

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



IMPACTOS DE LA ILUMINACIÓN CON LEDs EN EL CRECIMIENTO,
CALIDAD DE FRUTO Y COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN PLANTAS DE
TOMATE Y PEPINO

Tesis

Que presenta DIEGO IVÁN ESCOBAR HERNÁNDEZ

Como requisito para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Junio, 2023

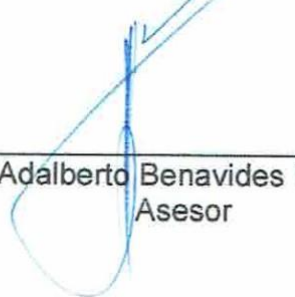
IMPACTOS DE LA ILUMINACIÓN CON LEDs EN EL CRECIMIENTO,
CALIDAD DE FRUTO Y COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN PLANTAS DE
TOMATE Y PEPINO

Tesis


Elaborada por DIEGO IVÁN ESCOBAR HERNÁNDEZ como requisito parcial
para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión
y aprobación del Comité de Asesoría.




Dr. Antonio Juárez Maldonado
Director de Tesis




Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por su calidad docente, sus instalaciones y servicios prestados en el transcurso de mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado mediante su programa de becas de postgrado.

Al programa de Maestría en Ciencias en Horticultura.

A Industrias Sola Basic S.A. de C.V. por las lámparas LED proporcionadas para llevar a cabo esta investigación.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado por su asesoría, tiempo y apoyo brindado para la realización de esta investigación.

A la Dra. Yolanda González García por su asesoría, tiempo y consejos brindados al realizar esta investigación.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por su asesoría y apoyo para para la realización de esta investigación.

Al Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente por su asesoría y apoyo para para la realización de esta investigación.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel por su asesoría y apoyo para para la realización de esta investigación.

Al M.C. Carlos Alberto Garza Alonso, por su apoyo y consejos brindados para realizar esta investigación.

Al grupo técnico y personas que se involucraron de Industrias Sola Basic, por la asesoría y apoyo recibido durante este lapso de tiempo.

DEDICATORIAS

A la vida, mis padres, hermanos y a todas las personas que me han apoyado y creído en mí.

Índice General

Índice General.....	v
Índice de Figuras	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	4
HIPÓTESIS.....	4
Objetivos específicos.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
Radiación solar.....	5
¿Qué es la luz?	6
Las plantas y la interacción con la luz	6
Pigmentos vegetales	7
Fotosíntesis	7
Fotorreceptores vegetales.....	8
Fitocromos.....	9
Criptocromos	10
Fototropina	10
UVR8.....	11
Diodos Emisores de Luz.....	11
Fábricas de plantas	12
LED rojo.....	13
LED azul.....	13
LED UV.....	13

Los LED y su relación con la biosíntesis de compuestos antioxidantes	14
Impacto de las LEDs en los parámetros agronómicos.....	14
Impacto de las LEDs en la síntesis de antioxidantes.....	15
Impacto de las LEDs en el proceso fotosintético	16
Impacto de las LEDs en la calidad de fruto	17
Importancia del cultivo del tomate	18
Importancia del cultivo del pepino	18
MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
Establecimiento del experimento	19
Aplicación de tratamientos de iluminación.....	19
Análisis de parámetros agronómicos.....	20
Recolección de hojas y frutos para análisis.....	20
Análisis bioquímicos	20
Pigmentos fotosintéticos.....	20
Compuestos fenólicos	21
Flavonoides	21
Ácido ascórbico	22
Variables fisiológicas	22
Análisis de calidad de fruto.....	22
Análisis estadístico	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	42

Índice de Figuras

Figura 1. Efecto de la iluminación LED en el crecimiento de las plantas de tomate.	24
Figura 2. Efecto de la iluminación LED en el crecimiento de las plantas de pepino	25
Figura 3. Efecto de la iluminación LED en el contenido de clorofilas y compuestos antioxidantes en hojas de tomate.	28
Figura 4. Efecto de la iluminación LED en compuestos antioxidantes de frutos de tomate.	29
Figura 5. Efecto de la iluminación LED en el contenido de clorofilas y compuestos antioxidantes de hojas de pepino.	31
Figura 6. Efecto de la iluminación LED en compuestos antioxidantes en frutos de pepino.	32
Figura 7. Efecto de la iluminación LED en la Pn, Tr, Ci, Gs y WUE de las plantas de tomate.	35
Figura 8. Efecto de la iluminación LED en la Pn, Tr, Ci, Gs y WUE de las plantas de pepino.	37

RESUMEN

IMPACTO DE LA ILUMINACIÓN CON LEDs EN EL CRECIMIENTO, CALIDAD DE FRUTO Y COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN PLANTAS DE TOMATE Y PEPINO

Por

DIEGO IVÁN ESCOBAR HERNÁNDEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ANTONIO JUAREZ MALDONADO – ASESOR

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

La luz tiene un impacto positivo en la regulación de los procesos de desarrollo de las plantas. Sin embargo, la evidencia sugiere que las respuestas a los cambios en el espectro de luz dependen de las especies de plantas. En este experimento, las plantas de tomate y pepino se cultivaron en condiciones de luz natural con luz LED suplementaria de 7:00 p.m. a 12:00 a.m. Se utilizaron lámparas LED con luz azul (B), luz roja (R) y luz roja lejana (FR), con intensidades máximas en longitudes de onda de B (455 nm), R (660 nm) y FR (730 nm). Los tratamientos fueron luz azul sobre el dosel (B), luz azul sobre el dosel y envés (B2), los mismo para la luz roja (R), (R2) y luz rojo lejano (FR), (FR2), más un control (T0), al que no se irradió luz suplementaria. Hubo un impacto en la altura del tomate, se incrementaron los pigmentos fotosintéticos en hojas de tomate (18.4 – 29.1 %), licopeno en hojas (166.7 – 207.4 %) y frutos de pepino (83.2 – 175.5 %) y compuestos carotenoides en frutos de tomate (106.9 – 127.5%), también se modificaron los atributos de calidad de la fruto como SST, pH y CE. En conclusión los resultados mostraron que la suplementación de luz induce estimulación mejorando la calidad y la actividad antioxidante de los frutos de tomate y pepino.

Palabras clave: Antioxidantes, Carotenoides, Estimulación, Lámparas LED, Pigmentos fotosintéticos.

ABSTRACT

IMPACTO DE LA ILUMINACIÓN CON LEDs EN EL CRECIMIENTO, CALIDAD DE FRUTO Y COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN PLANTAS DE TOMATE Y PEPINO

Por

DIEGO IVÁN ESCOBAR HERNÁNDEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ANTONIO JUAREZ MALDONADO – ASESOR

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

Light has a positive impact on the regulation of plant development processes. However, evidence suggests that responses to changes in the light spectrum depend on plant species. In this experiment, tomato and cucumber plants were grown in natural light conditions with supplemental LED light from 7:00 p.m. to 12:00 a.m. LED lamps with blue light (B), red light (R) and far-red light (RF) were used, with maximum intensities at wavelengths of B (455 nm), R (660 nm) and RF (730 nm). The treatments were blue light on the canopy (B), blue light on the canopy and underside (B2), the same for red light (R), (R2) and far-red light (FR), (FR2), plus a control (T0), to which no supplementary light was irradiated. There was an impact on tomato height, photosynthetic pigments in tomato leaves (18.4 - 29.1 %), lycopene in cucumber leaves and fruits (166.7 - 207.4 %), (83.2 - 175.5 %) and carotenoid compounds in fruits increased. of tomato (106.9 - 127.5 %), the quality attributes of the fruit such as SST, pH and EC were also modified. In conclusion, the results showed that light supplementation induces stimulation, improving the quality and antioxidant activity of tomato and cucumber fruits.

Key words: Antioxidants, Carotenoids, LED lamps, Photosynthetic pigments, Stimulation.

INTRODUCCIÓN

El uso de diodos emisores de luz (LED) en la agricultura ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, proporcionando una forma nueva e innovadora de cultivar debido a su eficiencia energética, durabilidad y flexibilidad en la composición espectral (Bantis *et al.*, 2018). La luz es una forma de radiación electromagnética que incluye diferentes longitudes de onda (perceptibles e imperceptibles). El espectro de luz visible para el ojo humano se encuentra en un rango aproximado de 380 a 700 nm. Esta luz es crucial para las plantas ya que coincide con la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR 400-700 nm) (Dou y Niu, 2019).

Las plantas se adaptan al monitorear las señales de la luz ambiental, lo que les permite regular las vías de señalización con precisión. Los cambios en el ambiente de la luz se sincronizan con otras señales ambientales, como la temperatura, estrés biótico y fluctuaciones estacionales, mientras que las vías de señalización de la luz se relacionan con otras vías que regulan la fisiología y el desarrollo de las plantas (Paik y Huq, 2019). Las plantas perciben la luz como fuente de energía para la fotosíntesis y como una señal que puede provocar diversas respuestas fisiológicas (Paponov *et al.*, 2020). Las estructuras a través de las cuales se perciben las señales de la luz ambiental son los cloroplastos y los fotorreceptores (Roeber *et al.*, 2021). Los cloroplastos contienen dos tipos de pigmentos llamados clorofilas y carotenoides, que absorben la luz para el proceso de la fotosíntesis. Las clorofilas, son los pigmentos que predominan en las plantas y absorben la luz roja y azul, mientras que, los carotenoides son pigmentos accesorios y absorben fuertemente la luz azul, permitiendo que el cloroplasto coseche una mayor cantidad de energía (Yamori, 2019). Por otra parte, la función de la luz como una señal interactúa en la fisiología de la planta como el crecimiento, altera el periodo de floración e impacta en las características morfogénicas como altura y forma (Fukuda, 2019).

Los fotorreceptores, son cromoproteínas que absorben longitudes de onda específicas (250 a 750 nm) y las traducen en señales que controlan los procesos biológicos, y son fundamentales para controlar la fotomorfogénesis (Oka y

Yamamoto, 2018). Hay dos categorías de fotorreceptores en las plantas: las clorofilas (a y b) y carotenoides que cosechan luz para la fotosíntesis y los receptores fotosensibles fitocromos, criptocromos, fototropinas, que regulan las respuestas de luz no fotosintéticas (Dou y Niu, 2019). Las plantas superiores utilizan fitocromos (PHY) que absorben luz roja lejana/roja, luz azul/UV-A, incluidos criptocromo (CRY), fototropina (PHOT) y otros, y LOCUS 8 DE RESISTENCIA UV (UVR8) que absorbe UV-B (Oka y Yamamoto, 2018). Sin embargo, aún no se ha encontrado un fotorreceptor específico para la radiación UV-C, ya que esta, es bloqueada por la capa de ozono, pero se cree que las fototropinas y UVR8, son los fotorreceptores encargados de percibir esta radiación (Badmus *et al.*, 2022).

El estímulo lumínico puede alterar la concentración de fitohormonas y provocar modificaciones morfológicas, además de que las señales de los fotorreceptores pueden gestionar la expresión génica y producir efectos sincrónicos en metabolitos y fitohormonas en el fenotipo de la planta (Fukuda, 2019). Actualmente se ha demostrado que la suplementación de luz puede mejorar el crecimiento y el rendimiento de las plantas. Liang *et al.* (2021) encontraron que la iluminación de 16 h con longitudes de onda roja (663 nm) y azul (454 nm) aumentó el crecimiento de plántulas de tomate y pepino, además de inducir una mayor producción de biomasa. Las plantas se cultivaron bajo un rango de porcentaje de luz azul (B): 0B, 25B, 50B, 75B y 100B, el porcentaje restante fue luz roja (R). Los autores sugieren que estos efectos dependen de la calidad y cantidad de luz que se les da a las plantas. Por otra parte, la luz también puede afectar la calidad nutricional y sensorial de las frutas y verduras, que está determinada por una variedad de factores, como el color, el sabor, la textura y la composición de nutrientes (Hasan *et al.*, 2017). Particularmente el incremento en el contenido de nutrientes y compuestos bioactivos es beneficioso para la salud humana debido al valor nutritivo y a sus propiedades antioxidantes.

Algunos estudios han reportado que la iluminación suplementaria, puede afectar la pigmentación de los tomates, e inducir la síntesis de licopeno, el principal pigmento carotenoide de estos frutos, y uno de los antioxidantes más potentes

que se conocen. Por ejemplo, Dannehl *et al.* (2021) demostraron que la iluminación con LEDs en longitudes de onda roja (660 nm) y azul (430 nm) durante un fotoperiodo de 12 h, incrementó el contenido de licopeno en frutos de tomate en 18 %. La adición de luz R + roja lejano (FR) (600-800 nm) a través de LEDs mejoró los parámetros de la calidad del fruto del tomate, como los sólidos solubles totales (SST), la acidez titulable (AT) y el pH, además de características sensoriales, como aroma, dulzura, acidez y textura (Kim *et al.*, 2020). También se ha reportado que la iluminación debajo del dosel con tratamientos de combinación R (666 nm) y B (462 nm) en plantas de tomate dio como resultado un mayor rendimiento (+24 %), y aceleró la maduración de los frutos (Paucek *et al.*, 2020). Algunos autores proponen que el uso de LEDs 87.5 % R (660 nm) y 12.5 % B (440 - 460 nm) pueden aumentar los rendimientos en el cultivo del pepino, al aumentar la producción de clorofilas en las hojas y el intercambio gaseoso en plantas (Gajc-wolska *et al.*, 2021).

La suplementación con iluminación LED ha demostrado tener diferentes efectos en varios cultivos, diferentes etapas fenológicas, así como en la calidad postcosecha. Por ejemplo, en plántulas de sandía al aplicar una combinación de luz 12 % R (661 nm), B 83 % (450 nm) y 5 % FR (725 nm), durante la curación de plántulas injertadas, se promovió el crecimiento, floración y precocidad (Bantis *et al.*, 2022). En el cultivo de la fresa la adición de luz R (665 nm) y B (455 nm) a través de LED en período fuera de temporada mejoró los parámetros agronómicos en las bayas (peso de fruto, sólidos solubles totales y rendimiento), al igual que el crecimiento vegetativo (área foliar y número de coronas) (Stuemky y Uchanski, 2020). En las plantas medicinal salvia roja (*Salvia miltiorrhiza*) se promovió el crecimiento y producción de compuestos fenólicos bajo una relación adecuada de luz 30 % R (635 nm) y 70 % B (460 nm) (Zhang *et al.*, 2020). En coles de Bruselas (*Brassica oleracea*) después de cosecharse se mantuvieron bajo tratamientos de luz azul (458 nm) y blanco (467 nm) a través de LEDs, obteniendo una menor respiración, manteniéndose más verdes visualmente y con una mayor cantidad de clorofilas en comparación al control (Hasperué *et al.*, 2016). Estos resultados demuestran que la suplementación de la luz a través de

LEDs con diferentes longitudes de onda puede mejorar las características agronómicas y bioquímicas de los cultivos.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el impacto estimulante de diferentes tipos de luz LED en el crecimiento calidad de fruto y acumulación de biocompuestos en plantas de tomate y pepino.

Objetivos específicos

1. Analizar los cambios en el sistema antioxidante.
2. Determinar los cambios en los parámetros fisiológicos.
3. Determinar el contenido de compuestos bioactivos en los frutos.

HIPÓTESIS

La aplicación de luz LED en tres longitudes de onda (azul, rojo y rojo lejano) induce respuestas que mejoran el crecimiento, desarrollo y calidad en los cultivos de tomate y pepino.

REVISIÓN DE LITERATURA

Radiación solar

La radiación que incide en la superficie de la tierra (de onda corta y larga), es la fuente de energía que influye en procesos críticos como el calentamiento superficial y atmosférico, la evaporación, la sublimación, la transpiración y la fotosíntesis. El sol emite radiación de onda corta (aproximadamente 280 a 4000 nm), mientras que las moléculas en la atmosfera y partículas en la superficie emiten radiación de onda larga (aproximadamente 4000 a 100,000 nm) (Blonquist y Bugbee, 2018). La radiación total (280 – 2800 nm), el 97 % se encuentra en este rango, de esta, el 43 % es radiación PAR (útil para las plantas), el 4 % es radiación ultravioleta y el 53 % es radiación infrarroja (radiación térmica). Del total de la radiación, no toda impacta en la superficie de la tierra (Dou y Niu, 2019; Greer *et al.*, 2017). Por otra parte, la radiación de onda larga es el resultado del calentamiento atmosférico, siendo la principal fuente de energía en la superficie terrestre, que impacta en el clima (Blonquist y Bugbee, 2018).

