapas de desarrollo (Esua *et al.*, 2019).

Dada su influencia en la alimentación diaria y los múltiples beneficios asociados a su contenido de compuestos bioactivos, así como la importancia económica que posee, es objeto de constantes investigaciones destinadas a mejorar su producción y calidad. La pérdida de nutrientes y calidad en frutos de tomate asociada con el procesamiento convencional, malas prácticas agrícolas, ha llevado al desarrollo de tecnologías más amigables y eficaces (Esua et al., 2019). Entre estos tratamientos la irradiación ultravioleta (UV) tipo A (UV-A) se considera prometedora para mejorar el contenido nutricional y el manejo postcosecha de frutas, así como el desarrollo de hortalizas (Rivera et al., 2007).

La radiación ultravioleta tipo UV-A es un componente de la radiación solar que ejerce una amplia gama de respuestas fisiológicas en las plantas. Los beneficios como herramienta complementaria han sido demostrado en diversas investigaciones. Kang *et al.*, (2018) afirman que la radiación UV-A mejora la expansión foliar de las plántulas de tomate, resultando en una mejor captura de luz y a su vez en un aumento en la biomasa. El tratamiento postcosecha con UV-A (365nm) también ha mostrado efectos significativos el contenido de compuestos biológicamente activos (licopeno y compuestos fenólicos comunes) y la actividad antioxidante de los componentes de las muestras de tomate tojo maduro (Dyshlyuk *et al.*, 2020). Además, existe un potencial uso de la radiación UV (UV-A, UV-C) como recurso preventivo e inhibidor de agentes patógenos, tanto en cultivos como en la conservación de alimentos.

Por lo tanto, el uso de la radiación UV-A es considerado un recurso potencial en sistemas de producción por sus efectos benéficos incluyendo la potenciación de la fotosíntesis, regulación del crecimiento y la activación de respuestas fotoprotectoras, incluidos pigmentos que absorben los rayos UV-A (Bernal *et al.*, 2015). Tales efectos son resultado de vías de señalización hormonales activadas por mecanismos de recepción específicos conocidos como fotorreceptores (Demkura y Ballaré, 2012).

De acuerdo a diversos autores los fotorreceptores específicos para UV-A son los criptocromos (CRY 1 y CRY 2), UVR8, fitocromos y fototropinas, son los

responsables de la modulación celular de vías metabólicas específicas (Rai et al., 2021; Jenkins, 2017; Carrasco, 2009). En respuesta a la radiación UV y la producción de especies reactivas de oxígeno y al estrés oxidativo, estos fotorreceptores inician cascadas protectoras que incluyen el aumento de compuestos fenólicos y antioxidantes enzimáticos, específicamente compuestos fenólicos (Mariz *et al.*, 2019). Este tipo de mecanismos de respuesta ante la radiación UV puede desencadenar la síntesis de compuestos como la fenilalanina amonialasa (PAL) o flavonol sintasa (FLS), aumentando los niveles de polifenoles en el fruto y/o cultivo. Así mismo, la síntesis de flavonoides y carotenoides inciden en el aumento en el contenido de antioxidantes lo cual, aumenta los beneficios nutricionales para la salud del consumidor (Mariz *et al.*, 2019).

Esta riqueza en fitocompuestos estimulada por la radiación UV, se verá reflejada en productos de mayor calidad y con mayor capacidad nutraceútica. En el caso de los frutos de tomate, esto fortalece los beneficios relacionados a la prevención de enfermedades crónicas, trastornos cardiovasculares, tumores del tracto digestivo y enfermedades del sistema nervioso causado por la oxidación celular (Panjai *et al.*, 2017).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar la Influencia de la radiación UV-A en el desarrollo de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y el contenido de compuestos bioactivos en los frutos.

1.2.2 Objetivos específicos

Evaluar el efecto de la radiación ultravioleta UV-A (385 nm) en el crecimiento de plantas de tomate.

Evaluar el efecto de la radiación ultravioleta UV-A (385 nm) en la calidad de frutos de tomate.

Determinar la influencia de la radiación ultravioleta UV-A (385 nm) en la acumulación de compuestos bioactivos en frutos de tomate.

1.2.3 Hipótesis

La radiación ultravioleta UV-A ejerce una influencia significativa en las plantas de tomate, desencadenando respuestas bioquímicas que modifican su desarrollo y promueven la acumulación de compuesto bioactivos en frutos.

II REVISIÓN DE LITERATURA

2.2 Cultivo de tomate

2.2.1 Descripción e importancia económica del tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta herbácea anual o perenne, perteneciente a la familia Solanaceae. Posee un tallo grueso pubescente y largo de color verde en el cual se forman tallos secundarios compuestos por epidermis con pelos glandulares (SIAP, 2022). Las hojas son pinnadas y compuestas, las flores son perfectas y regulares que constan de cinco pétalos de color amarillo, que se encuentran dispuestos de forma helicoidal. Estas se agrupan en inflorescencias de tipo racimo; las raíces tienen un sistema radicular pivotante, profundo y poco ramificada; el fruto es una baya bilocular subesférica globosa (SIAP, 2022).

Esta hortaliza forma parte de los principales cultivos a nivel mundial, debido a su elevado potencial alimenticio, así como su volumen de producción, que oscilan los 5 millones de hectáreas de superficie cultivada y más de 182 millones de toneladas producidas en todo el mundo (FAOSTAT, 2023).

La influencia de este cultivo en México es muy relevante, el consumo anual per cápita es de 12.4 kg, y tiene una participación del 20.8 por ciento en la producción nacional de hortalizas, siendo Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco, Baja California Sur, Morelos y Zacatecas, las principales entidades federativas productoras (SIAP, 2022).

México ocupa el 9° lugar como productor mundial de tomate, en 2022 la producción nacional fue de 3.4 millones de toneladas abarcando una superficie total de 25 mil

hectáreas, y de los cuales, 1.7 millones de ton. se destinaron para exportación a Estados Unidos, seguido de Canadá, Japón, Cuba y Argentina, generando así, un valor que asciende a los 1.7 millones de dólares (SIAP, 2022).

2.3 Morfología y fisiología de la maduración de frutos de tomate

El fruto de tomate es una baya bilocular, subesférica globosa que se compone de pericarpio y semillas (Rančić *et al.*, 2010). El pericarpio del fruto consta de tres partes distintas: el exocarpio, compuesto por una capa de cutícula, tres o cuatro capas de tejido colenquimatoso, donde se acumula almidón y plástidos: luego está el mesocarpio, formado por tejido parenquimatoso con células grandes que contienen cloroplastos. Esta última puede formar hasta el 20% de fotosintatos del fruto, el resto se produce en las hojas (Rančić *et al.*, 2010). Finalmente está el endocarpio, la estructura más interna el cual consta de una capa celular adyacente a la región celular (Pesaresi *et al.*, 2014).

Los tabiques de los carpelos dividen el ovario y el fruto en dos o más lóculos (Pesaresi *et al.*, 2014). Las semillas se desarrollan adheridas a la placenta, un tejido parenquimatoso, que se vuelve gelatinoso y llena las cavidades locales durante el desarrollo y maduración del fruto (Pesaresi *et al.*, 2014).

El proceso de maduración de conlleva diversos procesos, de acuerdo con son tres fases que atraviesa el fruto para llegar a su estado de maduración (Gillaspy *et al.*, 1993). La primera fase es la fertilización del ovario, la segunda fase comienza con la división celular, la diferenciación de tejidos y el desarrollo de las semillas y el embrión, se presenta un aumento del volumen hasta alcanzar el tamaño final. La última fase comienza cuando se detiene la entrada de carbohidratos en los frutos, y ocurre el cambio de color de verde a naranja como consecuencia de la transformación de cloroplastos en cromoplastos y disminución de clorofila, seguida de un aumento de la concentración de β -caroteno que da como resultado la fruta color naranja (Carrari y Fernie, 2005; Rančić *et al.*, 2010).

El color rojo final se debe a la alta concentración de licopeno, los bioquímicos en esta etapa son: aumento en la síntesis de etileno, aumento en la respiración, la acidez, de la fruta aumenta rápidamente y disminuye después de que, el contenido de almidón disminuye y aumenta el contenido de azúcar (Rančić *et al.*, 2010).

2.4 Composición bioquímica de frutos de tomate

Los tomates son frutos climatéricos debido a la producción de etileno, lo que les permite continuar su proceso de maduración tras la cosecha (Perea *et al.*, 2018). El componente predominante en su composición es el agua, que constituye el 94% del total. Las proteínas representan el 1.16%, los lípidos totales el 0.97% y los carbohidratos el resto (Salehi *et al.*, 2019)

La fibra con mayor influencia es la dietética, el cual es un grupo vástago de polisacáridos presentes en las partes comestibles de las plantas que son resistentes a la hidrólisis por las enzimas digestivas humanas, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso, que promueve diversos efectos fisiológicos beneficiosos, este incluye mezcla de polisacáridos, pectinas y almidones resistentes (Navarro y Periago, 2016).

Algo característico en esta especie es la presencia de tomatina, un glicoalcaloide o glicoespirolano levemente tóxico, que se encuentra en el tallo, hojas y frutos verdes, y ligeramente en frutos rojos maduros, es el responsable del olor característico a la planta junto con el ácido cítrico (Salehi *et al.*, 2019).

En relación al contenido de minerales, están presentes elementos mayoritarios como el calcio, potasio, sodio, fósforo; oligoelementos como el hierro, yodo, zinc, flúor, cobre, entre otros (Ali *et al.*, 2021). También posee un importante contenido de ácidos grasos como el linoleico y poliinsaturados, vitaminas (vitamina C, complejo B, A, E), siendo la vitamina C la que mayor presencia tiene (Ali *et al.*, 2021).

Los aminoácidos con mayor concentración en los frutos de tomate es la leucina, por parte de los aminoácidos esenciales, y el ácido glutámico el más común entre los

no esenciales, así mismo, están presentes la lisina, alalina, glicina, isoleucina entre otros (Ali *et al.*, 2021).

La versatilidad en la composición bioquímica en los frutos de tomate lo ha consolidado como un alimento integral que va más allá del simple sabor, aportando múltiples beneficios nutricionales y nutracéuticos especialmente vinculados a la prevención y tratamiento de algunas enfermedades (Del Giudice *et al.*, 2015). Nagappan *et al.*, (2012), menciona que la vitamina C y B presentes en los frutos, influyen en numerosas funciones corporales como la regulación del crecimiento y el funcionamiento de las células, efecto positivo sobre el sistema nervioso y el cerebro, así como el retraso en la patogénesis de enfermedades derivadas del estrés oxidativo.

Por otro lado, el contenido de minerales influye en la regulación de rutas metabólicas, el mantenimiento de funciones biológicas del cuerpo, la transmisión nerviosa, y producción de energía. Además, el contenido de ácidos grasos y los aminoácidos son muy importantes en el mantenimiento de la estructuración y crecimiento celular, así como la prevención de algunas enfermedades (Ali *et al.*, 2021).

Así mismo, los frutos de tomate son contenedores de metabolitos secundarios, compuestos bioactivos con acción antioxidante, cuyas concentraciones se correlacionan con la prevención de enfermedades crónicas degenerativas humanas como ECV, el cáncer y enfermedades neurodegenerativas (Cheng *et al.*, 2019). Los carotenoides (β -caroteno y licopeno), la vitamina C y los compuestos fenólicos (quercetina, luteína, ácido cafeico y ferúlico), son algunos de los elementos que pueden prevenir o reducir estas enfermedades al neutralizar las especies reactivas de oxígeno (ROS) y disminuir el daño celular (Ali *et al.*, 2021).