La radiación solar se clasifica en: radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada. La radiación directa llega del sol a la superficie terrestre, la difusa por otro lado, abarca la radiación solar que es reflejada o dispersada por la atmosfera, las nubes, el polvo, las montañas, los árboles, los edificios, y la superficie terrestre, la radiación reflejada es la parte de la radiación solar que se refleja en las superficies además de las partículas atmosféricas (Singh *et al.*, 2020). En la atmosfera los gases atenúan la radiación de manera selectiva, el CO₂ y el vapor de agua absorben cantidades considerables de energía infrarroja (alrededor de 850 a 1300 nm), y el ozono junto con el vapor de agua son responsables de la disminución de la radiación ultravioleta por debajo de los 300 nm (Greer *et al.*, 2017). La radiación se puede capturar y convertir en formas útiles de energía, como calor y electricidad, utilizando una variedad de tecnologías y materiales (Singh *et al.*, 2020).

¿Qué es la luz?

La luz es un tipo de radiación electromagnética que viaja a través del espacio, es visible para el ojo humano y posee dos características; se observa como un fenómeno ondulatorio o actúa como partículas discretas llamadas fotones (partículas más pequeñas de luz) (Dou y Niu, 2019). La unidad para describir la intensidad de luz en las plantas, es moles por metro cuadrado por segundo ($\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$) y para la percepción de la luz por el ojo humano se utiliza la unidad de lux (lúmen por metro cuadrado). Cuando el ojo percibe unidades altas de lux (luz más brillante para el humano), significa una alta intensidad de luz para las plantas (Lu, 2021). La luz tiene una longitud de onda y una frecuencia, lo que determina su color e intensidad y puede ser producida por fuentes naturales, como el sol y otras estrellas, o por fuentes artificiales, como bombillas y láseres (Dou y Niu, 2019).

Las plantas y la interacción con la luz

Es importante recalcar, al igual que en el mundo natural, las condiciones de iluminación son muy dinámicas y cambian constantemente, las plantas detectan y responden a la luz roja lejana, roja, azul y UV simultáneamente, permitiendo el equilibrio entre crecimiento, rendimiento y producción de compuestos con propiedades antioxidantes (Loi *et al.*, 2021). Los cuatro componentes de la luz (calidad, intensidad, dirección y tiempo de exposición) afectan en gran medida la fotosíntesis de la planta y los parámetros; morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de la planta (fotosíntesis, la respiración y la influencia de la transpiración en la absorción de agua y nutrientes) (Swami, 2020; Shafiq *et al.*, 2021). En el primer escenario, la energía radiante se transforma en energía química y se almacena como biomasa, en el segundo escenario, pequeñas cantidades de energía radiante desencadenan modificaciones en la expresión génica y las respuestas de desarrollo posteriores. En ambas categorías involucran sistemas de pigmentos que transducen la energía solar en estructuras químicas organizadas con precisión: sistemas biosintéticos en la fotosíntesis y sistemas desencadenantes en la fotomorfogénesis (Greer *et al.*, 2017).

Pigmentos vegetales

Los pigmentos son compuestos químicos que absorben la luz en el rango de longitud de onda del espectro visible (PAR). El cromóforo, es la molécula que derivado de su estructura produce el color que percibimos (Fiedor *et al.*, 2019). La clorofila no es el único pigmento natural; también se encuentran los pigmentos accesorios (carotenoides, xantofilas, etc.) y sustancias fenólicas (flavonoides, antocianinas, flavonas y flavonoides), absorben longitudes de onda distintas al rojo y al azul. El color de los pigmentos accesorios son amarillo, rojo y violeta tienen multifunciones; atracción de insectos y pájaros, protección contra el estrés ambiental por alta irradiación (fotoprotectores) (Bures *et al.*, 2018). La clorofila a es el pigmento más abundante en las plantas y sus picos de absorción puntuales en longitudes de onda son 400 nm y 662 nm, la clorofila b absorbe luz en 453 y 642 nm. Además la clorofila a funciona como absorbente de energía en los complejos de captación de luz (CCL) y cofactor de transferencia de electrones en los centros de reacción (CR) (Fiedor *et al.*, 2019). La relación entre la clorofila (Chl) a y Chl b es de 3:1 (Singh *et al.*, 2020). Los pigmentos carotenoides, se encuentran en todos los organismos fotosintéticos, estos absorben la luz entre 460 y 550 nm (Lu, 2021). Los carotenoides comunes en las plantas son α -caroteno, β -caroteno, capsantina, luteína, licopeno, zeaxantina con β -caroteno como el carotenoide más común en el tejido vegetal (Olugbenga y Oluwatoyin, 2021).

Fotosíntesis

La fotosíntesis es el proceso que ocurre en el cloroplasto en las células del mesófilo de las hojas, donde ocurren tres procesos principales: (a) absorción de luz por pigmentos fotosintéticos, (b) transporte de electrones y bioenergética, y (c) fijación y metabolismo de carbono. Para producir carbohidratos (metabolitos primarios) a partir de CO₂, H₂O y elementos inorgánicos o minerales (Yamori, 2019). Las hojas se consideran el órgano principal para la fotosíntesis y la transpiración de las plantas, su estructura refleja cómo los factores ambientales influyen en las plantas o cómo las plantas se adaptan al entorno cambiante (Shafiq *et al.*, 2021). Debido a las estructuras físicas y sus componentes

químicos, las hojas absorben selectivamente longitudes de ondas específicas. La epidermis permite que la luz penetre en el mesófilo (consta de dos capas: parénquima en empalizada y esponjoso). Ambos tipos de células contienen clorofila, que refleja longitudes de onda verdes y absorbe la luz azul y roja para la fotosíntesis. La absorción de clorofila es máxima en las regiones azul (450 nm) y roja (650 nm) (Mavi y Tupper, 2020). Las clorofilas (chl), son pigmentos vegetales que absorben la luz solar y utilizan esta energía para producir carbohidratos, derivado del proceso llamado fotosíntesis (Singh *et al.*, 2020). El proceso fotosintético comienza por la absorción de fotones por los pigmentos vegetales. La eficiencia de la fotosíntesis es muy baja ya que solo del 4-6 % de la energía contenida en la radiación se transforma en biomasa (Bures *et al.*, 2018).

Fotorreceptores vegetales

La percepción del estímulo lumínico comienza en los fotorreceptores que son proteínas especializadas que perciben longitudes de onda del espectro electromagnético desde 250 a 750 nm (Loi *et al.*, 2021). Los fotorreceptores, al percibir la longitud de onda designada, traducen en señales que controlan los procesos biológicos y son fundamentales para controlar la fotomorfogénesis (Oka y Yamamoto, 2018). Hay dos categorías de fotorreceptores en las plantas: pigmentos fotosintéticos que cosechan luz para la fotosíntesis y receptores fotosensibles, estos median respuestas de luz no fotosintéticas (Dou y Niu, 2019). Las plantas superiores utilizan fitocromo (PHY) que absorbe fotorreceptores de luz roja lejana/roja, luz azul/UV-A, incluidos criptocromo (CRY), fototropina (PHOT) y otros, y LOCUS 8 DE RESISTENCIA UV (UVR8) que absorbe UV-B (Oka y Yamamoto, 2018). El estímulo lumínico puede alterar la concentración de fitohormonas y provocar modificaciones morfogénicas. Las señales de los fotorreceptores pueden gestionar la expresión génica y producir efectos sincrónicos en metabolitos y fitohormonas en el fenotipo de la planta (Fukuda, 2019).

Fitocromos

Los fitocromos (PHY) absorben luz roja y roja lejana, tienen dos isoformas espectralmente distintas, Pr absorbe luz roja y Pfr absorbe luz roja lejana, existe una fotorreversibilidad entre ellos. Los PHY se activan por la conversión inducida por la luz roja de Pr a Pfr, pero a la inversa, se inactivan por la transformación inducida por la luz roja lejana de Pfr a Pr. (Oka y Yamamoto, 2018). En plantas superiores, los fitocromos se expresan mediante grupos de genes; por ejemplo, en las plantas dicotiledóneas como *Arabidopsis thaliana* L. contienen cinco tipos, denominados fitocromo A (phyA) a fitocromo E (phyE), por otro lado, las plantas monocotiledóneas como *Oriza sativa* L. tiene tres tipos (phyA a phyC) (Sun *et al.*, 2017). La vía de comunicación para el progreso fotomorfogénico influenciado por los fitocromos se divide en cuatro segmentos. Primero implica la absorción de luz y transformaciones estructurales, en segundo abarca la interacción de los fitocromos con varios elementos y el inicio de la señalización, la tercer parte regulación de la señalización a través de la degradación de proteínas represoras mediadas por las células proteasoma ubiquitina/26S y la integración de señales. La última parte implica la expresión de genes sensibles a la luz (Tripathi *et al.*, 2019). La fotorreversibilidad roja/roja lejana se refiere a las respuestas mediadas por fitocromos que se pueden revertir para regular la germinación de semillas, la respuesta de evitación de la sombra y la floración. Por ejemplo, si la luz roja desencadena una respuesta al convertir los fitocromos en su forma biológicamente activa, la forma absorbente de rojo lejano (PFR), la exposición inmediata a la luz roja lejana puede, ¿en algunos casos?, contrarrestar la respuesta invirtiendo PFR volver a la forma inactiva absorbente de rojo (PR) (Nicholsa, 2017). Los fitocromos son importantes en inducción de floración y desarrollo de semillas. También regulan el alargamiento del tallo, la expansión de las hojas y un fenómeno conocido como “síndrome de evitación de sombra”. Tales respuestas están mediadas por la proporción de luz roja y roja lejana, que afecta el estado fotoestacionario de la molécula del fitocromo (Bures *et al.*, 2018).

Criptocromos

Los pigmentos criptocromos, afectan el desarrollo de las plantas y las funciones fisiológicas, absorben las bandas de ondas ultravioleta y azul, como las de 365, 400, 450 y 470 nm. Además las bandas de ondas verdes (540 nm) (Nicholsa, 2017). Los criptocromos (CRY) son receptores de luz azul que controlan el crecimiento y desarrollo de las plantas. La vegetación terrestre posee varios números de criptocromos, CRY1 y CRY2 que, desempeñan funciones complementarias y parcialmente repetitivas en diversas especies de plantas (Wang *et al.*, 2018). Los CRY son un tipo de flavoproteína que se activan exponiéndose a la luz azul o UV-A. Cuando son activados por la luz, se denominan CRY fotoactivados. Pero cuando se exponen a la luz verde, se inactivan parcialmente. Todavía no hay acuerdo entre los expertos sobre si esta inactivación parcial puede revertirse con la luz (Oka y Yamamoto, 2018). CRY tienen relación con las respuestas morfológicas, como inhibición de la elongación del tallo, expansión de cotiledones, síntesis de antocianinas y floración fotoperiódica (Bures *et al.*, 2018). Sorprendentemente, las respuestas fisiológicas mediadas por CRY se superponen en gran medida a las mediadas por PHY, aunque CRY y PHY actúan bajo diferentes longitudes de onda de luz. Dos CRY, CRY1 y CRY2, regulan parcialmente las respuestas fisiológicas superpuestas bajo luz azul en *Arabidopsis* (Oka y Yamamoto, 2018).

Fototropina

Las fototropinas (PHOTs) son quinasas activadas por la luz, resultan críticas para la fisiología de las plantas, regulan principalmente el crecimiento y competencia fotosintética de las plantas (Hart y Gardner, 2021). Los PHOT son responsables de controlar varias respuestas de las plantas a la luz azul/UV-A (absorción máxima a 370 y 450 nm) y las proteínas Zeitlupe (ZTL) como el fototropismo, la apertura de los estomas, el movimiento de los cloroplastos y la forma de las hojas (Christie *et al.*, 2015; Huché-Thélier *et al.*, 2016).

UVR8

UV RESISTANCE LOCUS 8 (UVR8) es un fotorreceptor que regula la fotomorfogénesis UV-B en las plantas. Al percibir los fotones UV-B se induce la disociación del homodímero UVR8 en monómero, se revierte a homodímero después de UV-B, y se forma un fotociclo completo. El monómero UVR8 interactúa con la proteína CONSTITUTIVAMENTE FOTOMORFOGÉNICO 1 (COP1) para iniciar la señalización UV-B (Dong *et al.*, 2021). Por otra parte la proteína UVR8 no solo media la recepción de UV-B y la transducción de señales, sino que también promueve la expresión de genes asociados con la defensa, incluidos los genes involucrados en la biosíntesis de flavonoides (Qian *et al.*, 2020).

Diodos Emisores de Luz

Un LED es un diodo semiconductor de estado sólido que permite el flujo de corriente unidireccional desde el ánodo al cátodo dentro de un rango de voltaje específico (construido por materiales de tipo p y tipo n) (Loi *et al.*, 2021). La aplicación de un voltaje directo al diodo permite mover los agujeros, que llevan la carga eléctrica positiva en el lado del material tipo p, los electrones que llevan carga eléctrica negativa en el lado del material tipo n, se muevan hacia el otro lado, permitiendo que los huecos y electrones se combinen, formando fotones y emite luz como resultado de este proceso (Fujiwara, 2020). La efectividad de un LED de banda de onda determinada depende en gran medida de la salida de longitud de onda pico (típicamente 1 nm), donde reside la gran mayoría de la energía fotónica. Por lo tanto, la eficacia de un LED dado para impulsar o regular una fotorrespuesta de una planta dada generalmente se define por su salida de energía máxima y su Densidad de Flujo de Fotones (DFF) (Mitchell y Sheibani, 2019). La iluminación LED no solo ahorra más energía en comparación con la iluminación tradicional, sino que también permite un rendimiento y regulación superiores, lo que permite que la luz se use tanto como una señal para respuestas fisiológicas específicas en humanos y plantas, como una fuente eficiente de energía para las plantas (Pattison *et al.*, 2018). Los LED tienen la capacidad de administrar la intensidad de la luz y la salida espectral, además de

encender y apagar rápida y automáticamente, también se integran a los circuitos electrónicos y se reducen los gastos de operación con su vida útil prolongada y su baja emisión de calor radiante, lo que les permite funcionar muy cerca de los tejidos de las plantas haciendo un uso eficiente de la energía (Nicholsa, 2017). Además los LED tienen una gran ventaja sobre las lámparas tradicionales ya que ofrecen entornos específicos de luz, además pueden producir una gama de flujos radiantes espectrales al emplear múltiples LED con diferentes longitudes de onda (Fujiwara, 2020). En consecuencia, las ventajas más significativas de la iluminación LED son la reducción del consumo de electricidad, la disminución de los costos de propiedad y la mejora de la calidad de la iluminación (Pattison *et al.*, 2018).

Fábricas de plantas

Según Zheng, (2018). La fábrica de plantas es actualmente la técnica más sofisticada en el ámbito del cultivo de plantas. Las plantas cultivadas en estas fábricas no están sujetas a condiciones naturales, su modo y concepto de producción van más allá del significado tradicional de producción agrícola. Se prevé que solo en los Estados Unidos, los LED penetrarán alrededor del 86 % de las instalaciones de iluminación eléctrica para 2035, reducirán el consumo de electricidad para iluminación en alrededor de un 75 % y ahorrarán aproximadamente 5.1 billones de unidades térmicas británicas (5.1 quads) por año (alrededor de US\$52 mil millones por año) en el costo directo de la energía (Pattison *et al.*, 2018). Hay dos enfoques de iluminación para el crecimiento de las plantas durante el fotoperíodo: "real" o "aparente". El enfoque más utilizado es la iluminación "verdaderamente" continua, que emite luz de forma continua "en sentido estricto" durante todo el fotoperíodo. El segundo enfoque es la iluminación intermitente, donde la luz se emite periódicamente en un ciclo corto (Fujiwara, 2020). Aunque los LED generan calor, lo hacen de manera diferente a las lámparas que se usan actualmente. Mientras que las lámparas incandescentes y de descarga de alta intensidad, pierden calor principalmente a través del calor radiante y las lámparas FL pierden calor a través de la radiación

y la convección, los LED pierden calor principalmente a través de la conducción (Nicholsa, 2017).