2.4.1 Antioxidantes en tomate y su impacto en la salud humana

Los antioxidantes son compuestos con la capacidad de retrasar significativamente o inhibir la oxidación de otras moléculas cuando están presentes en

concentraciones bajas en comparación con el sustrato oxidable (Pisoschi y Pop, 2015). Para la salud humana, los ROS son elementos oxidables subproductos normales del metabolismo celular y/o también generados por factores externos (contaminación, ambiental, químicos, etc.), que tienen la capacidad de afectar diversas biomoléculas importantes como lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, ocasionando afectaciones como cambios en la activación de vías de señalización específicas, daño estructural de moléculas del ácido desoxirribonucleico (ADN), dando como resultado la generación de enfermedades degenerativas, nerviosas, y otros padecimientos mortales (Gebicki, 2016). Por lo anterior, la presencia de moléculas antioxidantes que permitan inhibir y mantener moléculas oxidativas, representa un aspecto muy importante para el mantenimiento de la homeostasis celular y con ello la prevención de enfermedades (Perea *et al.*, 2018).

Diversas investigaciones han informado el potencial antioxidante en los frutos de tomate, principalmente agentes no enzimáticos como: vitaminas (C, A y E), compuestos fenólicos (ácidos fenólicos y flavonoides), carotenoides (licopeno, α -, β -caroteno), así como isoprenoides; β -caroteno, γ -caroteno, ζ -caroteno, fitoeno, fitoflueno; luteína violaxantina, neoxantina, α -criptosantina, zeaxantina, β -criptoxantina, ciclocopeno, neurosporeno, β -caroteno-5 y 6-epóxido (Guil y Reboloso, 2009; Salehi *et al.*, 2019).

Particularmente, el licopeno y el β -caroteno junto con la clorofila, son compuestos mayormente presentes debido a su influencia en la coloración del tomate durante los diferentes estadios de madurez (Luna y Delgado, 2014).

2.4.2 Licopeno y otros carotenoides presentes en tomate

El licopeno es un pigmento muy importante presente en plantas, bacterias fotosintéticas, hongos y algas. Son responsables de los colores brillantes de las frutas y de la protección de los organismos fotosintéticos del daño ante los procesos foto-oxidativos (Perveen *et al.*, 2015). Representa el 80-90% del total de

carotenoides y es clave en la biosíntesis de muchos carotenoides como β -caroteno y/o las xantofilas (Nour *et al.*, 2018).

El licopeno forma parte de la síntesis de isoprenoides, en donde la ciclización y desaturación del fitoeno (responsable del color amarillo en tomate) da lugar al licopeno, acumulándose en los cromoplastos de las células vegetales y que, a su vez, por medio de otros procesos, da origen a moléculas como el β -caroteno, xantofilas y provitamina A (Salehi *et al.*, 2019).

Este fitoquímico tiene la propiedad de eliminar radicales como el oxígeno singlete (O_2) y ha demostrado reducir los niveles de colesterol LDL (lipoproteínas de baja densidad) oxidado, comúnmente conocidos como “colesterol malo”, que está relacionado a procesos inflamatorios y aterosclerosis por la acumulación de placas en las arterias (Abete *et al.*, 2013). Así mismo, la ingesta de este compuesto en conjunto con la luteína puede prevenir o retrasar la aparición de esclerosis amiotrófica (Fitzgerald *et al.*, 2013).

En el tomate, además del licopeno y el β -caroteno, también se encuentran otros carotenoides importantes como el fitoeno, el fitoflueno y la luteína. Sin embargo, la concentración de fitoeno y fitoflueno, que son precursores del licopeno, es menor en comparación con la del licopeno y el β -caroteno (Navarro y Periago, 2016). Aunque estos compuestos se encuentran en cantidades pequeñas en el tomate fresco, se les atribuyen propiedades beneficiosas para la salud humana (Perveen *et al.*, 2015)."

La luteína es también importante en el tomate y goza de una importante actividad antioxidante, su concentración es muy pequeña (aproximadamente 1mg kg^{-1}) o inexistente en algunos casos (Navarro y Periago, 2016). Su efecto beneficioso se relaciona a la salud ocular, tales como la degeneración relacionada con la edad macular (AMD) (Murthy *et al.*, 2014).

Dado que el cuerpo humano no puede sintetizar carotenoides de forma endógena, el cuerpo depende totalmente de los carotenoides de origen dietético, la evidencia

sugiere que el 85% del licopeno de la dieta humana proviene del fruto y derivados del tomate (Perveen *et al.*, 2015).

2.4.3 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios con un grupo ácido y un grupo fenol en su estructura química. Esta composición permite una acción antioxidante al ceder átomos de hidrógeno a los radicales libres reactivos (Perea *et al.*, 2018). El tomate alberga una variada gama de compuestos fenólicos, principalmente flavonoides y compuestos fenólicos simples. De acuerdo con Elbadrawy y Sello (2016) los principales ácidos fenólicos sobre todo en cáscara de tomate, son el cafeico, procatecuico, vainílico, catequínico y ácido gálico. El contenido de estos compuestos es más abundante en la etapa de maduración verde e intermedia, disminuyendo a medida que el tomate adquiere una coloración rojiza (Del Giudice *et al.*, 2015).

Además, Navarro *et al.* (2011) argumentan que el tomate contiene flavonoides como la rutina, la naringerina y quercetina, los cuales se relacionan con efectos beneficiosos en la salud tales como niveles reducidos de triglicéridos hepáticos y cardiacos.

2.4.4 Vitaminas

En el tomate destacan las vitaminas A, B K, C y E, siendo las vitaminas C y E las más representativas por su función antioxidante (Navarro y Periago, 2016). A diferencia de otros cultivos donde el contenido de vitamina C es dependiente de variables como cambios estacionales y calidad de luz, los tomates pueden almacenarla por más tiempo debido a su alto contenido (Dorais *et al.*, 2008; Navarro y Periago, 2016).

El ácido ascórbico (vitamina C) posee importantes funciones biológicas de acuerdo con Nagappan *et al.* (2012) es clave en el retraso de la patogénesis de una gran

variedad de enfermedades degenerativas, tales como enfermedades cardiovasculares, ciertos tipos de cáncer, cataratas, enfermedades neurodegenerativas, asma, mejora la función inmune y también evitar la mutación del ADN inducida por el estrés oxidativo. También se ha reportado que el efecto de la vitamina C y E parece ser complementario a la acción antiinflamatoria de licopeno (Hazewindus *et al.*, 2012).

2.5 Factores que influyen en la composición bioquímica de los frutos de tomate

En la producción de tomate, varios factores pueden afectar negativamente el desarrollo de los frutos, alterando la naturaleza y concentración de sus compuestos. Entre estos factores se incluyen las malas prácticas agrícolas, las condiciones ambientales desfavorables y los problemas durante la maduración (Navarro *et al.*, 2011). Factores específicos como intensidad lumínica, variación en el pH del suelo, la frecuencia de riego y nutrición (mal manejo) pueden incidir negativamente en el contenido antioxidante en tomate (Luna y Delgado, 2014). Se han observado diferencias consistentes en las concentraciones de licopeno entre diversas variedades de tomates, las cuales pueden ser afectadas por cambios en la temperatura e intensidad de luz. Específicamente los precursores de licopeno se inhiben por debajo de los 12°C y por encima de 32°C; el intervalo más favorable para la producción de licopeno se encuentra entre 22 y 25°C (Luna y Delgado, 2014).

2.6 Radiación ultravioleta (UV)

La radiación ultravioleta (UV) es una forma de energía electromagnética proveniente de la radiación solar, caracterizada por longitudes de onda más cortas que la luz visible (Díaz *et al.*, 2017). Se divide en tres bandas de onda arbitrarias: UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm) y UV-C (100-280 nm). Aunque la atmósfera terrestre actúa como un filtro para la mayor parte de la radiación UV-C, tanto la radiación UV-

A como UV-B alcanzan la superficie terrestre, ocasionando una serie de efectos biológicos significativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas superiores (Díaz *et al.*, 2017).

La exposición a la radiación ultravioleta suele estar vinculado a un estrés abiótico para los organismos vivos, ya que puede desencadenar la formación de radicales libres capaces de alterar la estructura del ADN. No obstante, resulta un recurso eficaz para estimular el desarrollo vegetativo, debido a su capacidad de redirigir el flujo de carbono, ocasionando cambios en varias clases de metabolitos primarios y secundarios, como los carotenoides, los fenólicos, glucosinolatos e incluso clorofilas, asociados con cambios hormonales y diversas vías de señalización que finalmente pueden incidir positivamente en los mecanismos de los defensa, el crecimiento vegetal así como la calidad y resistencia de frutos, entre otros (Maharaj *et al.*, 2010).

2.6.1 Percepción de las plantas a la radiación ultravioleta: mecanismo de los fotorreceptores

Las plantas son muy sensibles a la distribución espectral de la luz y perciben los cambios en el espectro y la intensidad de la luz a través de diversas proteínas conocidas como fotorreceptores (Palma *et al.*, 2021). Estos fotorreceptores son sensibles a regiones específicas del espectro y desencadenan una cascada de eventos que conducen a respuesta biológicas como la modulación molecular de vías metabólicas, afectando la floración y ramificación, además de incidir en la acumulación de biocompuestos en las plantas (Mariz *et al.*, 2019).

En algunas especies vegetales del género *Arabidopsis* sp., se ha identificado que la proteína LOCUS 8 DE RESISTENCIA UV (UVR8) es el fotorreceptor específico de luz ultravioleta UV-B (Jenkins, 2017). Este fotorreceptor desempeña un papel crucial en la iniciación de respuestas fotomorfogénicas como la expansión de cotiledones y la estimulación de la biosíntesis de flavonoides (Jenkins, 2017). Este proceso forma parte de un proceso conocido como señalización luminosa en donde

UVR8 es dependiente de UV-B para activar la expresión de un conjunto de genes que protege contra daños potenciales por exposición UV-B, incluidos genes que codifican enzimas de biosíntesis de flavonoides, enzimas de reparación de ADN y proteínas involucradas en la mitigación de estrés oxidativo, (Nawkar *et al.*, 2013).

En el caso de radiación ultravioleta UV-A se han identificado a los criptocromos (CRY; CRY1, CRY2 y CRY3), las fototropinas (PHOT 1, PHOT 2) y miembros de Zeitlupe como las principales proteínas fotorreceptoras tanto para UV-A como para luz azul (Palma *et al.*, 2021). Los CRY median en la mayoría de los cambios inducidos por luz azul y UV-A en la expresión genética, así como en la expresión de los cotiledones, la acumulación de metabolitos fenólicos y la regulación del tiempo de floración (Christie *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017). Los PHOT median el fototropismo y el movimiento del cloroplasto, mientras que CRY como PHOT median la inhibición del crecimiento del hipocótilo y la apertura estomática (Wang y Lin, 2020). Algunas investigaciones señalan que UVR8, fotorreceptor de UV-B, puede manifestarse también con UV-A, esto a través de vías de señalización relacionadas a la inhibición de la apertura estomática, así como la expresión genética y la acumulación de compuestos fenólicos específicos (Rai *et al.*, 2021).

Por lo anterior, las especies vegetales expuestas a la radiación UV, a través de fotorreceptores sensibles a regiones de onda específicas, inician cascadas de señales protectoras que involucran la acumulación de metabolitos especializados, la expresión de genes de las del ácido salicílico (SA) y jasmonato (JA) relacionado a mecanismos de defensa ante microorganismos así como vías de señalización enzimáticas como PAL, chalcona sintasa (CHS) y flavonol sintasa (FLS), y con ello un aumento en la producción de polifenoles, flavonoides y antioxidantes los cuales desempeñan un papel crucial en la fotoprotección de las plantas e influyendo en el aspecto nutricional y el sabor de los frutos (Mariz *et al.*, 2019).

2.6.2 Radiación UV-A: impacto y uso en la agricultura

La aplicación de UV-A en cultivos ha demostrado múltiples impactos asociados con el aumento en la calidad de postcosecha de frutos mediante la producción de compuestos, que promueven la germinación de semillas y desarrollo de plántulas, así como inhibición y control de patógenos en diversas especies vegetales (Díaz *et al.*, 2017). En relación, Mariz *et al.* (2019) demostraron que la suplementación de UV-A (368 nm) en etapa de floración manifestó un aumento en el color y firmeza de frutos de tomate asumiendo beneficios en etapa de almacenamiento debido a una mayor resistencia al ataque de hongos, así mismo, un ligero aumento en la producción de fenoles, o-difenoles y flavonoides beneficiando su calidad nutricional. En adición, Dyshlyuk *et al.* (2020) demuestran que después exponer a irradiación UV-A (365 nm por 180 min) frutos cosechados de tomate, estos conservaron muchas de las propiedades fisicoquímicas (solubilidad total de los sólidos, pH, color, acidez titulada) con una dinámica no negativa en las características antioxidantes agregadas, mientras que el aumento de la actividad antioxidante de los tomates ante UV-A (365 nm, 360 min) persistió durante 2 a 3 días después del tratamiento.

Qian *et al.* (2020) también mencionan que el enriquecimiento de UV-A (340 nm, 4 hrs) suplementaria para la producción de plántulas de pepino da como resultado plantas más compactas y robustas, adecuadas para su transporte, y es factible como regulador de crecimiento, sin pérdida de biomasa, hojas más gruesas, mayores diámetros de tallos y resistencia potencial a la influencia mecánica.

El uso de UV-A como recurso de control y/o inhibición de patógenos, resulta eficiente además de su uso en postcosecha, así lo mencionan González *et al.* (2023) que demuestran la capacidad de UV-A para inhibir y disminuir síntomas de daño fisiológico y marcadores de estrés en plantas de tomate, ocasionado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* como resultado de la producción de metabolitos secundarios y el mecanismo de protección ante estrés oxidativo generado por el patógeno.

Diversas publicaciones respaldan el uso de UV-A como un recurso complementario muy útil para mejorar desde procesos de desarrollo de planta hasta productos finales para diversas especies vegetales. Con énfasis en su capacidad para promover propiedades antioxidantes de la fruta y estimular vías celulares específicas para aumentar los niveles de importantes metabolitos secundarios, contribuyendo así, a la mejora nutricional de los alimentos y bienestar para los consumidores (Mariz *et al.*, 2019).

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.2 Establecimiento del experimento

El experimento se realizó en el Vivero perteneciente al Departamento de Botánica, adscrito a, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Ubicado en las coordenadas N 25° 21' 01.22" W 101° 01'27.59", en un invernadero de tipo túnel con cubierta de polietileno, con iluminación y ventilación natural, orientación norte-sur. Las condiciones ambientales en invernaderos fueron en promedio de 15-35°C de temperatura con 30 al 75% de humedad

3.3 Material vegetal

Se utilizaron semillas de tomate tipo Saladette de la variedad "El Cid F1" (Harris Moran, Davis, CA, USA), de crecimiento indeterminado.

3.4 Características de las lámparas

La suplementación de radiación ultravioleta tipo UV-A se realizó con lámparas tipo LED con radiación ultravioleta tipo UV-A (385 nm, 100 W), ISB SOLA BASIC ® con dimensiones de 225 cm de largo por 4 cm de ancho.

3.5 Desarrollo de cultivo

El experimento se realizó mediante el trasplante de plántulas de tomate en bolsas de polietileno de 20 L. utilizando como sustrato una mezcla de peatmoss y perlita

en una proporción 1:1 con base a volumen. Para la aplicación del riego se utilizó un sistema de riego dirigido con solución Steiner (Steiner, 1961). El cual se basa en la proporción y concentración de minerales dependiendo y de la fase de desarrollo. El pH de la solución nutritiva se ajustó con ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado a un valor de 6.5, con una conductividad eléctrica de 1.9-2.5 $mS\ cm^{-1}$. El tiempo de establecimiento del cultivo se realizó en un periodo de 150 días.

3.6 Tratamientos

Los tratamientos se basaron en la direccionalidad y cantidad de lámparas, estos fueron: (1) T0 control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); (2) UV (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2 (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel).

La primera aplicación de los tratamientos se realizó en la 3-4 semana después del trasplante (DDT). La irradiación se mantuvo durante un total de 66 días, con un periodo de irradiación de 30 min aplicado por la noche. Los tratamientos fueron aislados por una cortina de polipropileno blanco impermeable a la luz. La capacidad de radiación de las lámparas UV-A fue de $50\ W\ m^{-2}$, por lo que cada planta recibió una irradiación de 16.7 W en cada aplicación del tratamiento con una lámpara, es decir, $33.4\ m^{-2}$ para el tratamiento con dos lámparas.

3.7 Variables agronómicas

Se cuantificó la altura de planta con un flexómetro, diámetro de tallo (con vernier digital), biomasa fresca mediante una balanza digital (OHAUS Modelo Adventure Pro). El peso seco de tallo y hojas se obtuvo al secar las muestras en una estufa de secado Drying Oven modelo DHG9240A durante 72 h a una temperatura constante de $90^{\circ}C$. Así mismo, se contabilizó el número racimos y número de hojas.

De igual manera se determinó el peso frutos en cada cosecha realizada, los pesos se realizaron por medio de una balanza OHAUS Modelo Adventure Pro.

3.8 Variables bioquímicas

3.8.1 Carotenoides

Para la extracción se pesaron 10 mg de tejido liofilizado y se colocan en un tubo de ensayo, se agregaron 2 mL de hexano: acetona (3:2). El extracto obtenido se centrifuga a 12000 rpm durante 10 minutos a 4°C en una microcentrífuga (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R). Se recolectó el sobrenadante y se realizó dilución en caso de ser necesario. Con este extracto se determinaron clorofilas, licopeno y β -caroteno. El contenido de clorofila A y clorofila B se determinó mediante espectrofotometría (UNICO Spectrophotometer, Modelo UV2150) usando la absorbancia (A) leída a 663 nm y 645 nm en las ecuaciones 1 y 2. La clorofila total se obtiene con la ecuación 3. Para el blanco se utiliza hexano:acetona (3:2). Los resultados se expresaron en mg 100 g⁻¹ de peso seco (Nagata y Yamashita, 1992).

$$\text{Clorofila A} = 25.38 * A_{663} + 3.64 * A_{645} \quad (1)$$

$$\text{Clorofila B} = 30.38 * A_{645} - 6.58 * A_{663} \quad (2)$$

$$\text{Clorofilas totales} = 18.8 * A_{663} + 34.02 * A_{645} \quad (3)$$

El contenido licopeno y β -caroteno se determinó mediante espectrofotometría (UNICO Spectrophotometer, Modelo UV2150) usando las absorbancias 453 nm, 505 nm, 645 nm y 663 nm en la ecuación 4 y 5. Para el blanco se utiliza hexano: acetona (3:2). Los resultados se expresaron en mg 100 g⁻¹ de peso seco.

3.8.2 Vitamina C

Para medir el contenido de ácido ascórbico o vitamina C se utilizó el método de Hung y Yen (2002). Se pesaron 10 mg de tejido liofilizado de hojas y se colocaron

en un microtubo. Se agregó 1 mL de ácido metafosfórico al 1% y se filtró con papel Whatman N° 1. Posteriormente se recolectó 0.2 mL de la extracción y se agregó 1.8 mL de 2-6 diclorofenolindofenol (50 μM) y se dejó a temperatura ambiente por 15 segundos. La cuantificación se realizó por espectrofotometría (UNICO Spectrophotometer, Modelo UV2150) a una longitud de onda de 515 nm en una celdilla de cuarzo. Para el blanco se utilizó ácido metafosfórico. Los valores se obtuvieron a partir de la curva de calibración preparada con ácido ascórbico (0-50 mg L^{-1}). Los resultados se expresaron en mg g^{-1} de peso seco de ácido ascórbico.

3.8.3 Fenoles

El contenido de fenoles se determinó mediante el método del reactivo Folin-Ciocalteu descrito por Yu y Dahlgren (2000) con algunas modificaciones. Se determinó con 25 mg de muestra el cual se extrae con 1 mL de solución agua: acetona (1:1). La mezcla se homogeneiza en un vórtex durante 30 segundos y sónico por 5 minutos a 4°C. Las muestras se sometieron a centrifugación en una centrífuga (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R) a 12,500 RPM durante 10 minutos a cuatro grados centígrados. Para la cuantificación se toma una alícuota de 18 μL , se añadió 70 μL de reactivo Folin-Ciocalteu, 175 μL de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20% y 1740 μL de agua destilada. Posteriormente, se homogeneizó en vórtex durante 30 segundos. Posteriormente se sometió a baño maría a 45°C durante 30 minutos y se mide absorbancia a 750 nm en espectrofotómetro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer, Modelo UV2150) con celdilla de cuarzo usando agua: acetona como blanco. Los resultados se expresan en miligramos equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso seco ($\text{mg de EAG } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PS}$).

3.8.4 Flavonoides

Se llevó a cabo utilizando el método de Dowd adaptado por Arvouet Grand *et al.*, (1994). Para la extracción de estos, se colocaron 25 mg de tejido liofilizado en un microtubo, donde se agregaron 2 mL de metanol de grado reactivo. Se homogeneizó

en vórtex durante 30 segundos. La mezcla se filtró usando el papel Whatman No. 1. Para la cuantificación, se tomó una alícuota de 1 mL del extracto, se agregaron 2 mL de solución metanólica de tricloruro de aluminio (AlCl_3) al 2% en un microtubo y se dejó reposar durante 20 minutos en la oscuridad.

Transcurrido en tiempo se tomó la lectura en un espectrofotómetro UV-Vis (UV-Vis (UNICO Spectrophotometer, Modelo UV2150). A una longitud de onda de 415 nm utilizando una celdilla de cuarzo. El contenido de flavonoides se expresó en miligramos equivalentes de quercetina por 100 g de peso seco ($\text{mg EQ } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PS}$).

3.8.5 Capacidad antioxidante (DPPH)

La capacidad antioxidante se determinó mediante el DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazil) método para compuestos hidrofílicos y lipófilos (Brand-Williams *et al.*, 1995). La capacidad antioxidante total (TAC) se obtuvo añadiendo los compuestos hidrofílicos y lipófilos. La solución madre se preparó mezclando 2.5 mg de DPPH radical con 100 mL de metanol. En una microplaca se adicionaron 6 μL del extracto de cada muestra con buffer de fosfatos o hexano: acetona, posteriormente se agregaron 234 μL de DPPH radical (0.1 mM). La mezcla se homogeneizó cuidadosamente. Para el blanco se utilizó 240 μL de metanol. La absorbancia se tomó a 515 nm después de 30 minutos. Los compuestos hidrofílicos se determinaron usando buffer de fosfatos como solución de extracción, mientras que para los lipófilos se usó hexano: acetona. Los resultados se expresaron como equivalentes de ácido ascórbico ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{ DW}$).

3.9 Calidad de fruto

Se tomaron muestras de fruto del segundo racimo y se evaluó inmediatamente la firmeza utilizando un penetrómetro (WAGNER Force Dial FDK 2) el diámetro ecuatorial y polar del fruto. Este mismo fruto fue macerado con un mortero y utilizado para evaluar el contenido de sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$) utilizando un

refractómetro (ATAGO, 1-425-637-2107), pH y conductividad eléctrica (CE) con un potenciómetro (OHAUS, STARTER3100m) y Potencial de Óxido-Reducción (ORP) (HANNA, HI98130).

3.10 Análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar con tres tratamientos con doce repeticiones por tratamiento. Para el análisis de las variables agronómicas, se utilizaron las doce repeticiones completas. En el caso de las variables bioquímicas y calidad de fruto, se tomó una muestra compuesta de seis repeticiones. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de medias de Fisher ($p \leq 0.05$) utilizando el software Infostat versión 2020.

IV RESULTADOS

Comparado con plantas del tratamiento control (T0), el rendimiento total de frutos por planta de tomate redujo con la aplicación de UV-A (Figura 1B). El rendimiento de número de frutos por planta no reflejó diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 1B).