LED rojo

De los tres principales componentes de banda de onda del espectro PAR, los fotones rojos tienen el contenido de energía intrínseco más bajo (176 kJ mol^{-1}). La luz roja de banda ancha (600-700 nm), es la longitud de onda para el crecimiento de las plantas de cultivos en interiores. Esta banda de onda ancla a cada conjunto de LED utilizado para promover el crecimiento de las plantas (Mitchell y Sheibani, 2019). Dos de las bandas de ondas rojas más fácilmente disponibles para el crecimiento de las plantas son las de 627 y 660 nm, que tienen espectros ubicados en la proximidad del pico de absorción de clorofila. La luz roja de 660 nm también se corresponde con un pico en la absorción de fitocromos, al igual que la banda de onda de 735 nm (Nicholsa, 2017). Los LED rojos son ideales para obtener una alta eficiencia de emisión debido a dos factores. El primero, la luz roja es la banda de ondas más efectiva en la curva de eficiencia cuántica (convertir los fotones absorbidos en energía). En segundo lugar la luz roja tiene un contenido de fotones bajo en comparación con otras bandas de onda (Mitchell y Sheibani, 2019).

LED azul

Luz azul de banda ancha (400-500 nm) está en el extremo de longitud de onda corta/alta de energía fotónica del espectro PAR (260 kJ mol^{-1}). El azul es aproximadamente un 25 % menos eficiente que el rojo en la curva de eficiencia cuántica para impulsar la fotosíntesis (Mitchell y Sheibani, 2019). También los LED azules muestran mejoras en las características eléctricas y ópticas, como un voltaje reducido de conducción directa, una potencia mayor de salida de luz, alto brillo y mayor eficiencia cuántica interna (ECI) (Manikandan *et al.*, 2019).

LED UV

El diodo emisor de luz ultravioleta (UV-LED) es una fuente UV relativamente nueva, cuenta con características que surgen de la naturaleza de dispositivo semiconductor, una de sus características es la diversidad de longitudes de onda

que no existe en las lámparas UV convencionales basadas en mercurio, esto ofrece oportunidades para combinar selectivamente múltiples longitudes de onda para incrementar su multifunción de los LED UV (Song *et al.*, 2019). La luz ultravioleta ocupa una amplia banda de longitudes de onda en la región no ionizante del espectro electromagnético, entre 200 nm (rayos X) y 400 nm (luz visible), y se divide en tres bandas de onda: UVA (320m-400nm), UVB (280-320 nm) y UVC (100-280nm). La intensidad de la irradiación se expresa en $W m^{-2}$; y la dosis de irradiación depende de los tiempos de tratamiento, la distancia a la fuente y otros parámetros, normalmente se expresa en $J m^{-2}$ (Viršilė *et al.*, 2019).

Los LED y su relación con la biosíntesis de compuestos antioxidantes

Los antioxidantes vegetales son compuestos importantes involucrados en la defensa, señalización, crecimiento y desarrollo de las plantas (Loi *et al.*, 2021). Tras la exposición LED, las plantas sintetizan compuestos bioactivos y antioxidantes, proporcionando información sobre la síntesis de genes de defensa antioxidante para proteger a las células del daño oxidativo (Al Murad *et al.*, 2021). La síntesis de metabolitos secundarios por la inducción de los LED, parece estar relacionado con la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL), involucrada en la vía fenilpropanoide, la regulación positiva de PAL por las luces rojo y azul podrían ser los inductores de una mayor acumulación de metabolitos secundarios en la planta (Hasan *et al.*, 2017). La cantidad y calidad de dichos compuestos está determinada genéticamente. De hecho, la calidad de la luz afecta la salud de la planta, modulando su perfil antioxidante, un elemento clave para contrarrestar los estreses bióticos y abióticos (Loi *et al.*, 2021).

Impacto de las LEDs en los parámetros agronómicos

Rabara *et al.* (2017) en un experimento comparando luz natural ($789 \mu mol m^{-2} s^{-1}$) con los LED R ($237 \mu mol m^{-2} s^{-1}$), W ($21 \mu mol m^{-2} s^{-1}$) y B ($41 \mu mol m^{-2} s^{-1}$). En plantas de alcachofa (*Cynara scolymus* L.), bajo condiciones de invernadero encontraron que R: indujo mayor peso seco y altura de los brotes en comparación con la luz natural. Además W y B: disminuyeron la biomasa en comparación con la luz natural. Park y Runkle. (2017) utilizaron combinaciones de LED B-R y LED

B-R-FR: R128 (128 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de R), R128 + FR16, R128 + FR32, R128 + FR64, R96 + FR32, y R64 + FR64. En geranio (*Pelargonium hortorum* L.), petunia (*Petunia hybrida* Vilm.), boca de dragón (*Antirrhinum majus* L.) e impaciencia (*Impatiens walleriana* Hook.). Hubo una disminución de la altura en todas las especies al aumentar la relación R: FR. Por otra parte, incrementó la asimilación neta de con el aumento de FR, en geranio y boca de dragón. Además, la inclusión de FR durante el crecimiento de las plántulas promovió la floración en la planta boca de dragón de día largo. Jensen *et al.* (2018) utilizaron la luz natural y la suplementaron con RB (80 % R: 657 nm – 20 % B: 447 nm, y 40 % R – 60 % B), RB + UV-A (80 % R – 20 % B + UV-A: 395 nm) y RG (80 % R – 20 % G: 527 nm) en plántulas de albahaca. B: Aumento de la densidad estomática, pero tuvo un efecto negativo sobre la tolerancia al frío y el rendimiento de la vida útil, por otra parte G: tuvo efectos positivos sobre la tolerancia al frío, pero se redujo la densidad estomática. El ácido absísico (ABA) y el glucosiléster de ABA tuvieron una correlación positiva con la densidad estomática. La relación ABAGE/ABA tuvo una correlación negativa con la densidad estomática.

Impacto de las LEDs en la síntesis de antioxidantes

Samuolienė *et al.* (2017) con LEDs FR (731 nm, 2,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), R (660 nm, 170 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), R (638 nm, 130, 105, 80, 55 o 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y 0, 16, 25 y 33 % B (445 nm, 0, 25, 50 o 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en total $300 \pm 3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. En microvegetales de mostaza (*Brassica juncea* L.), remolacha (*Beta vulgaris* L.) y perejil (*Petroselinum crispum* Mill). En mostaza: 16 % B aumentó zeaxantina, luteína, neoxantina, violaxantina y tocoferol, y disminuyó el índice de clorofila. 25 % B aumentó luteína, neoxantina y violaxantina. 33 % B aumentó el α - y β -caroteno, la clorofila b, la clorofila a y el índice de clorofila. Remolacha: 16 % B aumentó α -caroteno, β -caroteno, luteína, neoxantina, violaxantina y tocoferol. 25 % B aumentó la violaxantina. 33 % B aumentó β -caroteno, zeaxantina, luteína, violaxantina, clorofila a, carotenoide y tocoferol. Perejil: 16 % B aumentó luteína, neoxantina, violaxantina y tocoferol, y disminuyó el índice de clorofila. 25 % B aumentó zeaxantina, luteína y neoxantina. 33 % B aumentó β -caroteno, zeaxantina y luteína. Xie *et al.* (2019) utilizaron tratamientos de luz natural

(control); luz B (430 nm); y luz R (660 nm). Con una densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) de $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un período de iluminación de 06:00 a 18:00 h todos los días. Sus resultados mostraron que luz B y R incrementaron la síntesis de licopeno, con un efecto mucho más fuerte con la luz B que la R, también el análisis de la expresión génica mostró que el receptor de luz R PHY y el receptor de luz B CRY mostraron una respuesta similar a la luz B y R. La misma situación se encontró para los genes *HY5* y *PIFs*. Sus resultados sugieren que la luz B y R comparten algunos mecanismos de regulación similares, por lo que la luz B y R aumenta el contenido de licopeno al inducir receptores de luz, que modulan la activación de *HY5* y *PIF* para mediar la expresión de *PSY1*.

Impacto de las LEDs en el proceso fotosintético

Yang *et al.* (2018) utilizaron diferentes combinaciones LED (blanco: W, rojo y azul 1:1: RB, azul: B, púrpura: P y rojo: R) para evaluar el transporte de electrones fotosintéticos en hojas de tomate. Con una intensidad de $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a una distancia de 20–30 cm entre el panel LED y las plantas con un fotoperíodo día-noche de 14:10 h. los resultados obtenidos indicaron que la luz W y RB exhibieron una mayor eficiencia de la operación fotosintética en el tomate, mientras que la irradiación de luz B y P redujo significativamente la eficiencia fotosintética al impactar en la morfología de la planta, dañando la estructura de la membrana tilacoide, reduciendo el contenido de pigmentos fotosintéticos y la tasa de transporte de electrones fotosintéticos. Por otro lado, Miao *et al.* (2019) emplearon cuatro tratamientos, luz blanca (W), luz roja (R, 660 nm), luz azul (B, 440 nm) y una combinación de luz roja y azul (RB) para investigar sus efectos sobre la ultraestructura, la fotosíntesis y la acumulación de nutrientes del cloroplasto en plántulas de pepino. La luz R redujo severamente RGR, Pn, Fv/Fm y Φ_{II} , el número y tamaño de cloroplasto y gránulo de almidón, el espesor de grana, sin embargo, estos parámetros se aliviaron al agregar luz B a la luz R. Las plantas cultivadas bajo luz B exhibieron una ultraestructura de cloroplastos y un rendimiento fotosintético similar al de la luz blanca. Demostrando que el alivio del 'síndrome de la luz roja' es dependiente de la luz azul ya que mejora la ultraestructura del cloroplasto, los rasgos fotosintéticos y la eliminación de la

acumulación excesiva de nutrientes inducida por la luz roja en plántulas de pepino.

Impacto de las LEDs en la calidad de fruto

Li *et al.* (2017) aplicaron diferentes combinaciones de LED R (657 nm), B (457 nm), P (417 nm), W y RB (R: B = 1:1 y R: B =3:1). $300 \pm 3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en plántulas de tomate y reportaron que, R: Aumentó del contenido de fructosa y glucosa, y actividades de invertasa ácida e invertasa neutra. La relación RB 3:1: aumento de la acumulación total de carbohidratos, almidón y sacarosa, actividad de la sacarosa sintasa. Por otra parte combinaciones R y RB: Aumentaron de la altura de la planta y del diámetro del tallo. Sin embargo P: Redujo el crecimiento de plántulas y la Pn, además de las actividades de invertasa ácida e invertasa neutra. Huang *et al.* (2017) utilizaron una relación de LED R (625 nm), G (530 nm), B (460 nm) y W (B+R+G) $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en el hongo ostra (*Lentinus sajor-caju* Fr.), y observaron que B: Aumentó la biomasa seca, incrementó el efecto de eliminación de radicales DPPH, aumento la capacidad de quelación de Fe, el poder reductor y el contenido de azúcar soluble. En un estudio realizado por Kim *et al.* (2020) en producción de tomate fuera de temporada bajo los tratamientos de iluminación por lámparas HPS superiores, LED R intradosel y LED R+FR intradosel y proporcionaron un flujo de fotones fotosintéticos de (PPF, 400–700 nm) de $230 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ para todos los tratamientos de luz y $95,5 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ para FR con fotoperiodo de 16 h (9 a 1 h). Ambas luces LED intradosel aumentaron el rendimiento de la fruto y la biomasa en comparación con las lámparas HPS. También los LED R aumentaron la proporción de materia seca y se mejoraron los sólidos solubles totales (SST), la acidez titulable (AT) y el pH; sin embargo, los LED R+FR tuvieron un impacto más significativo en todos los atributos evaluados que los LED R. De manera similar, los LED R aumentaron el contenido de K, Mg y Ca en la fruto en un 30, 74 y 40 % en comparación con las lámparas HPS, y la adición de FR a los LED R incremento el contenido y la concentración de Na. Concluyendo que los LED R+FR complementarios son indispensables para mejorar la calidad de la fruto de los tomates de invernadero durante la producción fuera de temporada. Ji *et al.* (2020) Estudiaron la adición de FR, aplicando dos

tratamientos de luz: R (666 nm) + B (453 nm) (RB, R: B 95: 5) y RB + 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ FR (735 nm) (RB + FR) bajo un fotoperiodo de 16 h. La radiación FR aumentó la resistencia al hundimiento de la fruto en un 38 %. Concluyendo que la radiación FR estimula la partición de la masa seca en los frutos, principalmente al aumentar la fuerza del hundimiento del fruto a través de la regulación positiva simultánea del transporte y el metabolismo del azúcar.

Importancia del cultivo del tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) se considera una de las hortalizas de mayor importancia en el mundo, por su impacto económica debido a su alto contenido de compuestos bioactivos, fibra, vitaminas y minerales. El principal compuesto bioactivo de los tomates son los carotenoides (e.g. Licopeno), sus propiedades antioxidantes juegan un papel crucial en la prevención de enfermedades no transmisibles, principalmente cánceres o enfermedades cardiovasculares (Coelho *et al.*, 2022). En 2021, tan solo en México se cultivaron 48 mil 42 hectáreas y se obtuvo una producción de 3 millones 324 mil toneladas, por otra parte México se encuentra en el 9º lugar de la producción mundial con un total de 3, 324,263 toneladas, en México se tiene un consumo anual per cápita de 12.4 kg (SADER-SIAP, 2022).

Importancia del cultivo del pepino

El fruto del pepino (*Cucumis sativus* L.) es rico en fibra, carbohidratos, proteínas, magnesio, hierro, vitamina B, vitamina C, flavonoides, compuestos fenólicos y antioxidantes (Zapata-Sifuentes *et al.*, 2022). En 2021, tan solo en México se cultivaron más de 18 mil hectáreas y se obtuvo un millón 39 mil toneladas, México es el quinto productor mundial de esta hortaliza con una producción de 1, 038, 999 toneladas, en México se tiene un consumo anual per cápita de 1.3 g (SADER-SIAP, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento del experimento

Se estableció un cultivo de tomate utilizando semillas de la variedad Cid F1 (Harris Moran, Davis, CA, USA), de tipo saladette y crecimiento indeterminado, el trasplante se realizó en bolsas de polietileno negro de 10 L. Además, se estableció un cultivo de pepino utilizando semillas de la variedad Centauro F1 (Fitó, ESP), realizando siembra directa en bolsas de polietileno negro de 10 L. Se utilizó una mezcla de sustrato perlita-peat moss en proporción 1:1, para ambos cultivos. Se utilizó solución Steiner (Steiner, 1961) para la nutrición de las plantas. El cultivo del tomate se desarrolló durante 120 días y el cultivo del pepino 90 días y ambos cultivos fueron manejados a un solo tallo. El experimento se realizó en el vivero perteneciente al Departamento de Botánica, en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Ubicado en las coordenadas N 25° 21' 01.22" W 101° 01' 27.59", en un invernadero exclusivo para iluminación LED, de tipo túnel, con cubierta de polietileno, ventilación natural, orientación norte-sur.

Aplicación de tratamientos de iluminación

La suplementación con radiación se realizó con lámparas LED (modelo LILZBAL-S100WFRBPBC, Sola Basic, Ciudad de México, México) de 2.2 m de largo y una potencia de 100W. El área del invernadero se dividió en secciones para evitar contaminación lumínica entre tratamientos se colocaron divisiones entre cada sección de polipropileno blanco opaco. Las lámparas LEDs se colocaron a distancia de 30 cm por encima del dosel de las plantas y tres tratamientos se adicionó una LED fija en la base del tallo irradiando el envés de las plantas (para ambas especies), se tuvieron dos tratamientos por cada longitud de onda, un tratamiento consistió en irradiar el dosel de las plantas y el otro irradiaba dosel y envés de las plantas los tratamientos consistieron: control (T0) sin irradiación, LED azul [B (455 nm)], LED roja [R (660 nm)], LED rojo lejano [FR (730 nm)], las lámparas se encendían a las 7 pm y se apagaban a las 12 am.

Análisis de parámetros agronómicos

En el cultivo del pepino se realizaron mediciones cada 7 días después del trasplante (ddt), de altura, en etapa de producción se evaluó el número de frutos, el peso de frutos y número de hojas. A final del ciclo del cultivo (90 ddt), se cuantificó la biomasa fresca y se obtuvo la biomasa de seca después de 48 h de secado a 90 °C. En el cultivo del tomate se realizaron mediciones cada 7 días ddt, se evaluó la altura en etapa de producción se contabilizó frutos por planta, el peso de frutos por planta, el número de racimos, el número de hojas. A los 120 días ddt, de finalizar el ciclo, se cuantificó la biomasa fresca y se obtuvo la biomasa de seca después de 48 h de secado a 90 °C.