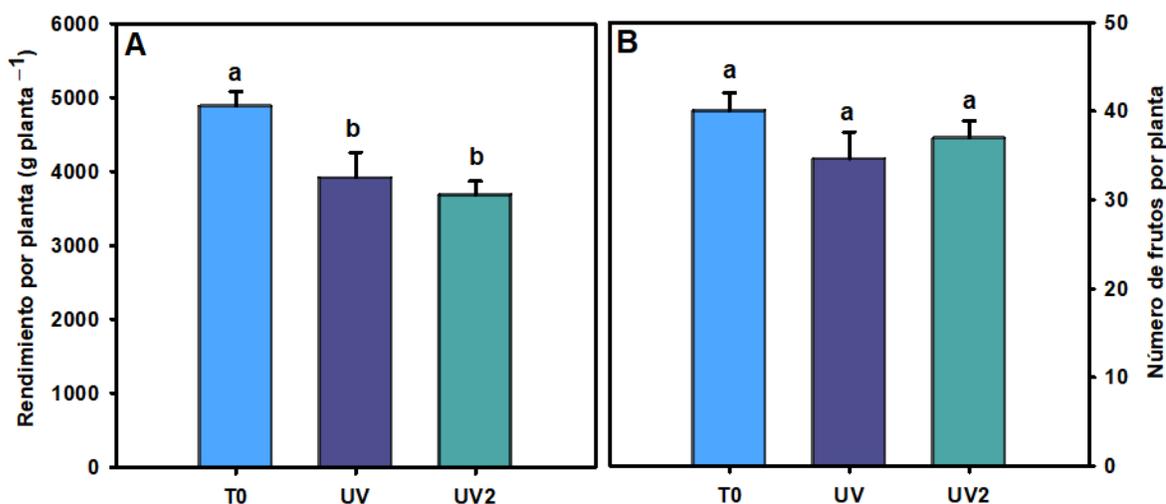


Figura 1. Impacto de la radiación UV-A en (A) Rendimiento por planta (B) Número de frutos por planta. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

La altura de la planta de tomate se modificó con la aplicación de radiación UV-A (Figura 2A). Los tratamientos UV y UV2 obtuvieron resultados similares, estos fueron significativamente mayor a T0 con una diferencia de 4.2%.

El diámetro de tallo se modificó con la aplicación de radiación UV-A (Figura 2B) . Los tratamientos UV y UV2 obtuvieron resultados con diferencias significativas con respecto a T0, con un 8.5% y 3.9% mayor respectivamente.

El número de hojas por planta no presentó diferencias significativas entre los tratamientos con la aplicación de UV-A (Figura 2C).

En relación al número de racimos por planta, existe una diferencia estadísticamente significativa de T0 respecto al resto de tratamientos. El tratamiento UV se relaciona con T0, aunque no refleja diferencias significativas, el tratamiento UV2 no presentó modificaciones (Figura 2D).

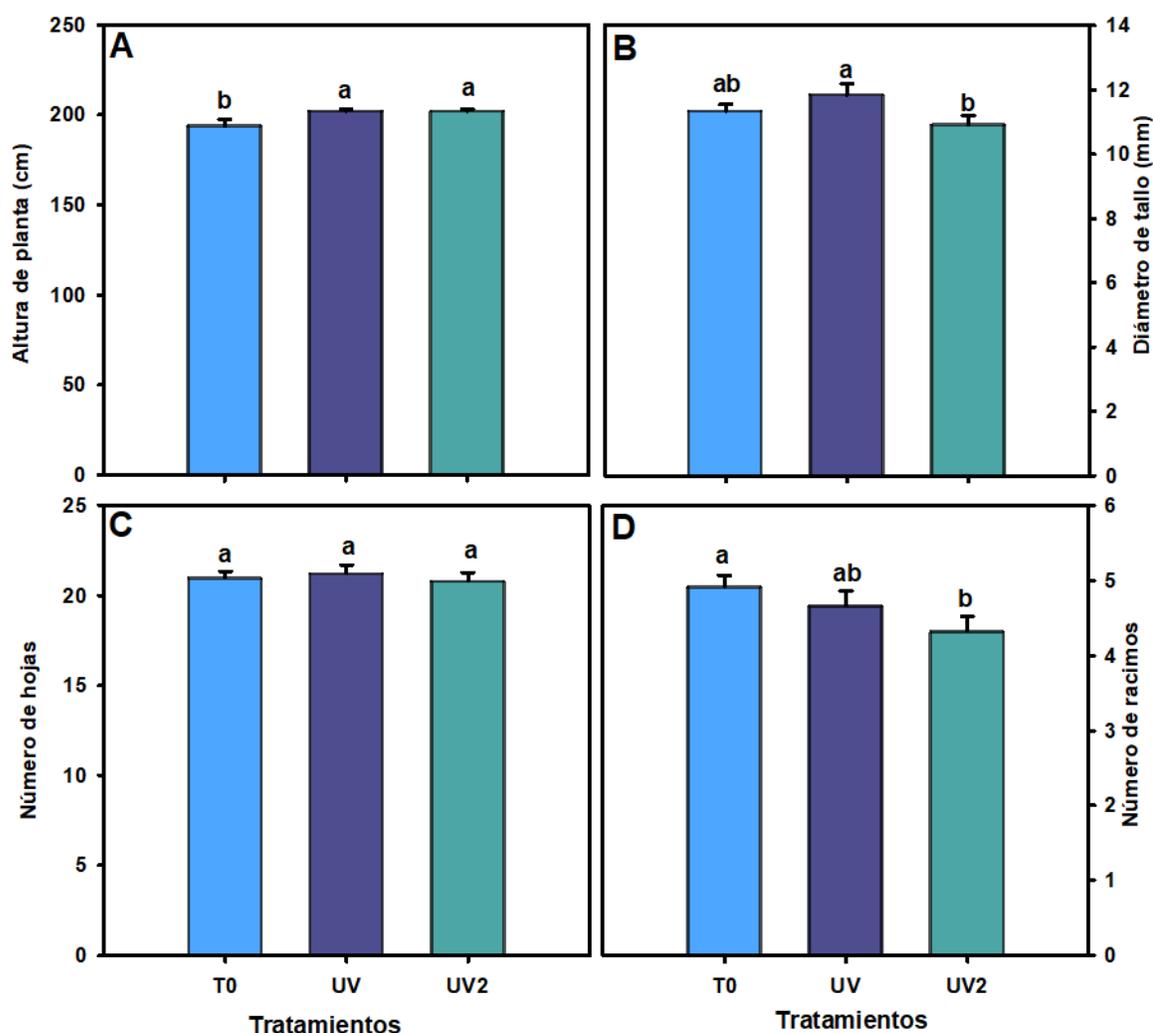


Figura 2. Impacto de la radiación UV-A en (A) Altura de planta (B) Diámetro de tallo, (C) Número hojas, (D) Número de racimos. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

La biomasa fresca de la planta de tomate no se modificó significativamente con la aplicación de UV-A (Figura 3A). Por otro lado, la biomasa seca de las plantas de tomate si se modificó con la aplicación de UV-A, el tratamiento UV reflejó un valor 46.5% mayor que T0, UV2 reflejó un valor mayor, aunque no diferente de T0 (Figura 3B).

La longitud de la raíz del tomate no se modificó con la aplicación de UV-A (Figura 3C). Sin embargo, si se reflejó diferencias en la biomasa seca de raíz ante la aplicación de UV-A, el tratamiento UV presentó un peso 87% mayor que T0, al igual que UV2 que presentó diferencia significativa con un 26% en contraste con T0 (Figura 3D).

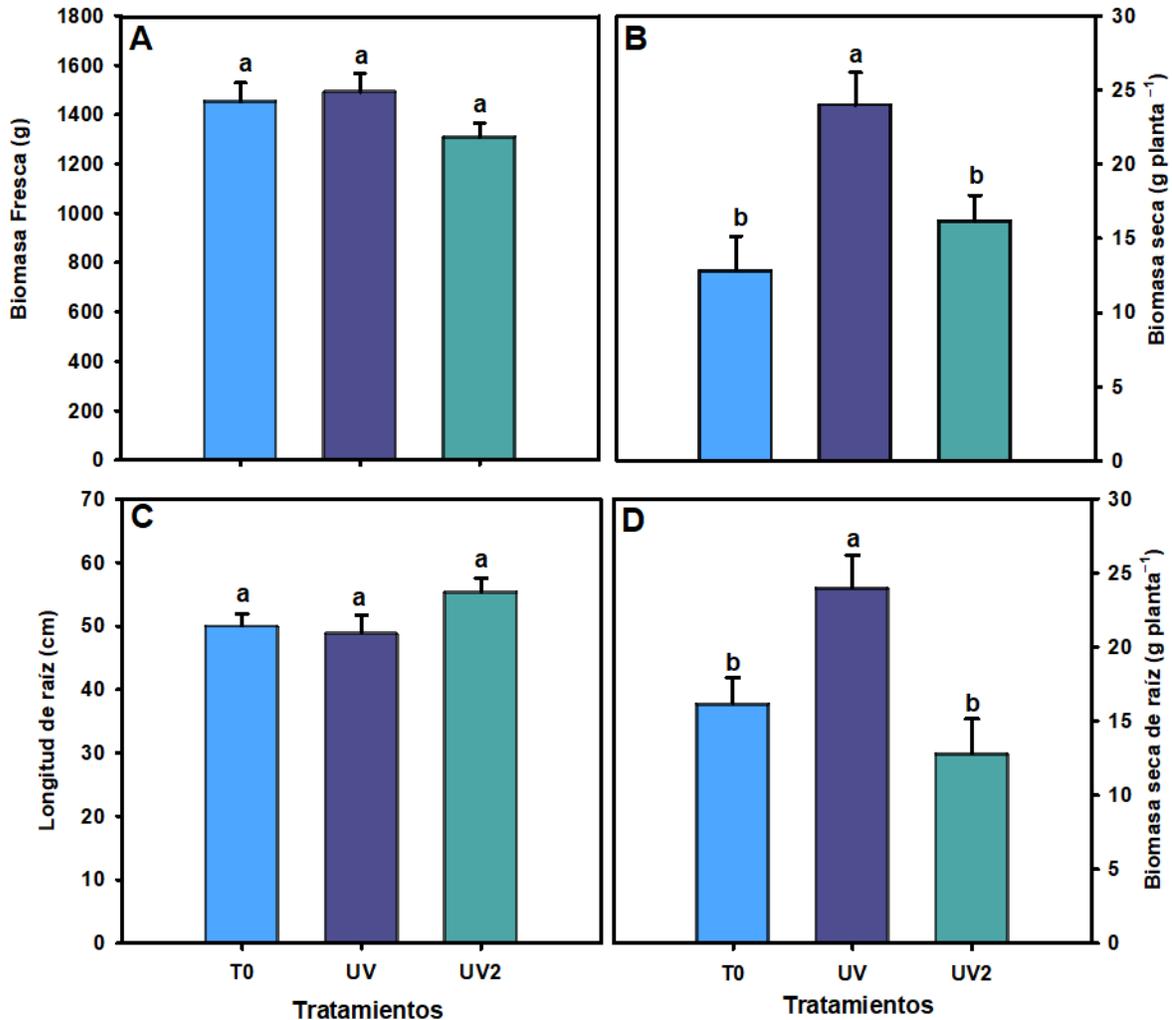


Figura 3. Impacto de la radiación UV-A en (A) Biomasa fresca, (B) Biomasa seca, (C) Longitud de raíz (D) Biomasa seca de raíz. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

El pH de los frutos de tomate se modificó con la aplicación de UV-A (Figura 4A). El tratamiento UV reflejó un valor de 21.5% mayor que T0. UV2 también reflejó un incremento en los valores, aunque no significativamente diferente de T0.

La conductividad eléctrica en los frutos de tomate no reflejó diferencia significativa ante la aplicación de UV-A (Figura 4B).

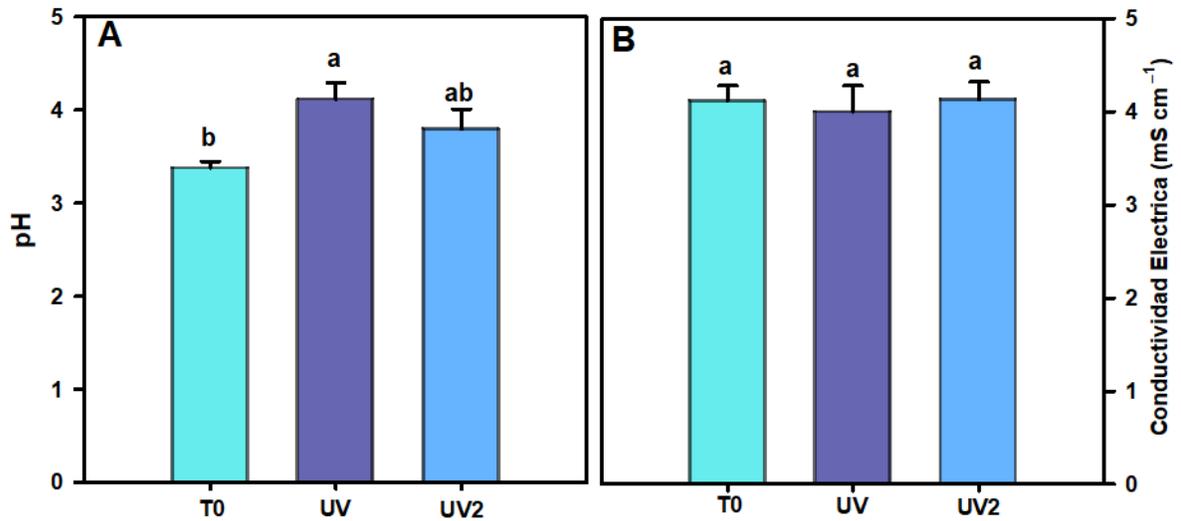


Figura 4. Impacto de la radiación UV-A en (A) pH, (B) Conductividad eléctrica. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

Los parámetros de Firmeza (Figura 5A) y Solidos Solubles totales en frutos (Figura 5B) de tomate no se modificaron con la aplicación de UV-A.

El ORP de frutos de tomate se modificó con la aplicación de UV-A (Figura 5C). El tratamiento UV fue significativamente mayor a T0 con una diferencia del 178%; así mismo, UV2 reflejó un valor de 64.8% mayor que T0.

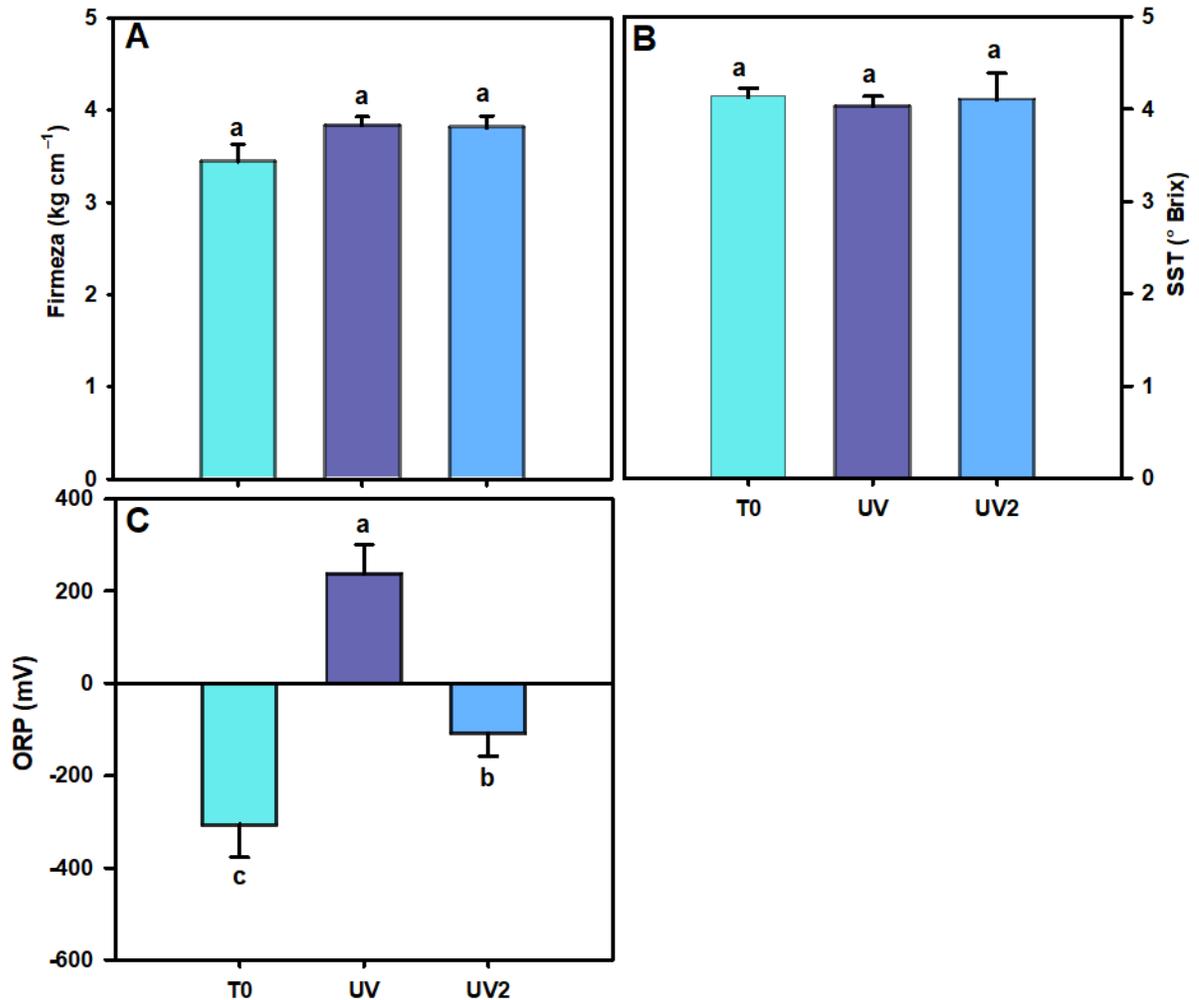


Figura 5. Impacto de la radiación UV-A en (A) Firmeza, (B) Sólidos Solubles Totales (C) Potencial de Óxido Reducción. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

El contenido de fenoles en frutos de tomate se modificó con la aplicación de UV-A. El tratamiento UV fue estadísticamente superior con un 18.54% mayor con respecto a T0, el tratamiento UV2 no fue significativamente diferente a T0 (Figura 6A).

El contenido de Vitamina C (Figura 6B), así como el contenido de flavonoides (Figura 6C) no presentaron diferencias significativas en comparación con el tratamiento testigo.

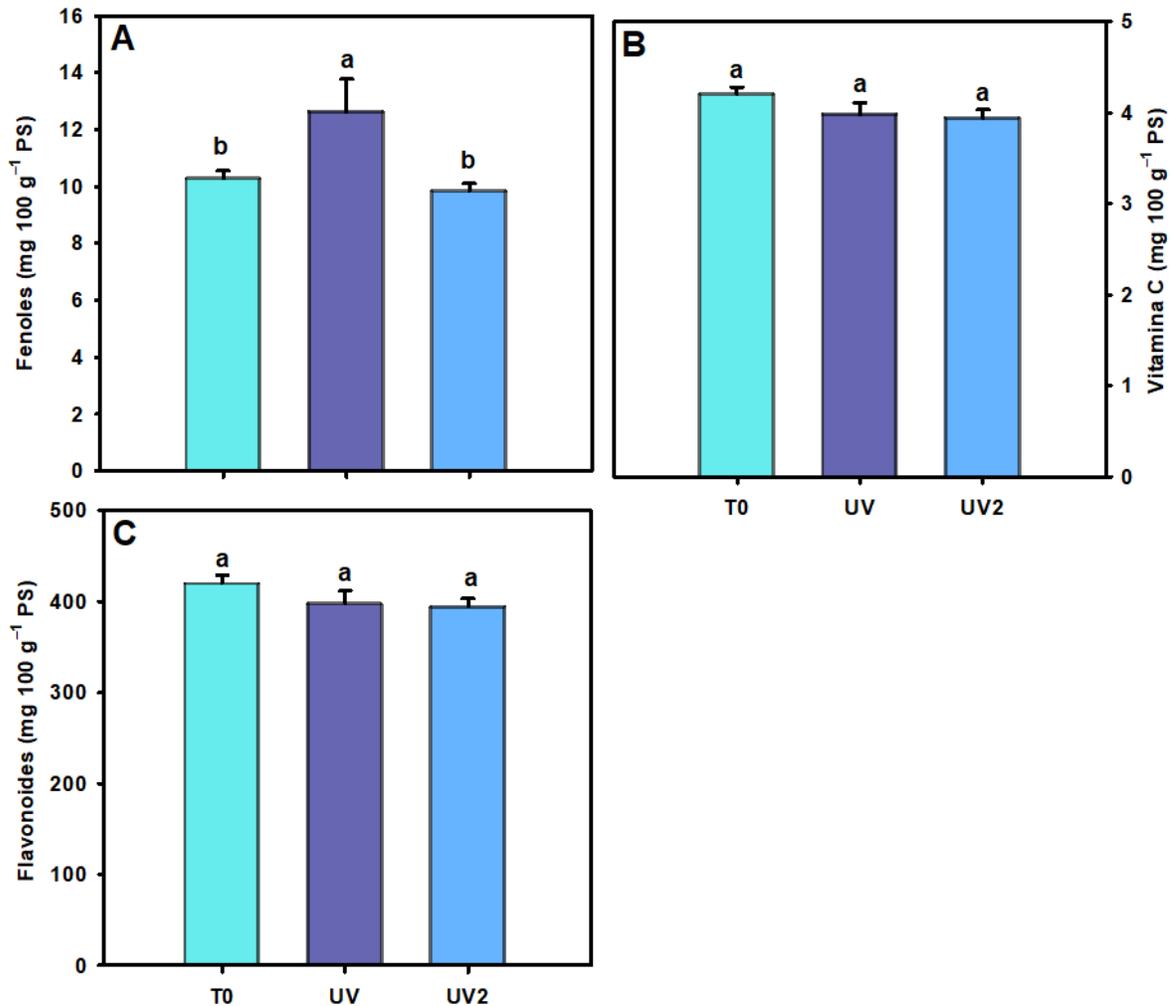


Figura 6. Impacto de la radiación UV-A en (A) Fenoles, (B) Vitamina C, (C) Flavonoides. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

El contenido de licopeno en frutos de tomate presentó diferencias significativas con la aplicación de UV-A. El testigo, presentó un valor estadístico superior al resto de los tratamientos, estos últimos no presentaron modificaciones (Figura 7A).

El contenido de β -caroteno en frutos de tomate no presentó diferencias significativas con la aplicación de UV-A (Figura 7B).