Recolección de hojas y frutos para análisis

A los 70 días después del establecimiento de los cultivos, se tomaron muestras de la última hoja joven y completamente desarrollada al medio día. Posteriormente las muestras se recogieron en hielo y se almacenaron a una temperatura de -20 °C. Se sometieron a liofilización y maceraron para obtener un polvo fino para los análisis bioquímicos.

Se recolectaron muestras de frutos a los 70 días después del trasplante, alrededor de medio día. Los frutos recolectados del tomate fueron del tercer racimo y del cuarto corte en pepino. Las muestras se recogieron en hielo y se almacenaron a una temperatura de -20 °C. Posteriormente, se liofilizaron y maceraron hasta obtener un polvo fino.

Análisis bioquímicos

Pigmentos fotosintéticos

Los contenidos de clorofilas A, B y Total (mg g^{-1} DW) y β -caroteno ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ DW) se determinaron de acuerdo con el método de Nagata y Yamashita (1992). La muestra liofilizada (10 mg) se mezcló con 2 mL de hexano:acetona (3:2). Posteriormente, las muestras se sometieron a un baño ultrasónico durante 5 min. Luego se centrifugaron a $15.000 \times g$ durante 10 min a 4 °C. Se eliminó el sobrenadante y se leyó la absorbancia a 645 y 663 nm usando un

espectrofotómetro. Los valores obtenidos se utilizaron en las Ecuaciones (1) y (2) para calcular el contenido de clorofila.

Para el β -caroteno, se midieron las absorbancias a 453, 505, 645 y 663 nm y los valores obtenidos se usaron en la Ecuación (4).

$$\text{Clorofila A} = 25.38 * A_{663} + 3.6A_{645} \quad (1)$$

$$\text{Clorofila B} = 30.38 * A_{645} - 6.5 * A_{663} \quad (2)$$

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

$$\beta - \text{caroteno} = 0.216 * A_{663} - 122 * A_{645} - 0.304 * A_{505} + 0.452 * A_{453} \quad (4)$$

Compuestos fenólicos

El contenido de fenoles totales se obtuvo según Yu y Dahlgren (2000). En total, se extrajeron 100 mg de tejido liofilizado con 1 mL de una solución de agua:acetona (1:1) y la mezcla se homogeneizó durante 30 s. Los tubos de muestra se centrifugaron a 17,500 x g durante 10 min a 4 °C. Luego, se colocaron en un tubo de ensayo 18 μ L del sobrenadante, 70 μ L del reactivo de Folin-Ciocalteu y 175 μ L de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20 %, y se agregaron 1750 μ L de agua destilada. Las muestras se colocaron en un baño de agua a 45 °C durante 30 min. Finalmente, la lectura se tomó a una longitud de onda de 750 nm en el espectrofotómetro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer, Model UV2150, Dayton, NJ, USA). Los fenoles totales se expresaron en mg EQ de ácido gálico por gramo de peso seco (PS).

Flavonoides

El contenido de flavonoides se determinó según Arvouet-Grand *et al.* (1994) Para la extracción se colocaron 20 mg de tejido liofilizado en un tubo de ensayo al que se le agregaron 2 mL de metanol grado reactivo, y este se homogeneizó por 30 s. La mezcla se filtró utilizando papel Whatman No. 1. Para la cuantificación se adicionó a un tubo de ensayo 1 mL del extracto y 1 mL de solución metanólica de tricloruro de aluminio (AlCl_3) al 2 % y se dejó reposar 20 min en oscuridad. La lectura se tomó a una longitud de onda de 415 nm en el espectrofotómetro UV-

Vis (UNICO Spectrophotometer, Model UV2150, Dayton, NJ, USA). Los resultados se expresan en mg EQ de quercetina por gramo de PS.

Ácido ascórbico

El contenido de ácido ascórbico o vitamina C se determinó por el método de (Hung y Yen, 2002).

Para la extracción se colocaron 10 mg de tejido liofilizado en un tubo de ensayo al que se le agregaron 1 mL de ácido metafosforico 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 μ M) 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.

Variables fisiológicas

A los 38 y 71 días después de establecer los cultivos, se determinó la tasa de fotosíntesis neta, el contenido de dióxido de carbono intracelular, la transpiración, conductancia estomática y la eficiencia del uso del agua con un analizador de fotosíntesis (3051C, Plant Photolysis Meter, Chincan Trading Co., Hangzhou, China).

Análisis de calidad comercial de fruto

71 días después del trasplante (ddt) se tomaron muestras de fruto del segundo racimo e inmediato se evaluó firmeza utilizando un penetrómetro (WAGNER Force Dial FDK 2). Este mismo fruto fue macerado con un mortero y utilizo para evaluar el contenido de solidos solubles totales °Brix utilizando un refractómetro (ATAGO, 1-425-637-2107), pH y conductividad eléctrica (CE) con un potenciómetro (OHAUS, STARTER3100m).

Análisis estadístico

Se utilizó un diseño de completamente al azar considerando seis repeticiones por tratamiento, y se realizó el análisis de varianza y la prueba de medias de Fisher de diferencia mínima significativa ($\alpha= 0.05$) mediante el software InfoStat (v2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de luz a través de LEDs mejoró el desarrollo de las plantas de tomate encontrando diferencias significativas en altura (Figura 1A). Los tratamientos B2 y B indujeron un incremento un 5.7 % y 4 %, en comparación al T0 respectivamente. En el número de frutos no se encontraron diferencias entre tratamientos (Figura 1B). El peso de frutos se observó una tendencia mayor en el tratamiento B (4,819.4 g por planta), sin embargo, no fue diferente al T0. En contraste, se observó un menor peso de frutos en los tratamientos R2, FR y FR2 de -16.5 %, -18 % y -14.3 % con respecto al T0 (Figura 1C). El número de racimos fue mejor en el tratamiento B (6 racimos por planta), aunque no fue diferente de al T0. En contraste en el tratamiento R2 presentó una reducción de 12.2 % con relación al T0 (Figura 1D). El tratamiento B presentó el mayor número de hojas (23 hojas por planta), pero no fue diferente a T0. En contraste, hubo una reducción del número de hojas en los tratamientos R y R2 de 5.8 % con respecto al T0 (Figura 1E). La biomasa seca disminuyó en los tratamientos B, B2, R, R2 y FR, en -17.3 %, -17.9 %, -15.8 %, -15.4 %, -17.1 % en comparación al T0 (Figura 1F).

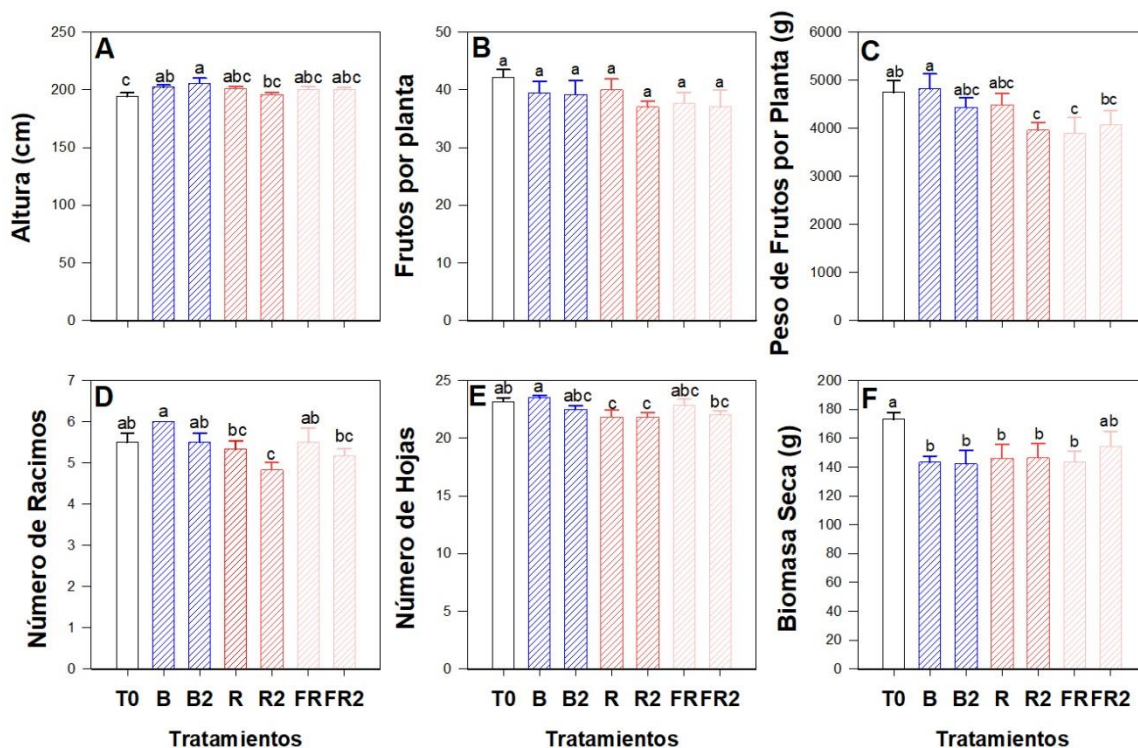


Figura 1. Efecto de la iluminación LED en el crecimiento de las plantas de tomate. (A) Altura; (B) Frutos por planta; (C) Peso de frutos por planta; (D) Número de racimos; (E) Número de hojas; (F) Biomasa seca; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

La aplicación de luz a través de LEDs no modificó la altura de las plantas de pepino (Figura 2A). El número de frutos se redujo en los tratamientos R2, R, B2, B, FR y FR2 de 19.2 %, 24.1 %, 25.3 %, 28.9 %, 33.7 % y 37.3 %, en comparación al T0 (Figura 2B). También hubo una reducción del peso de frutos en los tratamientos R2, B, B2, R, FR y FR2 de -20.6 %, -22.8 %, -26.6 %, -29.6 %, -33.5 % y -36.6 % en relación al T0 (Figura 2C). El número de hojas disminuyó en R, R2, FR y FR2, en 4.4 %, 5.3 %, 11.5 % y 15 % con respecto al T0 (Figura 2D). El tratamiento B2 presentó la mayor biomasa fresca, pero se comportó igual al T0. Sin embargo hubo una disminución de esta en los tratamientos B, FR y FR2 de -6.6 %, -10.2 % y -14 % en relación a T0 (Figura 2E). La biomasa seca fue menor en FR con 23.6 % en comparación a T0 (Figura 2F).

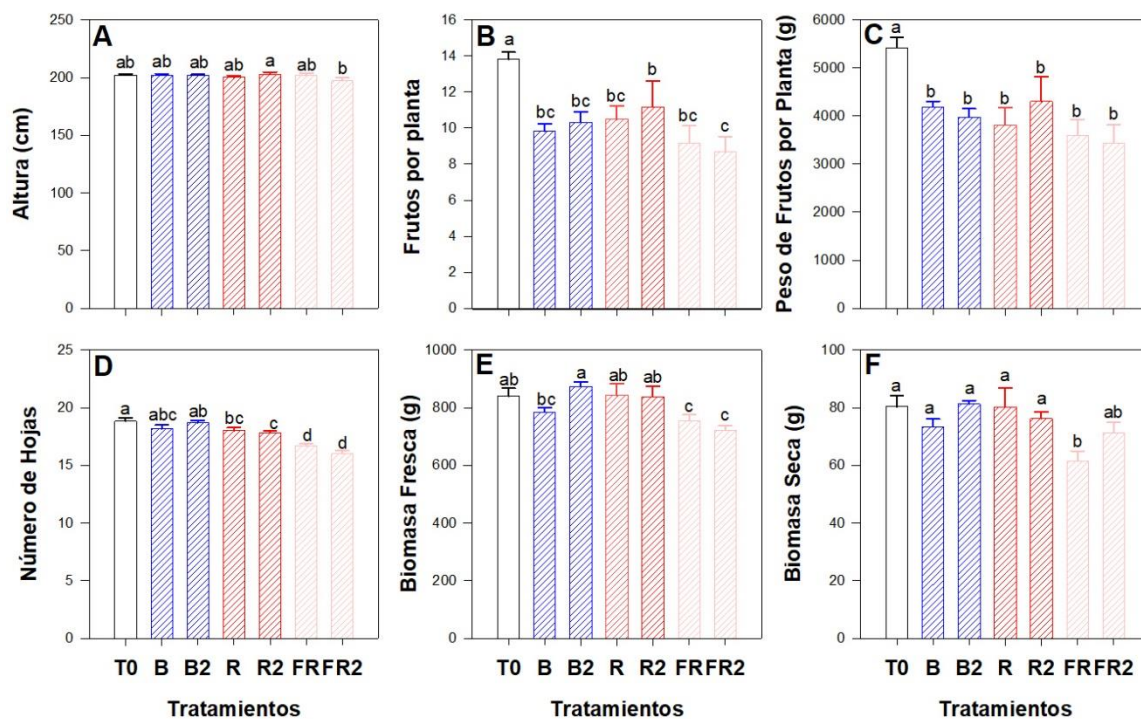


Figura 2. Efecto de la iluminación LED en el crecimiento de las plantas de pepino. (A) Altura; (B) Número de frutos; (C) Peso de frutos; (D) Número de hojas; (E) Biomasa fresca; (F) Biomasa seca; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

La luz tiene varios efectos en las plantas, no solo únicamente como origen de energía para la fotosíntesis, también actúa como señalizador induciendo efectos morfológicos y fisiológicos en el crecimiento y desarrollo de las plantas, activando diferentes respuestas de las plantas en los cambios en las condiciones de luz natural (Paponov *et al.*, 2020). Esto claramente fue observado en los resultados obtenidos en este trabajo, ya que se indujeron cambios en la altura de la planta, peso de los frutos por planta, números de racimos por planta, número de hojas por planta y biomasa seca (Figuras 1 y 2). Las plantas poseen dos medios diferentes para percibir la señal de la luz ambiental, los cloroplastos y los fotorreceptores (Roeber *et al.*, 2021). Los cloroplastos contienen dos tipos de pigmentos clorofilas y carotenoides, estos absorben la luz para el proceso de la fotosíntesis, las clorofilas, son el pigmento que predomina en las plantas y

absorben la luz roja y azul, por otro lado, los carotenoides son pigmentos accesorios y absorben fuertemente la luz azul, permitiendo que el cloroplasto coseche una mayor cantidad de energía de la luz (Yamori, 2019). Los fotorreceptores, que perciben la radiación UV-A y azul, en las plantas son las fototropinas (PHOT) y los criptocromos (CRY1), también una familia de fotorreceptores: Zeitlupe (ZTL), Flavin-binding Kelch (FKF1) y LOV Kelch Proteins (LKP2/ FKL1) (Huché-Thélier *et al.*, 2016). Para la absorción de la luz roja y roja lejana los encargados son los fitocromos (PHY), rojo (PR) y rojo lejano (PRF) (Roeber *et al.*, 2021). Los fotorreceptores funcionan como señalizadores que actúan directa o indirectamente en el crecimiento y desarrollo en las plantas (Pierik y Ballaré, 2021). Y regulan los cambios transcripcionales en respuesta a la luz al compartir distintas vías entre sí (Su *et al.*, 2017). De aquí se observaron respuestas diferentes entre las diferentes longitudes de onda empleadas i.e. azul, rojo y rojo lejano, siendo más marcado el efecto en el cultivo del tomate donde la luz azul indujo en general respuestas positivas, mientras que la luz roja indujo efectos negativos en la mayoría de las variables y la luz rojo lejano disminuyó el peso de frutos por planta y la biomasa seca (Figura 1). Además la luz como señalizador modula múltiples vías hormonales, incluidas las vías de señalización de giberelinas, ácido abscísico (ABA), auxina, brasinoesteroides, citoquininas (CTK) y etileno, para regular los cambios del desarrollo, el fitocromo B (PHYB) y el criptocromo 1 (CRY1) regulan el hipocótilo largo HYPOCOTYL5 (HY5), este regulador desempeña un papel positivo en la regulación de la fotomorfogénesis y los factores de interacción del fitocromo (PIF4/5) de la absorción y utilización de nutrientes (Xu *et al.*, 2021).