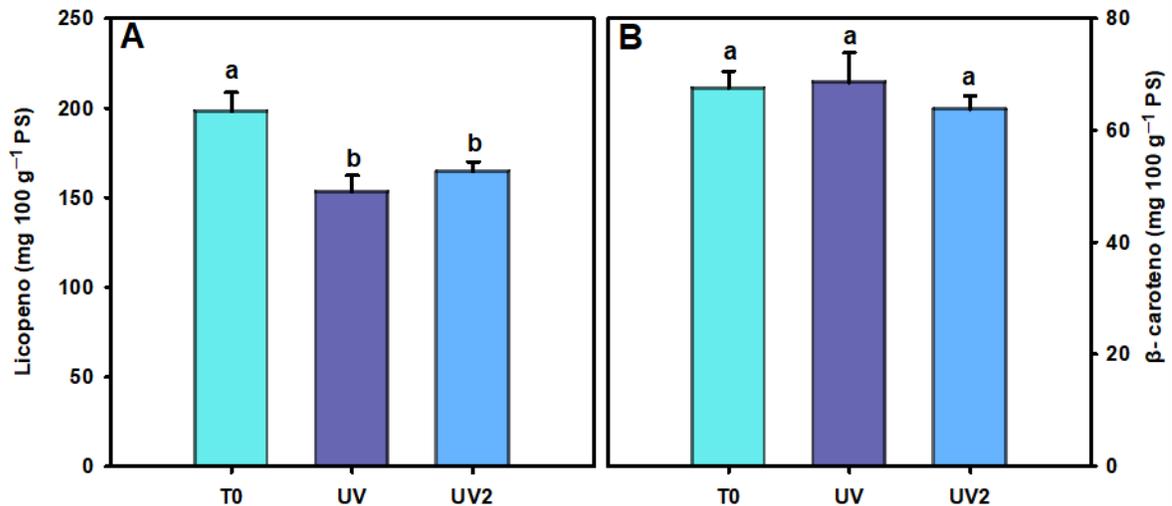


Figura 7. Impacto de la radiación UV-A en (A) Licopeno, (B) β -caroteno. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

El contenido de clorofila A y clorofila B, así como el contenido de clorofilas totales en los frutos de tomate no reflejaron diferencias estadísticamente significantes ante la aplicación de UV-A (Figura 8).

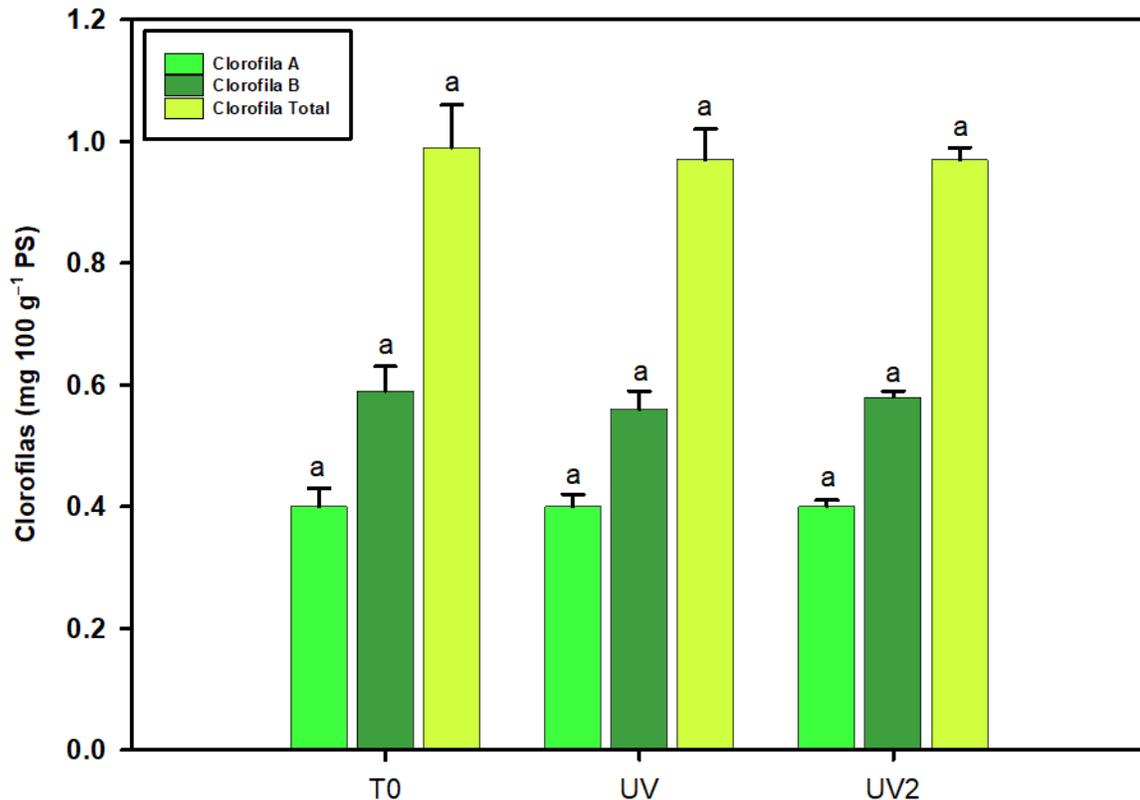


Figura 8. Impacto de la radiación UV-A en con contenido de clorofila A, clorofila B y clorofilas totales en frutos de tomate. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

La capacidad antioxidante hidrofílica en frutos de tomate se modificó con la aplicación de UV-A. El tratamiento UV2 reflejo un incremento del 3.2% con respecto a T0, mientras que UV resulto -3.1% este parámetro comparado con T0 (Figura 9).

La capacidad antioxidante lipofílica en frutos de tomate se modificó con la aplicación de UV-A. El tratamiento UV fue significativamente superior al resto de tratamientos, con una diferencia del 20% respecto a T0. UV2 posee una diferencia significativa de 18% respecto a T0.

Finalmente, la capacidad antioxidante total refleja una modificación por parte de la aplicación de UV-A en frutos de tomate. UV2 fue estadísticamente superior a todos los tratamientos, mostrando un aumento del 7% respecto a T0. También existe una diferencia significativa con UV, ya que posee un valor 3.9% mayor que T0 (Figura 9).

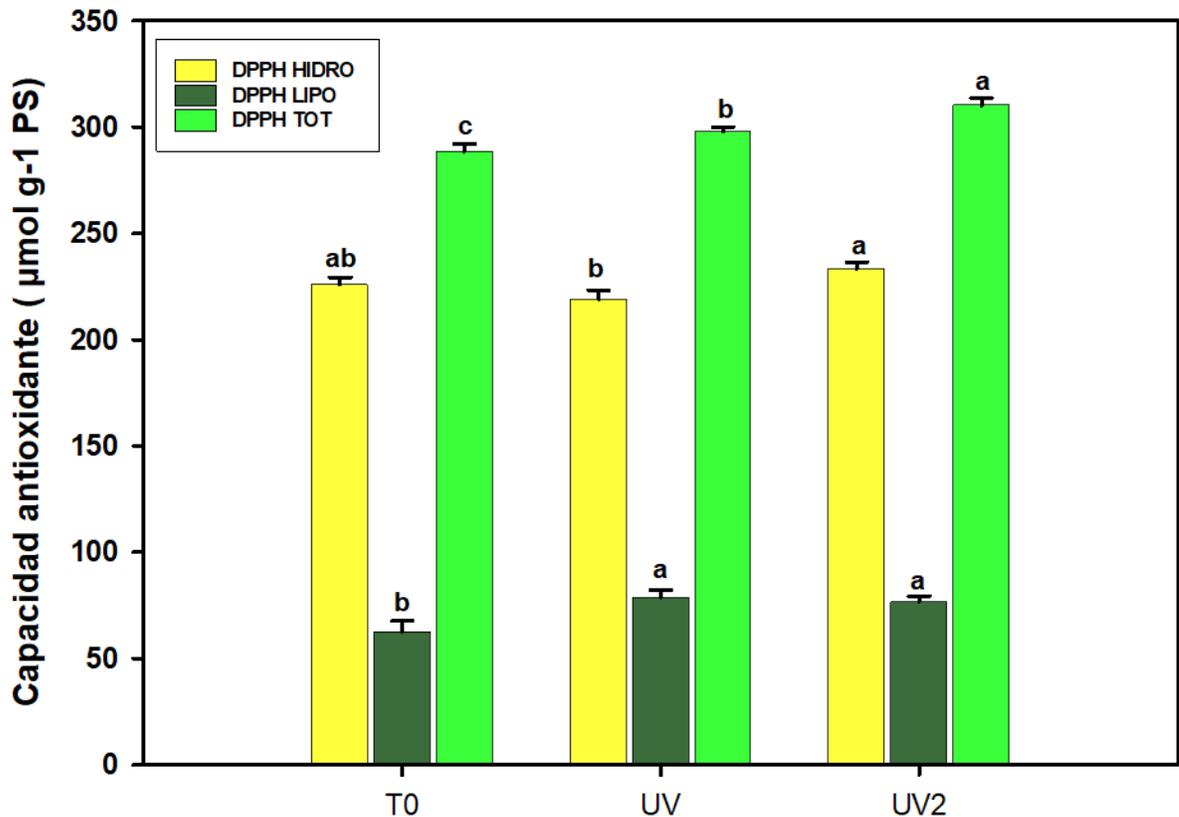


Figura 9. Impacto de la radiación UV-A en la capacidad antioxidante hidrofílica, lipofílica y total en frutos de tomate. T0, control (plantas de tomate sin suplementación UV-A); UV, (plantas de tomates suplementadas con UV-A mediante una lámpara irradiando solo en parte inferior); UV2, (plantas de tomate suplementadas con UV-A mediante dos lámparas irradiando la parte inferior y superior sobre dosel). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p \leq 0.05$).

V DISCUSIÓN

El rendimiento total reflejado en el peso total y número de frutos total por planta indica que la radiación UV-A no indujo diferencias significativas en el rendimiento de las plantas (Figura 1). Esto refleja un comportamiento contrario al que se relacionan estudios de UV y su influencia en rendimientos de cultivo. Así lo demuestran Mariz *et al.* (2019) donde afirma que la suplementación con UV-A durante 1 hora y UV-B en 2 min, plantas de tomate estimula su productividad, con aumentos en la cantidad de frutos por planta. Así mismo, Darras *et al.* (2020) demuestran que la exposición UV-C a 2.5 kJ m^{-2} aumenta el número total de frutos y en el peso total de frutos de tomate hasta un 24% y un 31% respecto de los controles no irradiados, sugiriendo que las bajas dosis de UV-C desencadenan reacciones fotomorfogénicas que aumentan el cuajado de frutos de tomate, lo que puede estar asociado con la señalización luminosa y la producción de hormonas del metabolismo primario.

Bajo este contexto, se puede suponer que UV-A debió tener efectos similares. Este fenómeno puede atribuirse a la etapa fenológica en la que se comienza con la irradiación de UV-A ya que, Kang *et al.* (2018) demostraron que la suplementación de 8 y 16 horas de UV-A a la radiación visible (400-700 nm) en plántulas de tomate estimuló la biomasa vegetal, así mismo, se presentaron mejoras en relación a tamaño de hojas, fotosíntesis, lo cual, en el transcurso de su desarrollo contribuye a un mejor rendimiento de frutos. En el presente estudio, la irradiación se aplicó en una etapa madura de la planta de tomate lo cual puede explicar parcialmente la discrepancia de los resultados.

Los componentes de desarrollo morfológico de la planta difirieron en diversos aspectos. La altura de la planta reflejó un efecto mayor tanto para UV como UV2 con respecto al testigo, este comportamiento resulta destacable, puesto que, diversos autores demuestran el efecto inhibitorio en la altura de la luz ultravioleta en

distintas especies vegetales. Zhang *et al.* (2014) establecen que la UV-A y UV-B provoca una disminución en la altura de la soja, debido a la generación de entrenudos más cortos en diversas especies. La exclusión de la radiación ultravioleta favorece las fitohormonas o reguladores de crecimiento. Este efecto se relaciona con la acción de los criptocromos, que pueden desempeñar un papel en la evitación de la sombra (Kang *et al.*, 2018).

El diámetro de tallo se modificó con la aplicación de UV-A mediado principalmente por el tratamiento UV. Este resultado coincide con el obtenido por Qian *et al.* (2020) donde establece que la suplementación de UV-A en pepino aumentó un 29% el peso de tallo por unidad de longitud en comparación con el control, favoreciendo positivamente la rigidez y daños por manipulación mecánica. Esta tendencia afirma el efecto fotoquímico de la luz ultravioleta como regulador de crecimiento. En este caso manifestó efectos en el desarrollo de entrenudos más cortos y más gruesos, y por ende la robustez en el tallo de la planta de tomate.