Hernández y Kubota (2014) no encontraron efectos benéficos en el crecimiento y la morfología en el cultivo del pepino con diferentes proporciones de flujo de fotones B (455 nm) y R (661 nm). En contraste en las plantas de tomate bajo los tratamientos de R, se observó un menor número de hojas y de racimos, esto puede deberse a que la radiación R promueve la elongación del tallo, lo que confirma este estudio. Esto demuestra que las funciones de la planta inducidas por el espectro dependen de cada tipo de especie (Zou *et al.*, 2020). Por otro

lado, los resultados obtenidos con FR en las plantas de pepino demostraron que es más sensible que el tomate bajo este tipo de radiación ya que hubo una reducción del número de hojas, frutos, biomasa fresca y seca. Esto sucede porque la radiación FR es percibida por el fotorreceptor del fitocromo B (phyB). Durante una intensidad de luz R alta, phyB se activa e inhibe las respuestas de crecimiento de las plantas, mientras que bajo una luz FR alta, phyB se desactiva y conduce a respuestas del síndrome de evitación de la sombra (SAS), alargando los entrenudos y aumentando la altura de la planta (Meijer *et al.*, 2022). Tanto las luces azules como las rojas pueden promover la apertura de los estomas y están mediadas por estos fotorreceptores de luz *phot1*, *cry2* y *phyA* (Huché-Théliet *et al.*, 2016). Esto conduce a tasas de transpiración más altas, lo que a su vez afecta el metabolismo general de los frutos (Hasperué *et al.*, 2016). Esto puede explicar la pérdida de peso en los frutos de pepino observada en este estudio.

El contenido de pigmentos fotosintéticos en hojas de tomate mostró diferencias entre tratamientos, induciendo un aumento en la clorofila a, b y total en los tratamientos B, B2 y FR2, en clorofila a fue de 29.1 %, 20.7 % y 19.5 %, en clorofila b fue de 26.9 %, 19.2 %, 15.4%, en clorofila total incrementó en 28.6 %, 20.4 %, 18.4 %, en relación al T0 (Figura 3A). En contraste, el licopeno se redujo en los tratamientos R, R2, FR y FR2, de -27.8 %, -23.8 %, -40.5 % y -56.2 % con respecto al T0 (Figura 3B). El contenido de β -caroteno incrementó en los tratamientos FR2 seguido de B, R, B2, R2 y FR con 40.1 %, 36.5 %, 32.2 %, 31.9 %, 30.2 % y 23.9 % en comparación al T0 (Figura 3C). En contraste, el contenido de Vitamina C, mostró una reducción en los tratamientos B2, R y R2 de -13 %, -17.5 % y -43.3 % en relación al T0 (Figura 3D). Hubo un incremento de flavonoides en el tratamiento B2 de 22.8 % en relación al T0 (Figura 3E). Por otra parte, La mayor cantidad de fenoles se obtuvo con FR de 59.7 %, seguido de B, R y B2 con 51.6 %, 50.7 % y 45.3 %, en comparación al T0 (Figura 3F).

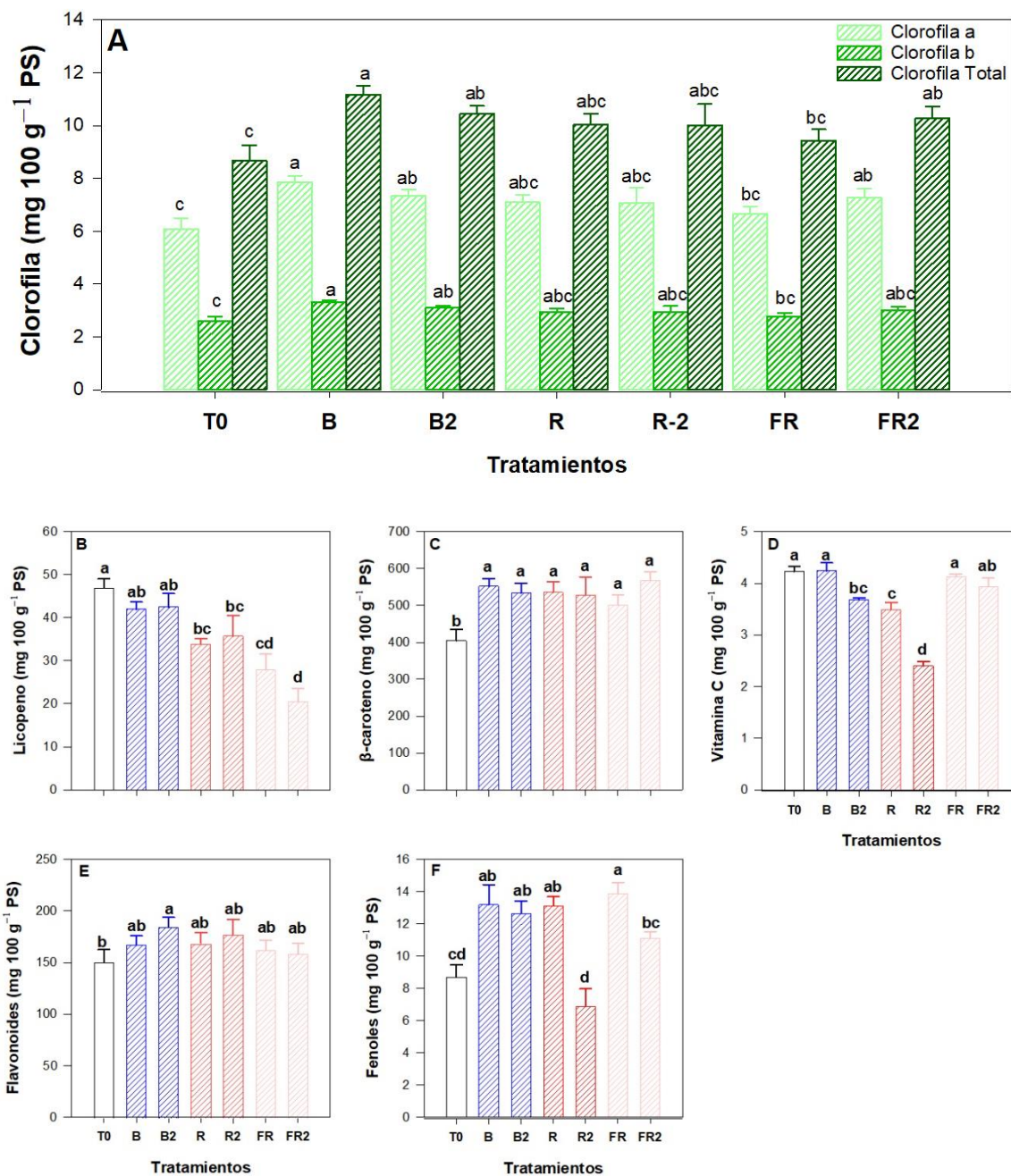


Figura 3. Efecto de la iluminación LED en el contenido de clorofilas y compuestos antioxidantes en hojas de tomate. (A) Pigmentos fotosintéticos: clorofila a; clorofila b; clorofila total: suma de clorofila a + clorofila b; (B) Licopeno; (C) β-caroteno; (D) Vitamina C; (E) Flavonoides; (F) Fenoles; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

El contenido de licopeno en frutos de tomate se modificó con la aplicación de luz a través de LEDs siendo mejor en R, pero no fue diferente al T0. Sin embargo, la menor concentración la obtuvo FR con -23.3%, en comparación al T0 (Figura 4A). En contraste el mayor contenido de β -caroteno, la obtuvieron los tratamientos FR2 y R con 127.5 % y 106.9 %, en relación al T0 (Figura 4B). En vitamina C, se observó una reducción en los tratamientos, FR, FR2, R2 y B de -10.6 %, -10.9 %, -11.2 % y -12.2 % en comparación al T0 (Figura 4C). También se observó una reducción en el contenido de flavonoides en los tratamientos B2 y FR de -15.7 % y -16.3 %, en comparación al T0 (Figura 4D). En contraste la concentración de fenoles en fruto, no mostró diferencias entre tratamientos (Figura 4E).

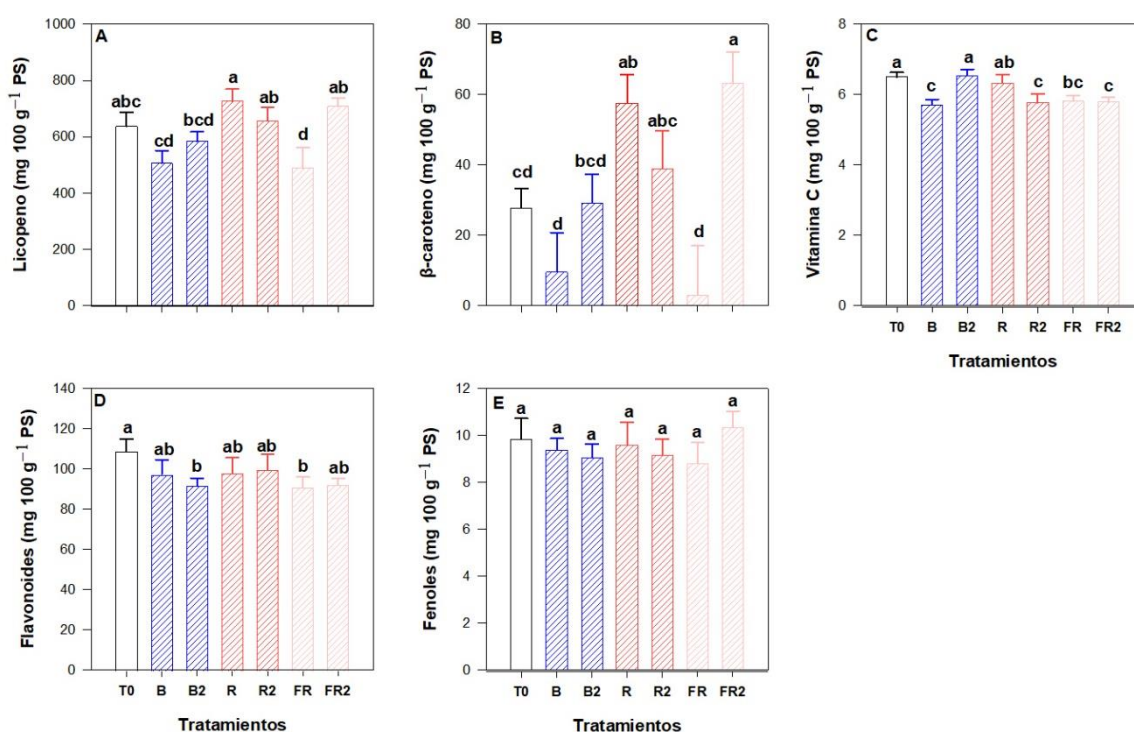


Figura 4. Efecto de la iluminación LED en compuestos antioxidantes de frutos de tomate. (A) Licopeno; (B) β -caroteno; (C) Vitamina C; (D) Flavonoides; (E) Fenoles; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

La aplicación de luz a través de LEDs modificó el contenido de pigmentos fotosintéticos en pepino, T0 obtuvo la mayor concentración en la clorofila a, b y

total (Figura 5A). En contraste, se indujo un incremento de licopeno en los tratamientos R2, y B, con 207.4 %, y 166.7 %, en comparación al T0 respectivamente (Figura 5B). Sin embargo hubo una reducción de β -caroteno, en todos los tratamientos, siendo R2 un -34.7 % menor con respecto al T0 (Figura 5C). El tratamiento R disminuyó un -4.6 %, el contenido de vitamina C (Figura 5D). También hubo una reducción en los flavonoides en el tratamiento R2 de -19.9 % con respecto al T0 (Figura 5E). En contraste hubo una reducción del contenido de fenoles en todos los tratamientos con respecto a T0 (Figura 5F).

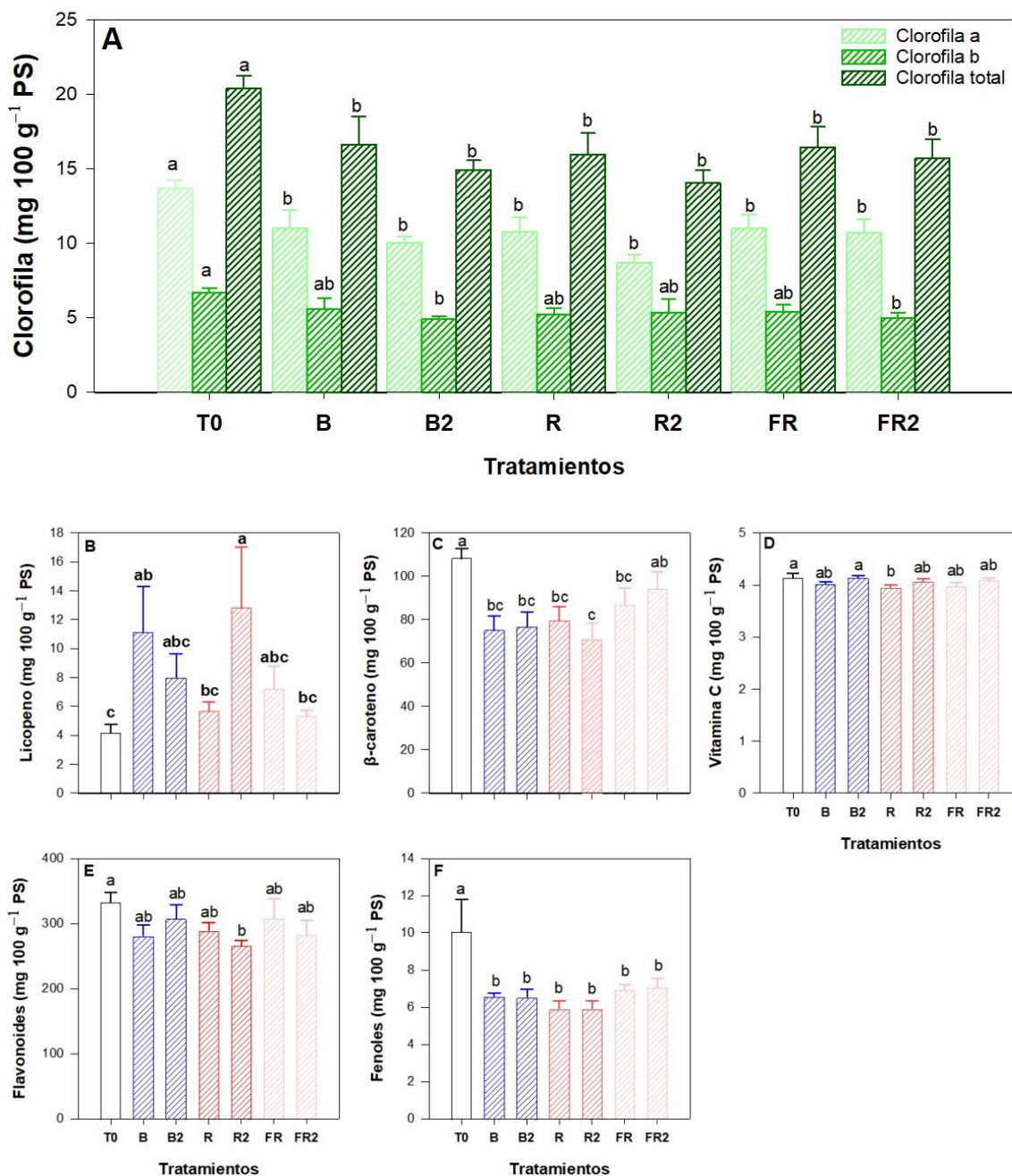


Figura 5. Efecto de la iluminación LED en el contenido de clorofilas y compuestos antioxidantes de hojas de pepino. (A) Pigmentos fotosintéticos: clorofila a; clorofila b; clorofila total: suma de clorofila a + clorofila b; (B) Licopeno; (C) β-caroteno; (D) Vitamina C; (E) Flavonoides (F) Fenoles; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

La aplicación de luz a través de LEDs modificó el contenido de licopeno en frutos de pepino, incrementando este compuesto en los tratamientos R seguido de R2, FR, FR2, B2 y B con 175.5 %, 175.3 %, 157.6 %, 133.6 %, 105.9 % y 83.2 %, en relación al T0 (Figura 6A). En contraste el contenido de vitamina C aumentó en el tratamiento FR con 33.8 %, en relación al T0 (Figura 6B). La concentración de fenoles no se modificó entre tratamientos (Figura 6C). En contraste el contenido de flavonoides incrementó en FR seguido de R, con 34.7 % y 27.1 % en relación al T0 (Figura 6D).

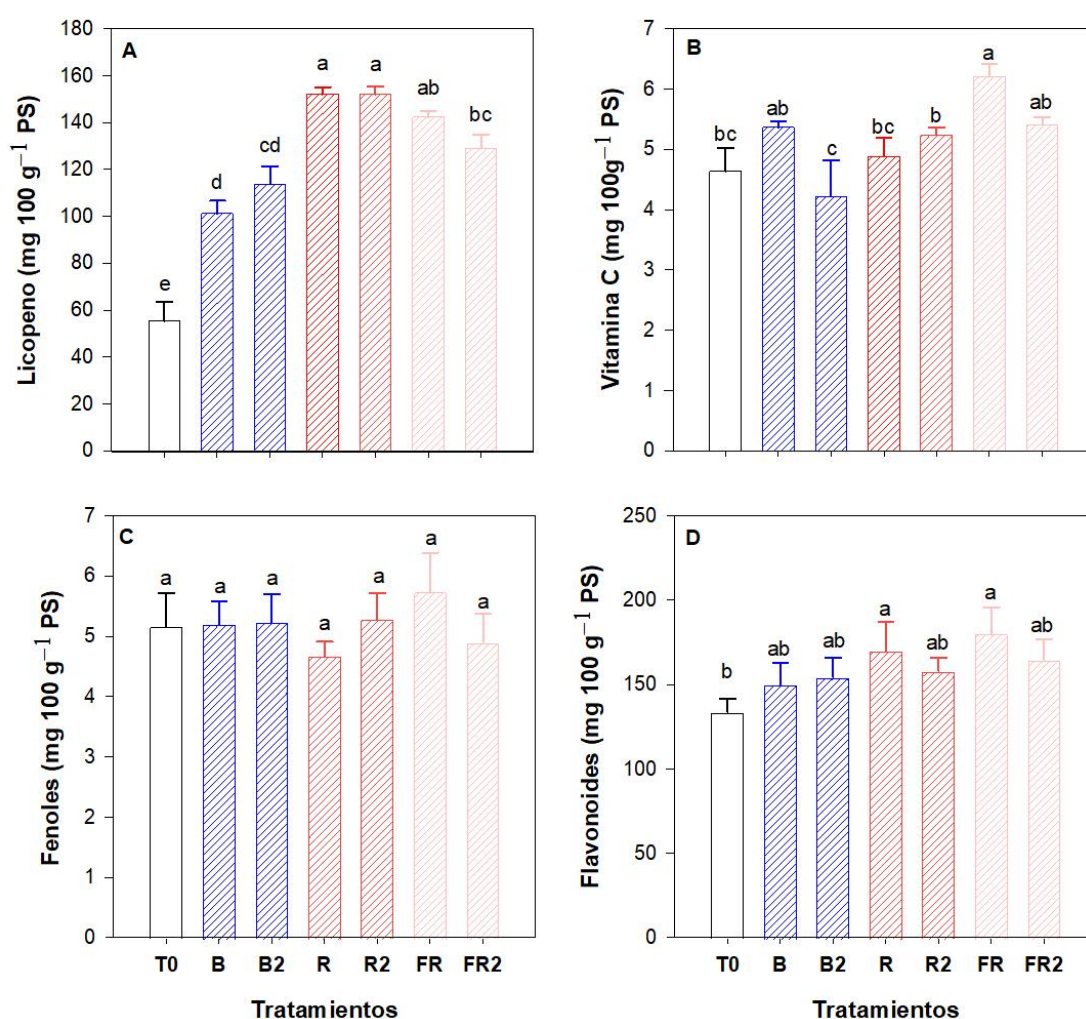


Figura 6. Efecto de la iluminación LED en compuestos antioxidantes en frutos de pepino. (A) Lycopeno; (B) Vitamina C; (C) Fenoles; (D) Flavonoides; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel;

FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=005$). $n = 6 \pm$ error estándar.

La luz modifica varias rutas bioquímicas durante el crecimiento y desarrollo de las plantas. Estudios actuales proponen que el impacto de la luz y diferentes longitudes de onda en la síntesis de metabolitos secundarios difiere de la especie, tipo de célula, tejido y órgano de la planta (Jarerat *et al.*, 2022). Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son sintetizadas durante la fotosíntesis y la respiración mitocondrial. Donde una intensidad de luz alta, produce una tasa fotosintética mayor y a su vez, una producción más alta de ROS (Ntagkas *et al.*, 2020). Los fitocromos se encargan de la biosíntesis de fitoquímicos y de las respuestas fisiológicas de las plantas mientras que los criptocromos se encargan de los procesos como apertura estomática, producción de biomasa, síntesis de antocianinas, carotenoides y clorofilas (Al Murad *et al.*, 2021). El contenido de pigmentos fotosintéticos se modificó de manera positiva en el tomate bajo la radiación B, R y FR. Una mayor síntesis de pigmentos podría conducir a una mayor absorción de luz, la eliminación de ROS, y en consecuencia, un mejor crecimiento de las plantas (Johkan *et al.*, 2010). En contraste hubo una reducción del contenido de pigmentos en pepino, lo que puede estar ligado a que los espectros específicos de radiación solar pueden dañar los fotosistemas, particularmente el PSII, y causar la fotoinhibición. Además de que la reducción del contenido de pigmentos es uno de los mecanismos que reducen el aporte de exceso de la luz a los cloroplastos, lo que a la vez disminuye los efectos de la fotoinhibición (Pashkovskiy *et al.*, 2021).

El contenido de vitamina C (ASA), fue muy variable bajo los tratamientos de las luces, en hojas como en frutos, se ha reportado que la luz azul es más eficiente para la biosíntesis de ASA en comparación con la roja, Ntagkas *et al.* (2019) encontraron que la luz azul mejora los niveles de ASA en los frutos de tomate, concluyendo que el efecto de ASA, esta mediado por la fotosíntesis del fruto, lo que sugiere que variabilidad de ASA, se deba al tiempo de exposición de la luz. En los flavonoides hubo una tendencia positiva en la producción de este compuesto en frutos de pepino (Figura 6D); estos compuestos son importantes

para la fotoprotección y su biosíntesis incrementa con la adición de luz B y R, y se puede reducir con FR (Lazzarin *et al.*, 2021), tal vez esto se deba a que el pepino es más sensible a las longitudes de onda que el tomate, ya que en el caso de los compuestos fenólicos, en hojas de pepino disminuyeron considerablemente y en el caso de los frutos se conservaron en niveles adecuados, esto se debe a que los compuestos de flavonoides son todos antioxidantes y los compuestos fenólicos no todos los son (Tungmunnithum *et al.*, 2018). Por otro lado se ha demostrado que la luz azul y roja incrementan la producción de fenilpropanoides como antocianinas, flavonoides y compuestos fenólicos al modificar las transcripciones de los genes que regulan estos compuestos (Alrifai *et al.*, 2019). Taulavuori *et al.* (2015) observaron que la biosíntesis de fenoles y flavonoides se incrementaron en lechuga roja suplementada con una composición de LED (120 W) con luz azul, 410 nm (5 %), 430 nm (18 %), 450 nm (48%) y 460 nm (29%), mientras que la luz azul y roja 720 nm (1.8 %), 660 nm (50 %), 630 nm (30 %), 450 nm (11 %), 430 nm (3.6 %), 410 nm (0.9 %) y 3500 K (-2.7 %) (Luz blanca neutra), regulaban su producción en la albahaca. Los carotenoides incrementaron en hojas y frutos de tomate (Figura 3c y 4b). Estos funcionan como fotosensibilizadores y juegan un papel importante como reguladores de ROS (Polívka y Frank, 2010). Se ha comprobado que las proporciones bajas de R/FR inhiben la expresión de PSY, que es la enzima encargada de la velocidad de la ruta de los carotenoides, mientras que altas proporciones de R/FR, resultan en una mayor expresión de PSY y por lo tanto induce mayor contenido de estos compuestos (Xie *et al.*, 2019). Li *et al.* (2021), encontraron que S1PSY1, es un gen que está estrechamente involucrado en la biosíntesis de licopeno en frutos de tomate tratados con luz R (657 nm) y B (457 nm). El receptor de la luz roja fitocromo y el de la luz azul criptocromo, muestran una respuesta similar en ambas longitudes de onda. Sucediendo lo mismo para los genes HY5 y PIFs, esto sugiere que la luz azul y roja comparten mecanismos similares al inducir la activación de HY5 y PIF, y por consecuencia aumentan el contenido de licopeno en los frutos (Xie *et al.*, 2019). La tasa fotosintética neta se modificó con la aplicación de luz LED en las plantas

de tomate, hubo una reducción en el tratamiento FR2 de 16.2 % en comparación al T0, al aplicar la iluminación LED, los tratamientos R2, seguido de B, R y B2 incrementaron la fotosíntesis neta en 380 %, 280 %, 254 %, y 204 %, en comparación a T0 (Figura 7A). La tasa de transpiración se redujo 33.7 % en FR2 con relación al T0, al aplicar la iluminación, la transpiración disminuyó en FR y FR2 en 72.4 % y 82.8 %, en comparación al T0 (Figura 7B). No se encontraron diferencias entre tratamientos en la concentración intracelular de CO₂, en contraste, al aplicar la iluminación, se observó un aumento en FR2 y FR de 2 % y 1.1 % en comparación al T0 (Figura 7C). El tratamiento FR2 obtuvo la menor conductancia estomática, con 28.9 % en comparación al T0, al aplicar la iluminación R incrementó un 28.6 % respecto a T0, sin embargo hubo una reducción en FR y FR2 de 57.1 % y 71.4 % con relación a T0 (Figura 7D). No se observaron diferencias entre tratamientos en el uso eficiente del agua, en contraste al aplicar los tratamientos hubo un incremento en R2, seguido de B, R, y B2 de 442 %, 260.9 %, 249.8 % y 210.1 % en comparación al T0 (Figura 7E).

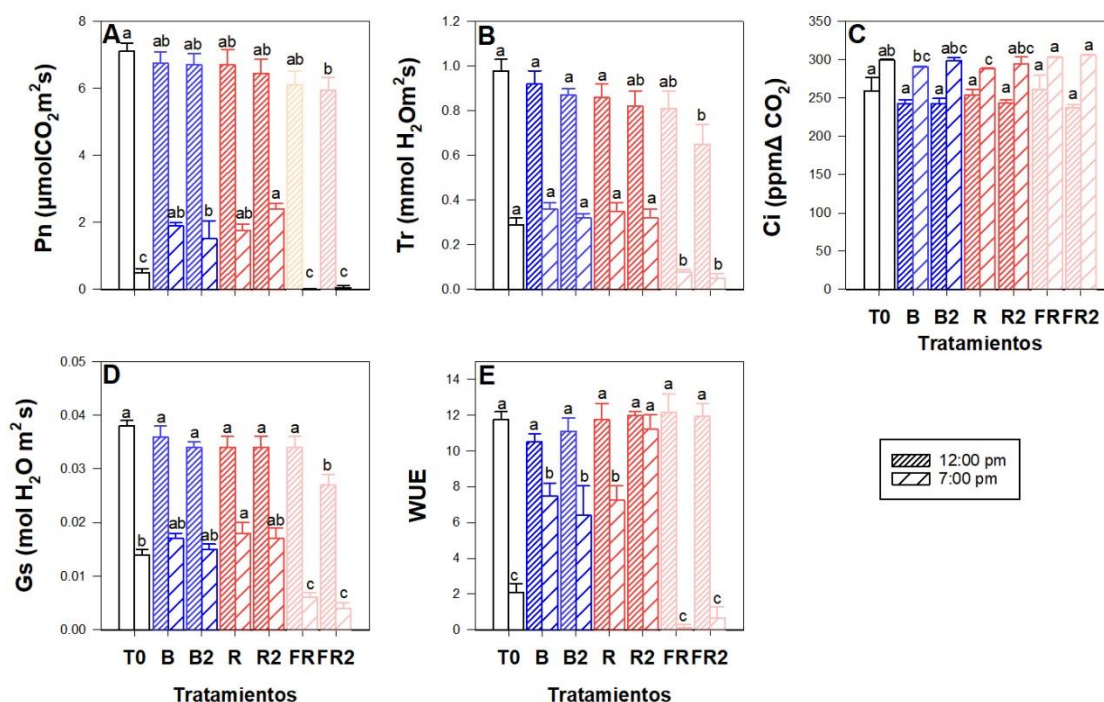


Figura 7. Efecto de la iluminación LED en la Pn, Tr, Ci, Gs y WUE de las plantas de tomate. (A) Tasa fotosintética neta; (B) Tasa de transpiración; (C) Concentración intracelular de CO₂; (D) Conductancia estomática; (E) Uso eficiente del agua; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED

azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=005$). $n = 6 \pm$ error estándar.

La aplicación de luz LED modificó la tasa fotosintética neta en las plantas de pepino. Los tratamientos FR2, FR y R2, incrementaron un 128 %, 72.2 % y 66.8 % en comparación al T0, al aplicar la iluminación R2, seguido de R incrementaron un 1,100 %, 742.9 %, en relación a T0 (Figura 8A). El tratamiento FR2 obtuvo la mayor tasa de transpiración, seguido de FR, R, R2, B2 y B con 126.1 %, 117.4 %, 113 %, 108.7 %, 91.3 % y 34.8 % en comparación al T0, en contraste al aplicar los tratamientos hubo una reducción en FR y FR2 de 46.4 % y 42.9 % en con respecto al T0 (Figura 8B). Se observó una disminución en concentración intracelular de CO₂ en R2 y FR de 7.5 % y 6.1 % en comparación a T0, al aplicar los tratamientos no se observaron diferencias entre tratamientos (Figura 8C). La mayor conductancia estomática, se observó en R, seguido de B2, R2, FR y FR2 de 56.2 %, 50 %, 43.7 %, 37.5 % y 31.2 %, cuando se aplicó la iluminación, la mayor conductancia se observó en B y B2 y la menor en FR2 aunque no fueron diferentes al T0 (Figura 8D). El tratamiento con mejor uso eficiente del agua fue FR2 con 12.3 % en relación al T0, por el contrario al aplicar los tratamientos, incrementó en R2, FR y R con 1,536.8 %, 1,415.8 %, 1,210.5 %, en comparación a T0 (Figura 8E).