En relación al número de hojas y el número de racimos por plantas, no sufrieron cambios significativos en contraste con el tratamiento testigo. Este comportamiento indica un efecto positivo, puesto que, diversas investigaciones señalan la reducción de área foliar como acción oxidativa de la radiación ultravioleta sobre las tubulinas, las cuales son proteínas que se ensamblan para formar el huso mitótico en la división celular (Carrasco, 2009). Cabe señalar que esta acción da origen a hojas más gruesas como acción del cromóforo y el mecanismo de protección de la inducción de síntesis de lignina y otros polifenoles (Neugart y Schreiner 2018; Carrasco, 2009).

La tendencia de la generación de biomasa ante la exposición a la radiación ultravioleta es señalada por distintos autores. Qian *et al.* (2020) demuestra los efectos de UV-A en plantas de pepino en la generación de biomasa como efectos sobre la masa foliar total como resultado en el espesor de las hojas. Así mismo, Kang *et al.* (2018) indica una mayor producción de biomasa por la expansión del área foliar facilitando la captura de luz en plantas de tomate sometido a UV-A ($2.34 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). En este caso se observó un valor más alto con la exposición a mediante

una sola lámpara, aunque no fue significativo en comparación con el tratamiento testigo. Este factor se le puede atribuir al tiempo de exposición, al respecto, Neugart y Schreiner (2018) mencionan la variabilidad que existe entre el tiempo de exposición ante radiación UV-A y UB-A en la biomasa de diversas especies, por lo que queda abierto a un estudio más específico.

Las plantas de tomate sometidos con el tratamiento UV2 presentaron un alza ligeramente mayor en la longitud de raíz de las plantas de tomate, aunque no representa una diferencia significativa en comparación con UV o T0. Por otro lado, se presenta un resultado diferente para la biomasa seca de la raíz, donde si se modificó con la aplicación de ultravioleta favorecido por el tratamiento UV. Este resultado es similar al obtenido por Qian *et al.* (2020), donde confirman que el contenido de materia seca de las raíces de pepino aumentó significativamente en plantas cultivadas bajo luz enriquecida con UV-A (47%). Esto puede atribuirse al engrosamiento de las raíces como un mecanismo de tolerancia al estrés ocasionado por la luz ultravioleta. Bernal *et al.* (2015) mencionan un proceso de nodulación en plantas de poroto estimulado por radiación UV-B en conjunto con la producción de compuestos absorbedores de UV en raíces.

En el presente estudio las propiedades fisicoquímicas de los frutos de tomate sometidos a UV-A, como los son: el pH y ORP si presentaron diferencias significativas en el tratamiento UV en contraste con el testigo, sin embargo, los parámetros de CE, el contenido de sólidos solubles totales (SST) y la firmeza del fruto no fueron diferentes al testigo. Este efecto se correlaciona a la radiación UV como un agente conservador. Maharaj *et al.* (2010) afirman que la irradiación UV-C en tomate con una dosis a 3.7 kJ m^{-2} junto con una temperatura moderada (16°C) y un almacenamiento de alta humedad (95%), retardaron significativamente el progreso de la senescencia en los frutos de tomate al menos una semana. Como resultado, el color, la pérdida de clorofila y el desarrollo de licopeno de los frutos se retrasaron durante el período de almacenamiento de 35 días. Este proceso de mayor resistencia al deterioro sería resultado de la reducción en la actividad de

enzimas de degradación de pared celular, como: poligalacturonasa, pectin metilestera, celulasa, xilanas y β -D-galactosidasa (Rivera *et al.*, 2007).

La conservación de algunas propiedades organolépticas en frutos puede estar mediada por la acción de defensa de la membrana celular al estrés oxidativo ocasionado por la radiación ultravioleta (Rivera *et al.*, 2007). Este efecto involucra el aumento o activación de compuestos antioxidantes y la inactivación de enzimas en algunos sistemas vegetales. Ait Barka *et al.* (2000) mencionan que existen dos fases en respuesta a los cambios en la peroxidación de marcadores lipídicos en la membrana, en tomates expuestos a tratamiento UV-C (254 nm) en una dosis de 3.7 kJ m⁻². En la primera fase se observa una inducción de marcadores lipídicos de peroxidación (compuestos como lipofuscina, malondialdehído, aldehídos, pentano, etano, peróxido de hidrógeno, y flujo de electrolitos como potasio y calcio). La segunda fase implicaría una baja inducción con una fase de reparación o defensa. Esta tendencia indica la activación de enzimas antioxidantes y desintoxicantes, como la actividad de enzimas peroxidasas, como medio de defensa para evitar ROS ocasionadas por UV.

La suplementación de UV-A en plantas modificó el contenido de ciertos compuestos antioxidantes en los frutos de tomate. El contenido de fenoles se vio modificada con diferencias significativas en contraste con T0. Este resultado coincide con el obtenido por Mariz *et al.* (2019) donde obtuvieron que tomates irradiados con UV-A (368 nm) a una dosis de 11.5 kJ m⁻² día⁻¹ tenían niveles más altos de compuestos antioxidantes como fenoles, o-difenoles y flavonoides. Este efecto se relaciona a la acumulación de fenólicos en la cutícula y en las células epidérmicas, un mecanismo de acción para absorber fuertemente la radiación UV.

Los cambios en los compuestos fenólicos mediados por UV-A son resultado de la regulación genética asociada a fotorreceptores específicos, sobre todo aquellos genes involucrados en la ruta de flavonoides, incluidos PAL, CHS, producción de pigmento de antocianinas 1 (PAP1) y dihidroflavonol 4-reductasa (DFR). Al respecto se ha documentado que, después de la transcripción, la actividad de PAL, una

enzima clave en la ruta de los fenilpropanoides, se ha incrementado por UV-A en *Lactuca sativa* y *Solanum lycopersicum* (Lee *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2013).

El contenido de vitamina C y flavonoides no se modificó con la aplicación de UV-A. Este resultado puede estar relacionado con la dosificación de UV administrados. (Mariz *et al.*, 2019) mencionan la relación que existe poca o nula producción de compuestos de antioxidantes y contenido de flavonoides por la diferencia en las dosis UV aplicados.

El contenido de pigmentos en frutos no se modificó con la aplicación de UV-A. El contenido de licopeno y β -caroteno no representaron diferencias significativas en comparación con el tratamiento testigo. Este resultado es contrario a lo que establece la literatura. Dyshlyuk *et al.* (2020) afirman que el tratamiento UV postcosecha a una longitud de onda de 365 nm tiene un efecto significativo sobre el contenido de compuestos biológicamente activos (licopeno y compuestos fenólicos comunes) y la actividad antioxidante de los componentes de las muestras de tomate rojo maduro. Pigmentos como el licopeno, así como derivados de α y β -caroteno son importantes mediadores en la coloración del fruto y poseen un efecto positivo al brindar protección contra el daño oxidativo al reduciendo a formación de O_2 mediante la absorción de energía de los estados excitados de la clorofila, así como contrarrestar directamente el O_2 (Maharaj *et al.*, 2010).

El contenido de clorofila en los frutos de tomate no se modificó con la aplicación de UV-A. Este resultado indica el efecto de la clorofila como mecanismo ante la fotoxidación. En el proceso de maduración existe una degradación de la clorofila y una acumulación progresiva de carotenoides, esto a medida que los cloroplastos se transforman en cromoplastos (Rivera *et al.*, 2007). Esta acción producida por el estrés ocasionado por UV está mediada por procesos enzimáticos y/o no enzimáticos. La desaparición del color verde se debe a la sustitución del magnesio en la molécula de clorofila por hidrógeno para formar feofitina incolora en condiciones ácidas (Maharaj *et al.*, 2010).

En este estudio la capacidad antioxidante lipofílica, hidrofílica y total de los frutos de tomate se vio modificada con la aplicación de UV-A. Este resultado se relaciona con

el obtenido por Bravo *et al.* (2012), cuyo estudio en tomates sometidos a UV-C (254 nm, 15 W) muestra el aumento de la actividad antioxidante lipófila determinada principalmente por el contenido de licopeno. A su vez, el contenido de antioxidantes hidrófilos posee una correlación al aumento de compuestos fenólicos y flavonoides totales.

Por lo anterior, gracias a la capacidad fisiológica del tejido, diversas moléculas responden operando una serie de mecanismos de antioxidantes (carotenoides u fenoles) y eliminadores enzimáticos (superóxido dismutasa) en respuesta al daño ocasionado ante la exposición a la radiación UV (Maharaj *et al.*, 2010). La ruta o la síntesis de fenoles se relaciona directamente con señalizaciones de foto receptores UVR8 y CRY los cuales se encargan de la filtración de UV-B y UV-A (Maharaj *et al.*, 2010).

VI CONCLUSIÓN

La aplicación de radiación UV-A en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L) mostró respuestas variadas en los parámetros agronómicos y bioquímicos de los frutos. La aplicación de UV-A afectó positivamente la altura de la planta, el diámetro del tallo y la biomasa seca de la planta y la raíz, indicando adaptaciones morfológicas al estrés inducido por la radiación ultravioleta. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en el rendimiento total de frutos por planta ni en el número de frutos por planta comparado con el tratamiento control. Los resultados mostraron que la radiación UV-A aumentó el contenido de fenoles, vitamina C y la capacidad antioxidante, lo cual está asociado a una mejora en la calidad nutracéutica del tomate. De manera general, radiación UV-A puede ser una herramienta efectiva para mejorar la calidad nutracéutica y algunos aspectos morfológicos y con la capacidad de afectar positivamente el rendimiento.

VII LITERATURA CITADA

- Abete, I., Perez-Cornago, A., Navas-Carretero, S., Bondia-Pons, I., Zulet, M. A., y Martinez, J. A. (2013). A regular lycopene enriched tomato sauce consumption influences antioxidant status of healthy young-subjects: A crossover study. *Journal of Functional Foods*, 5(1), 28–35. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2012.07.007>
- Ait Barka, E., Kalantari, S., Makhlouf, J., y Arul, J. (2000). Effects of UV-C irradiation on lipid peroxidation markers during ripening of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) fruits. *Functional Plant Biology*, 27(2), 147–152. <https://doi.org/10.1071/PP99091>
- Ali, M. Y., Sina, A. A. I., Khandker, S. S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., Khalil, M. I., y 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>
- Bernal, M., Verdaguer, D., Badosa, J., Abadía, A., Llusia, J., Peñuelas, J., Núñez-Olivera, E., y Llorens, L. (2015). Effects of enhanced UV radiation and water availability on performance, biomass production and photoprotective mechanisms of *Laurus nobilis* seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 109, 264–275. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2014.06.016>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., y Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Bravo, S., García-Alonso, J., Martín-Pozuelo, G., Gómez, V., Santaella, M., Navarro-González, I., y Periago, M. J. (2012). The influence of post-harvest UV-C hormesis on lycopene, β -carotene, and phenolic content and antioxidant activity of breaker tomatoes. *Food Research International*, 49(1), 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.018>