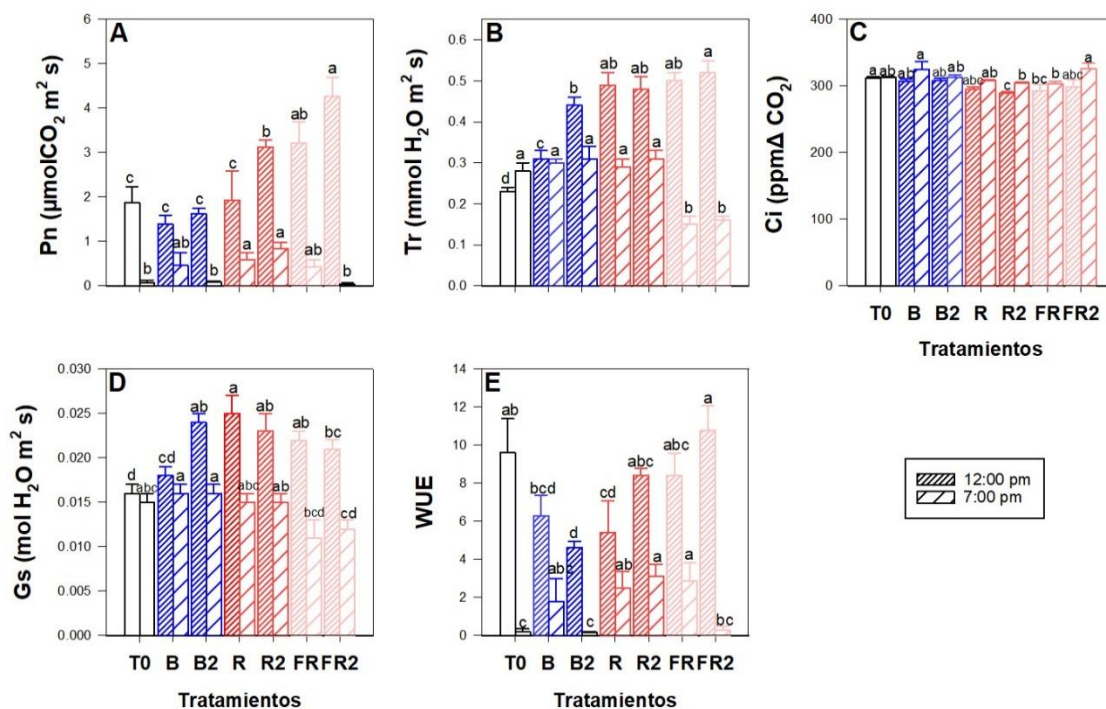


Figura 8. Efecto de la iluminación LED en la Pn, Tr, Ci, Gs y WUE de las plantas de pepino. (A) Tasa fotosintética neta; (B) Tasa de transpiración; (C) Concentración intracelular de CO_2 ; (D) Conductancia estomática; (E) Uso eficiente del agua; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

En el desarrollo controlado por la luz, se afirma que los fotorreceptores activan genes nucleares sensibles a la longitud de onda al percibir e interpretar la luz y transducir señales, bajo el espectro de luz las longitudes de onda R y B, modulan la fotosíntesis de las plantas (Li *et al.*, 2020). Diferentes procesos en la fotosíntesis están regulados por las luces phyB y R y FR. Se ha demostrado que la expresión reducida de PHYB disminuye apertura estomática, y puede disminuir o aumentar la conductancia estomática del CO_2 . La longitud FR, regula la actividad de varias enzimas en el ciclo de Calvin. PHYB también regula la fotosíntesis a través de cambios anatómicos (Thomas *et al.*, 2015). Es bien sabido que el rojo lejano se utiliza de manera menos eficiente para la fotosíntesis (Kalaitzoglou *et al.*, 2021), esto se demuestra en las plantas de tomate, lo contrario sucedió con los tratamientos de FR en plantas de pepino, por otro

lado se ha demostrado que las aplicaciones de luz mejoran los parámetros fisiológicos Yang *et al.* (2018) comprobaron, que las diferentes longitudes de onda y la calidad del espectro LED influyen en la actividad del transporte de electrones fotosintéticos, y la combinación de luz es favorable para la eficiencia fotosintética Li *et al.* (2021), en un estudio bajo fotosíntesis monocromática en el cultivo del tomate demostraron que la luz R fue inhibida por el cierre estomático, limitando la difusión de CO₂ dentro del cloroplasto y provocando una baja asimilación de CO₂, por otro lado aplicando luz RB, mejoró el transporte de electrones fotosintéticos y a la vez promovió la asimilación de CO₂, resultando en una alta eficiencia fotosintética. Liang *et al.* (2021), reportaron que la necesidad de longitudes específicas como B o R, afectan el desarrollo de las plantas, en su morfología y fisiología, sin embargo la luz B es más esencial para la correcta función del aparato fotosintético, resultando en un mayor rendimiento fisiológico. En este estudio la Pn, Tr, Ci, Gs y WUE en el tomate se modificaron de manera positiva con la radiación B y R por otro lado en las plantas de pepino la fotosíntesis se modificó de manera negativa, esto se debe a que la calidad de luz impacta en la síntesis de pigmentos, ya que se observó que los pigmentos disminuyeron significativamente en los pepinos y en el caso de los tomates se modificaron de manera positiva. Se ha reportado que el pepino es más sensible a la luz roja y azul que el tomate, lo que indica que las respuestas de las plantas a la luz roja y azul son específicas de la especie (Liang *et al.*, 2021).

La iluminación de luz a través de LEDs no modificó la firmeza del fruto del tomate (Figura 9A). En contraste en el fruto del pepino, el tratamiento R mostró la mayor firmeza y B la menor, sin embargo no fueron diferentes al T0 (Figura 9B). Los sólidos solubles totales en el fruto del tomate, disminuyeron en el tratamiento R un 9.7 %, con relación al T0 (Figura 9C). En contraste, no hubo diferencias para los sólidos solubles totales en el pepino (Figura 9D). Sin embargo, hubo una reducción de la conductividad eléctrica en frutos de tomate en los tratamientos B2, R y FR de 15 %, 17.2 % y 18.1 %, en comparación al T0 (Figura 9E). En contraste en el pepino, los tratamientos R y FR2 incrementaron 19.1 % y 17.4 %, en relación al T0, respectivamente (Figura 9F). El pH en el fruto del tomate,

incrementó en el tratamiento FR2, 3.1 %, sin embargo, en los tratamientos B2, FR y hubo una reducción de 2.5 % y 2.7 % en relación al T0 (Figura 9G). En contraste en el fruto del pepino, se observó una reducción del pH en los todos los tratamientos en comparación al T0 (Figura 9H).

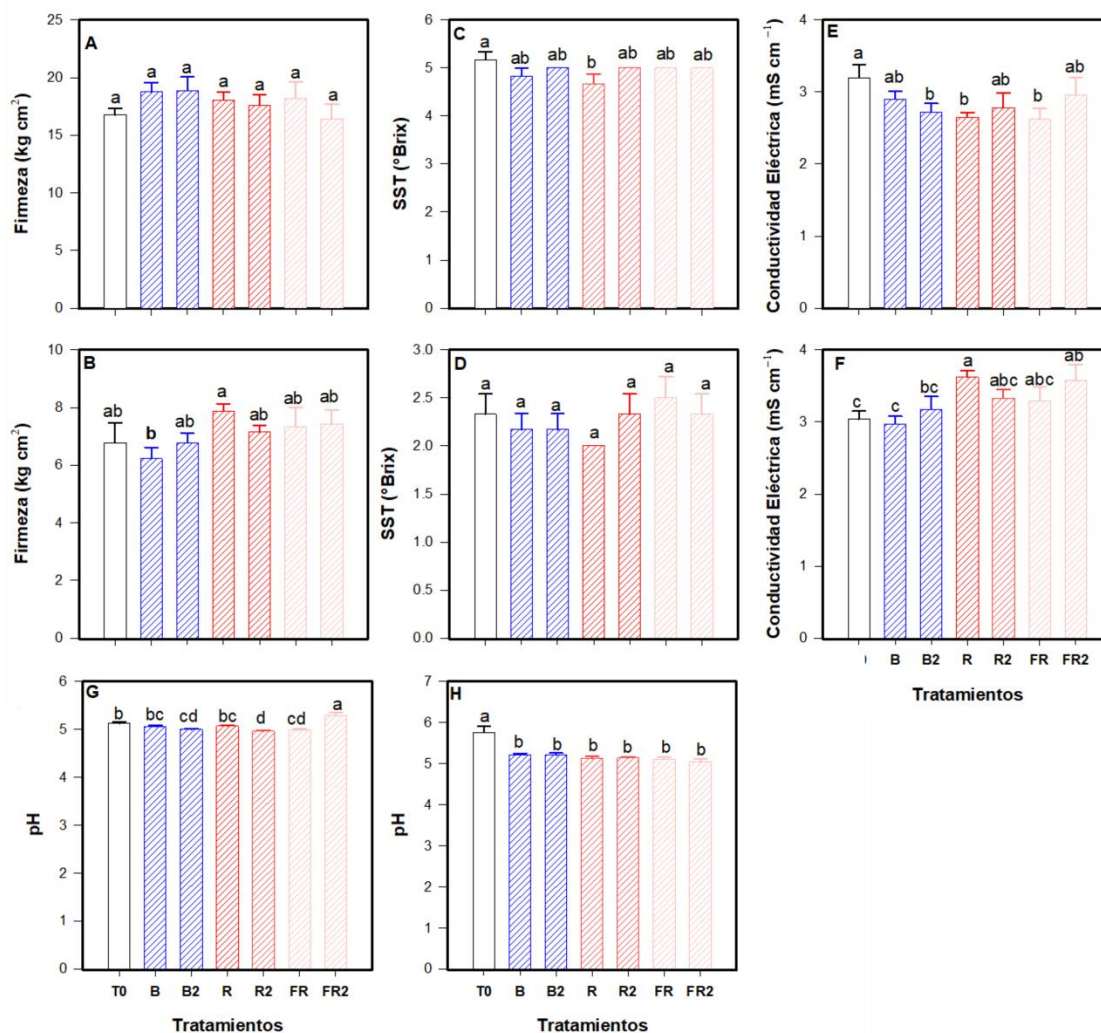


Figura 9. Efecto de la iluminación LED en la calidad de los frutos de tomate y pepino. (A) Firmeza en frutos de tomate; (B) Firmeza en frutos de pepino; (C) Sólidos solubles totales en frutos de tomate; (D) Sólidos solubles totales en frutos de pepino; (E) Conductividad eléctrica en frutos de tomate; (F) Conductividad eléctrica en frutos de pepino; (G) pH en frutos de tomate; (H) pH en frutos de pepino; T0: control; B: LED azul, dosel; B2: LED azul, dosel y envés; R: LED rojo, dosel; R2: LED rojo, dosel y envés; FR: LED rojo lejano, dosel; FR2: LED rojo lejano, dosel y envés. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=005$). $n = 6 \pm$ error estándar.

La calidad de los frutos fue variable entre el tomate y pepino (Figura 7), en firmeza (Figura 7B), los SST (Figura 7C), conductividad eléctrica (Figura 7 E-F), y pH (Figura 7 G-H). Estos cambios metabólicos pueden atribuirse a la activación de diferentes vías, como las implicadas a la síntesis de aminoácidos y azúcares, sin embargo, las vías metabólicas específicas que se activan pueden depender de factores como el tipo de irradiación LED utilizada y la duración de la exposición (Ngcobo y Bertling, 2021). Y que, los procesos de maduración y los mecanismos moleculares subyacentes son diferentes entre frutos climatéricos y no climatéricos. Los LED pueden tener diferentes impactos en los procesos moleculares en frutos climatéricas y no climatéricas (Hasan *et al.*, 2017). La luz rojo lejano (700-800 nm) estimula la partición de la masa seca en las frutos principalmente al aumentar la fuerza del hundimiento de la fruto a través de la regulación positiva simultánea del transporte y el metabolismo del azúcar (Ji *et al.*, 2020). La luz azul (400-500 nm) puede facilitar la pérdida de humedad al estimular la conductancia estomática y la transpiración. Por otro lado, la luz roja (600-700 nm) ayuda a retener la humedad en los tejidos de frutos y verduras (Hasan *et al.*, 2017). La luz afecta el metaboloma no solo de las hojas sino también de los frutos. Nadalini y Andreotti. (2017) encontraron que las luces B (436 nm) y R (666 nm) no modificaron las características principales de la calidad de fruto de la fresa (contenido de azúcares totales, acidez y consistencia de la pulpa), mientras que el color y la producción de antocianinas si se modificaron. Wang *et al.* (2022) indican que el tiempo de la aplicación también modifica las características de la calidad de los fruto de tomate, la suplementación con luz matutina mejoró la calidad nutricional de los frutos, mientras que la suplementación con luz vespertina mejoró su sabor. En un estudio realizado por Ntagkas *et al.* (2020) encontraron que a diferentes tratamientos de iluminación LED R (638 nm) y B (450 nm) no se modificó la firmeza en frutos de tomate, al no encontrar ninguna vía de la lignina relacionada con la iluminación LED.

CONCLUSIONES

La aplicación de luz suplementaria mejoró el crecimiento de las plantas de tomate, sin embargo, no se encontró el mismo efecto en las plantas de pepino. En las plantas de tomate, la adición de luz suplementaria condujo a un aumento de los pigmentos fotosintéticos. En contraste, las plantas de pepino experimentaron una disminución en los pigmentos fotosintéticos, carotenoides y fenoles. Además, la luz azul demostró un mejor rendimiento fisiológico en las plantas de tomate en comparación con otros espectros de luz. La luz roja suplementaria reguló la síntesis de carotenoides y mejoró su contenido en frutos de tomate. En plantas de pepino, la luz roja suplementaria resultó en una mayor acumulación de licopeno en sus hojas. Las luces rojas y azules mejoraron la fotosíntesis en plantas de tomate, por otro lado, las luces rojas la incrementaron en pepino, en general la suplementación de luz tiene un impacto positivo en los procesos fisiológicos, en crecimiento, desarrollo y mejora de la actividad antioxidante en los frutos de tomate y pepino.

REFERENCIAS

- Al Murad, M., Razi, K., Jeong, B. R., Samy, P. M. A., & Muneer, S. (2021). Light emitting diodes (Leds) as agricultural lighting: Impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(4), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su13041985>
- Alrifai, O., Hao, X., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2019). Current Review of the Modulatory Effects of LED Lights on Photosynthesis of Secondary Metabolites and Future Perspectives of Microgreen Vegetables [Review-article]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *67*(22), 6075–6090. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00819>
- Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P. (1994). Standardization of propolis extract and identification of principal constituents. *Journal de Pharmacie de Belgique*, *49*(6), 462–468.
- Badmus, U. O., Ač, A., Klem, K., Urban, O., & Jansen, M. A. K. (2022). A meta-analysis of the effects of UV radiation on the plant carotenoid pool. *Plant Physiology and Biochemistry*, *183*(May), 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.05.001>
- Bantis, F., Gkotchamani, A., Dangitsis, C., & Koukounaras, A. (2022). A Light Recipe including Far-Red Wavelength during Healing of Grafted Watermelon Seedlings Enhances the Floral Development and Yield Earliness. *Agriculture (Switzerland)*, *12*(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture12070982>
- Bantis, F., Smirnakou, S., Ouzounis, T., Koukounaras, A., Ntagkas, N., & Radoglou, K. (2018). Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). *Scientia Horticulturae*, *235*(February), 437–451. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.058>
- Blonquist, J. M., & Bugbee, B. (2018). Solar, net, and photosynthetic radiation. *Agroclimatology*, 1–49. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr60.2016.0001>
- Bures, S., Gavilán, M. U., Kotiranta, S., Bures, S., & Gavilan, M. U. (2018).

Technical article Artificial lighting in agriculture by. *Horticulture Library*.
<http://publicaciones.poscosecha.com/es/cultivo/395-iluminacion-artificial-en-agricultura.html> #.

Christie, J. M., Blackwood, L., Petersen, J., & Sullivan, S. (2015). Plant flavoprotein photoreceptors. *Plant and Cell Physiology*, *56*(3), 401–413.
<https://doi.org/10.1093/pcp/pcu196>

Coelho, M. C., Rodrigues, A. S., Teixeira, J. A., & Pintado, M. E. (2022). Integral valorisation of tomato by-products towards bioactive compounds recovery : Human health benefits. *Food Chemistry*, *410*(December 2022), 135319.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135319>

Dannehl, D., Schwend, T., Veit, D., & Schmidt, U. (2021). Increase of Yield, Lycopene, and Lutein Content in Tomatoes Grown Under Continuous PAR Spectrum LED Lighting. *Frontiers in Plant Science*, *12*(February), 1–10.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.611236>

Dong, H., Liu, X., Zhang, C., Guo, H., Liu, Y., Chen, H., Yin, R., & Lin, L. (2021). Expression of Tomato UVR8 in Arabidopsis reveals conserved photoreceptor function. *Plant Science*, *303*, 110766.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110766>

Dou, H., & Niu, G. (2019). Plant responses to light. In *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00009-1>

Fiedor, L., Zbyradowski, M., & Pilch, M. (2019). Tetrapyrrole pigments of photosynthetic antennae and reaction centers of higher plants: Structures, biophysics, functions, biochemistry, mechanisms of regulation, applications. In *Advances in Botanical Research* (1st ed., Vol. 90). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2019.04.001>

Fujiwara, K. (2020). Light sources. In *Plant Factory* (pp. 139–151). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00008-X>

- Fukuda, N. (2019). Plant Growth and Physiological Responses to Light Conditions. In *Plant Factory Using Artificial Light* (pp. 71–77). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00008-7>
- Gajc-wolska, J., Kowalczyk, K., Przybysz, A., Mirgos, M., & Orliński, P. (2021). Photosynthetic efficiency and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under HPS and LED lighting in autumn–winter cultivation. *Plants*, *10*(10). <https://doi.org/10.3390/plants10102042>
- Greer, D. H., Sciences, W., Bittisnich, D., Fukai, S., Beadle, C., Clearwater, M., & Kriedemann, P. (2017). Chapter 12 - Sunlight and plant production. *Plants in Action*, 1–58.
- Hart, J. E., & Gardner, K. H. (2021). Lighting the way: Recent insights into the structure and regulation of phototropin blue light receptors. *Journal of Biological Chemistry*, *296*, 100594. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2021.100594>
- Hasan, M., Bashir, T., & Ghosh, R. (2017). An Overview of LEDs ' Effects on the Production of Bioactive Compounds and Crop Quality. *Molecules*, *22*, 1–12. <https://doi.org/10.3390/molecules22091420>
- Hasperué, J. H., Rodoni, L. M., Guardianelli, L. M., Chaves, A. R., & Martínez, G. A. (2016). Use of LED light for Brussels sprouts postharvest conservation. *Scientia Horticulturae*, *213*, 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.004>
- Hernández, R., & Kubota, C. (2014). Growth and morphological response of cucumber seedlings to supplemental red and blue photon flux ratios under varied solar daily light integrals. *Scientia Horticulturae*, *173*, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.035>
- Huang, M. Y., Lin, K. H., Lu, C. C., Chen, L. R., Hsiung, T. C., & Chang, W. T. (2017). The intensity of blue light-emitting diodes influences the antioxidant properties and sugar content of oyster mushrooms (*Lentinus sajor-caju*). *Scientia Horticulturae*, *218*, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.014>

- Huché-Théliér, L., Crespel, L., Gourrierc, J. Le, Morel, P., Sakr, S., & Leduc, N. (2016). Light signaling and plant responses to blue and UV radiations- Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.009>
- 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>
- Jarerat, A., Techavuthiporn, C., Chanchomsuek, C., & Nimitkeatkai, H. (2022). Enhancement of Antioxidant Activity and Bioactive Compounds in Eggplants Using Postharvest LEDs Irradiation. *Horticulturae* 2022, 8(2), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/horticulturae8020134>
- Jensen, N. B., Clausen, M. R., & Kjaer, K. H. (2018). Spectral quality of supplemental LED grow light permanently alters stomatal functioning and chilling tolerance in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Scientia Horticulturae*, 227(May 2017), 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.011>
- Ji, Y., Nu, D., Choe, D., Larsen, D. H., & Marcelis, L. F. M. (2020). *Far-red radiation stimulates dry mass partitioning to fruits by increasing fruit sink strength in tomato*. <https://doi.org/10.1111/nph.16805>
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., & Yoshihara, T. (2010). *Blue Light-emitting Diode Light Irradiation of Seedlings Improves Seedling Quality and Growth after Transplanting in Red Leaf Lettuce*. 45(12), 1809–1814.
- Kalaitzoglou, P., Taylor, C., Calders, K., Hogervorst, M., van Ieperen, W., Harbinson, J., de Visser, P., Nicole, C. C. S., & Marcelis, L. F. M. (2021). Unraveling the effects of blue light in an artificial solar background light on growth of tomato plants. *Environmental and Experimental Botany*, 184(January), 104377. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104377>
- Kim, H. J., Yang, T., Choi, S., Wang, Y. J., Lin, M. Y., & Liceaga, A. M. (2020a). Supplemental intrac canopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*,

- 261(November 2019), 108985.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108985>
- Kim, H. J., Yang, T., Choi, S., Wang, Y. J., Lin, M. Y., & Liceaga, A. M. (2020b). Supplemental intrac canopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 261(May), 108985. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108985>
- Lazzarin, M., Meisenburg, M., Meijer, D., van Ieperen, W., Marcelis, L. F. M., Kappers, I. F., van der Krol, A. R., van Loon, J. J. A., & Dicke, M. (2021). LEDs Make It Resilient: Effects on Plant Growth and Defense. *Trends in Plant Science*, 26(5), 496–508. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.11.013>
- Li, Y., Liu, C., Shi, Q., Yang, F., & Wei, M. (2021a). Mixed red and blue light promotes ripening and improves quality of tomato fruit by influencing melatonin content. *Environmental and Experimental Botany*, 185(December 2020), 104407. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104407>
- Li, Y., Liu, Z., Shi, Q., Yang, F., & Wei, M. (2021b). Mixed red and blue light promotes tomato seedlings growth by influencing leaf anatomy, photosynthesis, CO₂ assimilation and endogenous hormones. *Scientia Horticulturae*, 290(61), 110500. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110500>
- Li, Y., Xin, G., Liu, C., Shi, Q., Yang, F., & Wei, M. (2020). Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO₂ assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings. *BMC Plant Biology*, 20(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02523-z>
- Li, Y., Xin, G., Wei, M., Shi, Q., Yang, F., & Wang, X. (2017). Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities. *Scientia Horticulturae*, 225(July), 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.053>
- Liang, Y., Kang, C., Kaiser, E., Kuang, Y., Yang, Q., & Li, T. (2021). Red/blue light ratios induce morphology and physiology alterations differently in cucumber

- and tomato. *Scientia Horticulturae*, 281(January), 109995. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109995>
- Loi, M., Villani, A., Paciolla, F., Mulè, G., & Paciolla, C. (2021). Challenges and opportunities of light-emitting diode (Led) as key to modulate antioxidant compounds in plants. a review. *Antioxidants*, 10(1), 1–35. <https://doi.org/10.3390/antiox10010042>
- Lu, N. (2021). Light environment and plant growth in plant factories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 686(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/686/1/012002>
- Manikandan, M., Nirmal, D., Ajayan, J., Mohankumar, P., Prajoun, P., & Arivazhagan, L. (2019). A Review of Blue Light Emitting Diodes for Future Solid State Lighting. *Superlattices and Microstructures*, 106294. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.106294>
- Mavi, H. S., & Tupper, G. J. (2020). Solar Radiation and Its Role in Plant Growth. *Agrometeorology*, 25–54. <https://doi.org/10.1201/9781482277999-8>
- Meijer, D., Meisenburg, M., van Loon, J. J. A., & Dicke, M. (2022). Effects of low and high red to far-red light ratio on tomato plant morphology and performance of four arthropod herbivores. *Scientia Horticulturae*, 292(August 2021), 110645. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110645>
- Miao, Y., Chen, Q., Qu, M., Gao, L., & Hou, L. (2019). Blue light alleviates 'red light syndrome' by regulating chloroplast ultrastructure, photosynthetic traits and nutrient accumulation in cucumber plants. *Scientia Horticulturae*, 257(July), 108680. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108680>
- Mitchell, C. A., & Sheibani, F. (2019). LED advancements for plant-factory artificial lighting. In *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00010-8>
- Nadalini, S., & Andreotti, C. (2017). *Effects of blue and red LED lights on soilless*

- cultivated strawberry growth performances and fruit quality. February.*
<https://doi.org/10.17660/eJHS.2017/82.1.2>
- Nagata, M., & Yamashita, I. (1992). Simple Method for Simultaneous Determination of Chlorophyll and Carotenoids in Tomato Fruit. *NIPPON SHOKUJIN KOGYO GAKKAISHI*, 39(10), 925–928.
<https://doi.org/10.3136/nskkk1962.39.925>
- Ngcobo, B. L., & Bertling, I. (2021). *The effect of the postharvest red and blue LED light exposure on the quality of cherry tomato. December.*
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1329.22>
- Nicholsa, M. (2017). LEDs (light emitting diodes) in horticulture. *Acta Horticulturae*, 1176, 23–24. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1176.4>
- Ntagkas, N., de Vos, R. C. H., Woltering, E. J., Nicole, C. C. S., Labrie, C., & Marcelis, L. F. M. (2020). Modulation of the tomato fruit metabolome by LED light. *Metabolites*, 10(6), 1–19. <https://doi.org/10.3390/metabo10060266>
- Ntagkas, N., Woltering, E., Nicole, C., Labrie, C., & Marcelis, L. F. M. (2019). Light regulation of vitamin C in tomato fruit is mediated through photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 158, 180–188.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.12.002>
- Oka, Y., & Yamamoto, K. (2018). Photoreceptor-Mediated Plant Development. *Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation*, 111–117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00011-7>
- Olugbenga, O. A., & Oluwatoyin, A. O. (2021). Natural Plant Pigments and Derivatives in Functional Foods Developments. *Eurasian Journal of Food Science and Technology*, 5(1), 25–40.
- Paik, I., & Huq, E. (2019). Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 92(April), 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>

- Paponov, M., Kechasov, D., Lacek, J., Verheul, M. J., & Paponov, I. A. (2020). Supplemental Light-Emitting Diode Inter-Lighting Increases Tomato Fruit Growth Through Enhanced Photosynthetic Light Use Efficiency and Modulated Root Activity. *Frontiers in Plant Science*, 10(January), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01656>
- Park, Y., & Runkle, E. S. (2017). Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. In *Environmental and Experimental Botany* (Vol. 136). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.013>
- Pashkovskiy, P., Kreslavski, V., Khudyakova, A., Ashikhmin, A., Bolshakov, M., Kozhevnikova, A., Kosobryukhov, A., Kuznetsov, V. V., & Allakhverdiev, S. I. (2021). Effect of high-intensity light on the photosynthetic activity, pigment content and expression of light-dependent genes of photomorphogenetic *Solanum lycopersicum* hp mutants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167(July), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.033>
- Pattison, P. M., Tsao, J. Y., Brainard, G. C., & Bugbee, B. (2018). LEDs for photons, physiology and food. *Nature*, 563(7732), 493–500. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0706-x>
- Paucek, I., Pennisi, G., Pistillo, A., Appolloni, E., Crepaldi, A., Calegari, B., Spinelli, F., Cellini, A., Gabarrell, X., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2020). Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the mediterranean. *Agronomy*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy10071002>
- Pierik, R., & Ballaré, C. L. (2021). Control of Plant Growth and Defense by Photoreceptors: From Mechanisms to Opportunities in Agriculture. *Molecular Plant*, 14(1), 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.11.021>
- Polívka, T., & Frank, H. A. (2010). Light Harvesting by Carotenoids. *Accounts of Chemical Research*, 43(8), 1125–1134.
- Qian, C., Chen, Z., Liu, Q., Mao, W., Chen, Y., Tian, W., Liu, Y., Han, J., Ouyang,

- X., & Huang, X. (2020). Coordinated Transcriptional Regulation by the UV- B Photoreceptor and Multiple Transcription Factors for Plant UV-B Responses. *Molecular Plant*, 13(5), 777–792. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.02.015>
- Rabara, R. C., Behrman, G., Timbol, T., & Rushton, P. J. (2017). Effect of spectral quality of monochromatic LED lights on the growth of artichoke seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 8(February), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00190>
- Roeber, V. M., Bajaj, I., Rohde, M., Schmülling, T., & Cortleven, A. (2021). Light acts as a stressor and influences abiotic and biotic stress responses in plants. *Plant Cell and Environment*, 44(3), 645–664. <https://doi.org/10.1111/pce.13948>
- Samuolienė, G., Viršilė, A., Brazaitytė, A., Jankauskienė, J., Sakalauskienė, S., Vaštakaitė, V., Novičkovas, A., Viškelienė, A., Sasnauskas, A., & Duchovskis, P. (2017). Blue light dosage affects carotenoids and tocopherols in microgreens. *Food Chemistry*, 228, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.144>
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Sader*, 1–218. <https://drive.google.com/file/d/1jVWS4EFKK7HGwQOBpGeljUyaDT8X8lyz/view>
- Shafiq, I., Hussain, S., Raza, M. A., Iqbal, N., Asghar, M. A., Raza, A., FAN, Y., Mumtaz, M., Shoaib, M., Ansar, M., Manaf, A., Yang, W., & Yang, F. (2021). Crop photosynthetic response to light quality and light intensity. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(1), 4–23. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63227-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63227-0)
- Singh, A. K., Rana, H. K., & Pandey, A. K. (2020). Analysis of chlorophylls. In *Recent Advances in Natural Products Analysis*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00019-6>
- Singh, V., Rayal, I., & Sharma, H. (2020). Solar radiation and light materials

- interaction. In *Energy Saving Coating Materials*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822103-7/00001-7>
- Song, K., Taghipour, F., & Mohseni, M. (2019). Science of the Total Environment Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). *Science of the Total Environment*, 665, 1103–1110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.041>
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134–154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Stuemky, A., & Uchanski, M. E. (2020). Supplemental light-emitting diode effects on the growth, fruit quality, and yield of two greenhouse-grown strawberry (*fragaria xananassa*) cultivars. *HortScience*, 55(1), 23–29. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14113-19>
- Sun, W., Xu, X. H., Lu, X., Xie, L., Bai, B., Zheng, C., Sun, H., He, Y., & Xie, X. Z. (2017). The Rice Phytochrome Genes, PHYA and PHYB, Have Synergistic Effects on Anther Development and Pollen Viability. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06909-2>
- Swami, S. (2017). *Natural Resource Management for Climate Smart Sustainable Agriculture Sanjay Arora Sanjay Swami Suraj Bhan Editors NASC Complex , Pusa , New Delhi - 110012* (Issue June).
- Taulavuori, K., Hyöky, V., Oksanen, J., Taulavuori, E., & Julkunen-tiitto, R. (2015). Species-specific differences in synthesis of flavonoids and phenolic acids under increasing periods of enhanced blue light. *Elsevier B.V.* <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.002>
- Thomas, S. D., Jessica, C., Jos, B., Crespel, L., Morel, P., Huch, L., Alain, B., Vincent, V., Leduc, N., & Sakr, S. (2015). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Elsevier B.V.* <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>

- Tripathi, S., Hoang, Q. T. N., Han, Y. J., & Kim, J. II. (2019). Regulation of photomorphogenic development by plant phytochromes. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(24), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ijms20246165>
- Tungmunnithum, D., Thongboonyou, A., Pholboon, A., & Yangsabai, A. (2018). Flavonoids and Other Phenolic Compounds from Medicinal Plants for Pharmaceutical and Medical Aspects: An Overview. *Medicines*, 5(3), 93. <https://doi.org/10.3390/medicines5030093>
- Viršilė, A., Samuolienė, G., Miliauskienė, J., & Duchovskis, P. (2019). Applications and advances in LEDs for horticulture and crop production. In *Ultraviolet LED Technology for Food Applications: From Farms to Kitchens*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817794-5.00003-0>
- Wang, Q., Zuo, Z., Wang, X., Liu, Q., Gu, L., Oka, Y., & Lin, C. (2018). Beyond the photocycle — how cryptochromes regulate photoresponses in plants? *Current Opinion in Plant Biology*, 45, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.05.014>
- Xie, B. X., Wei, J. J., Zhang, Y. T., Song, S. W., Su, W., Sun, G. W., Hao, Y. W., & Liu, H. C. (2019). Supplemental blue and red light promote lycopene synthesis in tomato fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 590–598. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62062-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62062-3)
- Xu, J., Guo, Z., Jiang, X., Ahammed, G. J., & Zhou, Y. (2021). Light regulation of horticultural crop nutrient uptake and utilization. *Horticultural Plant Journal*, 7(5), 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.01.005>
- Yamori, W. (2019). Photosynthesis and respiration. In *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00012-1>
- Yang, X., Xu, H., Shao, L., Li, T., Wang, Y., & Wang, R. (2018). Response of photosynthetic capacity of tomato leaves to different LED light wavelength. *Environmental and Experimental Botany*, 150(March), 161–171.

<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.013>

- Yu, Z., & Dahlgren, R. A. (2000). Polyphenols in Conifer Foliage. *Journal of Chemical Ecology*, 26(9), 2119–2140.
- Zapata-Sifuentes, G., Hernandez-Montiel, L. G., Saenz-Mata, J., Fortis-Hernandez, M., Blanco-Contreras, E., Chiquito-Contreras, R. G., & Preciado-Rangel, P. (2022). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Improve Growth and Fruit Quality of Cucumber under Greenhouse Conditions. *Plants*, 11(12), 1612. <https://doi.org/10.3390/plants11121612>
- Zhang, S., Ma, J., Zou, H., Zhang, L., Li, S., & Wang, Y. (2020). The combination of blue and red LED light improves growth and phenolic acid contents in *Salvia miltiorrhiza* Bunge. *Industrial Crops and Products*, 158(July), 112959. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112959>
- Zheng, S. (2018). IT Networks and Plant Factories. *Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation*, 211–226. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00020-8>
- Zou, J., Zhou, C., Xu, H., Cheng, R., Yang, Q., & Li, T. (2020). The effect of artificial solar spectrum on growth of cucumber and lettuce under controlled environment. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(8), 2027–2034. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63209-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63209-9)