- Carrari, F., y Fernie, A. R. (2005). Metabolic regulation underlying tomato fruit development. *Journal of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj020>
- Carrasco-Ríos, L. (2009). *EFECTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA-B EN PLANTAS*.
- Cheng, H. M., Koutsidis, G., Lodge, J. K., Ashor, A. W., Siervo, M., y Lara, J. (2019). Lycopene and tomato and risk of cardiovascular diseases: A systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(1), 141–158. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1362630>
- Christie, J. M., Blackwood, L., Petersen, J., y Sullivan, S. (2015). Plant Flavoprotein Photoreceptors. *Plant and Cell Physiology*, 56(3), 401–413. <https://doi.org/10.1093/PCP/PCU196>
- Darras, A. I., Tsikaloudakis, G., Lycoskoufis, I., Dimitriadis, C., y Karamousantas, D. (2020). Low doses of UV-C irradiation affects growth, fruit yield and photosynthetic activity of tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 267, 109357. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2020.109357>
- Del Giudice, R., Raiola, A., Tenore, G. C., Frusciante, L., Barone, A., Monti, D. M., y Rigano, M. M. (2015). Antioxidant bioactive compounds in tomato fruits at different ripening stages and their effects on normal and cancer cells. *Journal of Functional Foods*, 18, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.060>
- Demkura, P. V., y Ballaré, C. L. (2012). UVR8 mediates UV-B-induced arabidopsis defense responses against botrytis cinerea by controlling sinapate accumulation. *Molecular Plant*, 5(3), 642–652. <https://doi.org/10.1093/mp/sss025>
- Díaz, L. C. E., Bacópulos-Mejía, E., Angélica Ruiz-Torres, N., Ibarra-Jiménez, L., Gonzales-Morales, S., y Benavides-Mendoza, A. (2017). Irradiación de semillas de tomate con UV-B y UV-C: impacto sobre germinación, vigor y crecimiento. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 8).
- Díaz, P. E., Anaya, R. M., y De la Rorsa Villafranca, D. (2011). Modelos de evaluación agroecológica de tierras: erosión y contaminación en el entorno MicroLEIS. *Teoría*

y *Praxis: Turismo, Negocios, Recursos Naturales.*, 9, 57–79.
<https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>

Dorais, M., Ehret, D. L., y Papadopoulos, A. P. (2008). Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: From the seed to the consumer. *Phytochemistry Reviews*, 7(2), 231–250. <https://doi.org/10.1007/S11101-007-9085-X/METRICS>

Dyshlyuk, L., Babich, O., Prosekov, A., Ivanova, S., Pavsky, V., y Chaplygina, T. (2020). The effect of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato. *Heliyon*, 6(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03288>

Elbadrawy, E., y Sello, A. (2016). Evaluation of nutritional value and antioxidant activity of tomato peel extracts. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 9, pp. S1010–S1018). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.11.011>

Esua, O. J., Chin, N. L., Yusof, Y. A., y Sukor, R. (2019). Effects of simultaneous UV-C radiation and ultrasonic energy postharvest treatment on bioactive compounds and antioxidant activity of tomatoes during storage. *Food Chemistry*, 270, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.031>

FAOSTAT. (2023, March 29). *Estadísticas Datos agrícolas*. Cultivos y Productos de Ganadería. Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL>

Fitzgerald, K. C., O'Reilly, É. J., Fondell, E., Falcone, G. J., McCullough, M. L., Park, Y., Kolonel, L. N., y Ascherio, A. (2013). Intakes of vitamin C and carotenoids and risk of amyotrophic lateral sclerosis: Pooled results from 5 cohort studies. *Annals of Neurology*, 73(2), 236–245. <https://doi.org/10.1002/ANA.23820>

Gebicki, J. M. (2016). Oxidative stress, free radicals and protein peroxides. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 595, 33–39. <https://doi.org/10.1016/J.ABB.2015.10.021>

- Gillaspy, G., Ben-David, H., y Gruissem', W. (1993). Fruits: A Developmental Perspective. *The Plant Cell*, 5, 1439–1451. <https://academic.oup.com/plcell/article/5/10/1439/5984648>
- González-García, Y., Escobar-Hernández, D. I., Benavides-Mendoza, A., Morales-Díaz, A. B., Olivares-Sáenz, E., y Juárez-Maldonado, A. (2023). UV-A Radiation Stimulates Tolerance against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in Tomato Plants. *Horticulturae*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040499>
- Guil, G. J. L., y Reboloso, F. M. M. (2009). Nutrient composition and antioxidant activity of eight tomato (*Lycopersicon esculentum*) varieties. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(2), 123–129. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2008.10.012>
- Hazewindus, M., Haenen, G. R. M. M., Weseler, A. R., y Bast, A. (2012). The anti-inflammatory effect of lycopene complements the antioxidant action of ascorbic acid and α -tocopherol. *Food Chemistry*, 132(2), 954–958. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.11.075>
- Jenkins, G. I. (2017). Photomorphogenic responses to ultraviolet-B light. *Plant Cell and Environment*. <https://doi.org/10.1111/PCE.12934>
- Kang, S., Zhang, Y., Zhang, Y., Zou, J., Yang, Q., y Li, T. (2018). Ultraviolet-a radiation stimulates growth of indoor cultivated tomato (*Solanum lycopersicum*) seedlings. *HortScience*, 53(10), 1429–1433. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13347-18>
- Lee, M. J., Son, J. E., y Oh, M. M. (2014). Growth and phenolic compounds of *Lactuca sativa* L. grown in a closed-type plant production system with UV-A, -B, or -C lamp. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(2), 197–204. <https://doi.org/10.1002/JSFA.6227>
- Luna, G. M. L., y Delgado, A. A. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista de Investigación y Difusión Científica Agropecuaria. Avances En La Investigación Agropecuaria*. <http://ww.ucol.mx/revaia/pdf/2014/enero/5.pdf>

- Maharaj, R., Arul, J., y Nadeau, P. (2010). UV-C irradiation of tomato and its effects on color and pigments. *Advances in Environmental Biology*, 308–316. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONEysw=wyissn=19950756yv=2.1yit=ryid=GALE%7CA239462957ysid=googleScholarlylinkaccess=fulltext>
- Mariz, P. N., Martins, S., Gonçalves, A., Correia, C. M., Ribeiro, C., Dias, M. C., y Santos, C. (2019). The potential use of the UV-A and UV-B to improve tomato quality and preference for consumers. *Scientia Horticulturae*, 246, 777–784. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.11.058>
- Murthy, R. K., Ravi, K., Balaiya, S., Brar, V. S., y Chalam, K. V. (2014). Lutein protects retinal pigment epithelium from cytotoxic oxidative stress. *Http://Dx.Doi.Org/10.3109/15569527.2013.812108*, 33(2), 132–137. <https://doi.org/10.3109/15569527.2013.812108>
- Nagata, M. y Yamashita, I. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *Nippon Shokuhin kogyo Gakkaishi*, 39(10), 925–928.
- Nagappan, A., Park, K. II, Park, H. S., Kim, J. A., Hong, G. E., Kang, S. R., Lee, D. H., Kim, E. H., Lee, W. S., Won, C. K., y Kim, G. S. (2012). Vitamin C induces apoptosis in AGS cells by down-regulation of 14–3–3 σ via a mitochondrial dependent pathway. *Food Chemistry*, 135(3), 1920–1928. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.06.050>
- Navarro, G. I., García-Valverde, V., García-Alonso, J., y Periago, M. J. (2011). Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fiber. *Food Research International*, 44(5), 1528–1535. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2011.04.005>
- Navarro, G. I., y Periago, M. J. (2016). El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional? *Spanish Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 20(4), 323–335. <https://doi.org/10.14306/renhyd.20.4.208>
- Nawkar, G. M., Maibam, P., Park, J. H., Sahi, V. P., Lee, S. Y., y Kang, C. H. (2013). UV-induced cell death in plants. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 14, Issue 1, pp. 1608–1628). <https://doi.org/10.3390/ijms14011608>

- Neugart, S., y Schreiner, M. (2018). UVB and UVA as eustressors in horticultural and agricultural crops. *Scientia Horticulturae*, 234, 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.021>
- Nour, V., Panaite, T. D., Ropota, M., Turcu, R., Trandafir, I., y Corbu, A. R. (2018). Nutritional and bioactive compounds in dried tomato processing waste. *CYTA - Journal of Food*, 16(1), 222–229. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1383514>
- Palma, C. F. F., Castro-Alves, V., Morales, L. O., Rosenqvist, E., Ottosen, C. O., y Strid, Å. (2021). Spectral Composition of Light Affects Sensitivity to UV-B and Photoinhibition in Cucumber. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610011>
- Panjai, L., Noga, G., Fiebig, A., y Hunsche, M. (2017). Effects of continuous red light and short daily UV exposure during postharvest on carotenoid concentration and antioxidant capacity in stored tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 226, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.035>
- Perea, D. X. P., Hernández, G. L. Z., Olivas, O. H. R., Espinosa, A. L. G., Valdez, M. M., y Medina, G. S. (2018). Caracterización de compuestos fenólicos libres, conjugados y ligados de tomate (*Solanum lycopersicum*) y de un subproducto industrial de tomate y evaluación de su bioactividad. *Journal of Food Science and Technology*, 55(9), 3453–3461. <https://doi.org/10.1007/S13197-018-3269-9>
- Perveen, R., Suleria, H. A. R., Anjum, F. M., Butt, M. S., Pasha, I., y Ahmad, S. (2015a). Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition, and Allied Health Claims—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(7), 919–929. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.657809>
- Perveen, R., Suleria, H. A. R., Anjum, F. M., Butt, M. S., Pasha, I., y Ahmad, S. (2015b). Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition, and Allied Health Claims—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(7), 919–929. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.657809>

- Pesaresi, P., Mizzotti, C., Colombo, M., y Masiero, S. (2014). Genetic regulation and structural changes during tomato fruit development and ripening. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 5, Issue APR). Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00124>
- Pisoschi, A. M., y Pop, A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 97, 55–74. <https://doi.org/10.1016/J.EJMECH.2015.04.040>
- Qian, M., Rosenqvist, E., Flygare, A. M., Kalbina, I., Teng, Y., Jansen, M. A. K., y Strid, Å. (2020). UV-A light induces a robust and dwarfed phenotype in cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) without affecting fruit yield. *Scientia Horticulturae*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109110>
- Rai, N., Morales, L. O., y Aphalo, P. J. (2021). Perception of solar UV radiation by plants: photoreceptors and mechanisms. *Plant Physiology*, 186(3), 1382–1396. <https://doi.org/10.1093/PLPHYS/KIAB162>
- Rančić, D., Quarrie, S. P., y Pećinar, I. (2010). *Anatomy of tomato fruit and fruit pedicel during fruit development*.
- Rivera, P. D. M., Béjar, A. A. G., Martínez, T. M. Á., Rivera, D. M., y González, A. G. A. (2007). Efectos bioquímicos postcosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), 361–372. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61030403>
- Salehi, B., Sharifi-Rad, R., Sharopov, F., Namiesnik, J., Roointan, A., Kamle, M., Kumar, P., Martins, N., y Sharifi-Rad, J. (2019). Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health: An overview. In *Nutrition* (Vol. 62, pp. 201–208). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.01.012>
- SIAP. (2022). Panorama Agroalimentario 2022. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>

- Wang, Q., y Lin, C. (2020). Mechanisms of Cryptochrome-Mediated Photoresponses in Plants. *Https://Doi.Org/10.1146/Annurev-Arplant-050718-100300*, 71, 103–129. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-050718-100300>
- Wang, X., Wang, Q., Han, Y. J., Liu, Q., Gu, L., Yang, Z., Su, J., Liu, B., Zuo, Z., He, W., Wang, J., Liu, B., Matsui, M., Kim, J. II, Oka, Y., y Lin, C. (2017). A CRY–BIC negative-feedback circuitry regulating blue light sensitivity of Arabidopsis. *The Plant Journal*, 92(3), 426–436. <https://doi.org/10.1111/TPJ.13664>
- Zhang, L., Allen, L. H., Vaughan, M. M., Hauser, B. A., y Boote, K. J. (2014). Solar ultraviolet radiation exclusion increases soybean internode lengths and plant height. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.011>
- Zhang, Z. Z., Che, X. N., Pan, Q. H., Li, X. X., y Duan, C. Q. (2013). Transcriptional activation of flavan-3-ols biosynthesis in grape berries by UV irradiation depending on developmental stage. *Plant Science*, 208, 64–74. <https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2013.03.013>