

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FLUJO FOTÓNICO FOTOSINTÉTICO Y LA
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA
PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS HORTÍCOLAS EN SISTEMAS VERTICALES
DE INTERIOR

Tesis

Que presenta DEYALEM YAZMIN ADAME ADAME
Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

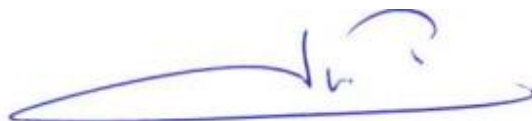
Saltillo, Coahuila.

Noviembre 2023.

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FLUJO FOTÓNICO FOTOSINTÉTICO Y LA
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA
PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS HORTÍCOLAS EN SISTEMAS VERTICALES
DE INTERIOR

Tesis

Elaborada por DEYALEM YAZMIN ADAME ADAME como requisito parcial para
obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS
DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del comité de asesoría.



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Director de Tesis



Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Asesor



Dr. Martin Cadena Zapata

Asesor



Dra. Lluvia de Abril Alexandra Soriano Melgar

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado

UAAAN

Saltillo, Coahuila.

Noviembre 2023.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por las instalaciones, docentes y programas que ofrece, que permitieron llevar a cabo mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado, permitiéndome concluir este proyecto y los estudios de maestría.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por la invaluable disposición, tiempo, paciencia, apoyo y sobre todo por el conocimiento compartido, asimismo por el material y herramientas brindadas para la realización de este proyecto.

A la Dra. Daniela Alvarado Camarillo por el espacio y material otorgado para la realización de este proyecto, también por la orientación, conocimiento y el apoyo recibido en todo momento.

A la Dra. Lluvia de Abril Soriano Melgar por la disposición en el aporte de conocimientos y revisión de este proyecto.

Al Dr. Martin Cadena Zapata por los conocimientos, disposición, apoyo y revisión de este mismo.

A Karma Verde Fresh, quién fue el patrocinador de la tecnología para el establecimiento del sistema de agricultura vertical, gracias a: Leo Lobato Kelly, Co fundador y CEO; Rafael Cuellar, Co fundador y presidente y Kenneth Moskal CEO y Socio.

Al M.C Etelberto Cortez Quevedo por colaborar y apoyar en algunos procedimientos de laboratorio.

A los compañeros que prestaron servicio social por el apoyo en la realización de actividades relacionadas a este proyecto.

DEDICATORIAS

A Dios por darme vida, salud, fortaleza y proveerme de todo lo necesario.

A mi madre por estar siempre conmigo, por su amor y apoyo incondicional sin el cual esto no hubiera sido posible.

A mi esposo por el proyecto de vida juntos, por el amor, motivación y apoyo constante demostrado en toda circunstancia.

A mi hijo Diego por llenarme de alegrías, fuerzas y amor.

A mi hermano Juan que ha sido un gran apoyo, siempre mostrando fortaleza y disponibilidad de ayudar especialmente en los momentos difíciles.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE CUADROS.....	x
RESUMEN.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
Hipótesis.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
Botánica del tomate y pimiento.....	5
Importancia socioeconómica.....	5
Germinación de semillas.....	6
Producción de plántulas.....	7
Sistemas agrícolas verticales de interior.....	8
Solución nutritiva y conductividad eléctrica.....	8
Iluminación LED.....	9
Calidad e intensidad de luz.....	10
Fotorreceptores.....	11
Fitocromos.....	12

Criptocromos.....	12
Fototropinas.....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Sitio de estudio	14
Material vegetal y siembra.	14
Sistema de cultivo vertical de interior y condiciones de cultivo.....	14
Diseño experimental y análisis estadístico	15
Tratamientos de intensidad de radiación y solución nutritiva	15
Parámetros de crecimiento	17
Extracción de clorofila.....	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
Acumulación de biomasa.....	19
Relación parte aérea/raíz.....	23
Altura de plántula	24
Longitud de tallo.....	25
Diámetro de tallo.....	26
Biomasa de hojas	30
Número de hojas.....	30
Acumulación de biomasa y crecimiento en raíz.....	34
Contenido de clorofila	37
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución espectral de luz en lámparas LED registrada con un espectrorradiómetro a 30 cm de distancia. (A) = 11.5 % azul, 26 % verde, 62.5 % luz roja. (B) = 11.6% azul, 26.4% verde, 62% luz roja. (C) = 11.7 % azul, 26.7 % verde, 61.6 % luz roja. 17

Figura 2. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco total (A), peso seco total (B), peso fresco de tallo(C) y peso seco de tallo (D) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical de interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 21

Figura 3. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco total (A), peso seco total (B), peso fresco de tallo (C) y peso seco de tallo (D) en plántulas de pimiento cultivadas en un sistema vertical de interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 22

Figura 4. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre la relación parte aérea/raíz (A), altura de planta (B), longitud de tallo (C) y diámetro de tallo (D) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 28

Figura 5. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre la relación parte aérea/raíz (A), altura de planta (B), longitud de tallo (C) y diámetro de tallo (D) en plántulas de pimiento cultivadas en un sistema vertical de interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la

media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 29

Figura 6. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco de hoja (A), peso seco de hoja (B) y número de hojas (C) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 32

Figura 7. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco de hoja (A), peso seco de hoja (B) y número de hojas (C) en plántulas de pimiento cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 33

Figura 8. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz peso fresco de raíz (A), volumen de raíz (B), peso seco de raíz (C) y longitud de raíz (D) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 35

Figura 9. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz peso fresco de raíz (A), volumen de raíz (B), peso seco de raíz (C) y longitud de raíz (D) en plántulas de pimiento cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 36

Figura 10. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre clorofila a (A), clorofila b (B) y clorofila total (C) en plántulas de tomate

cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 39

Figura 11. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre clorofila a (A), clorofila b (B) y clorofila total (C) en plántulas de pimiento cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$ 40

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos evaluados. 16

Cuadro 2. Caracterización espectral de lámparas LED, densidad de flujo fotónico fotosintético (DFFF) y balance de luz azul, verde y roja. 16

RESUMEN

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FLUJO FOTÓNICO FOTOSINTÉTICO Y LA
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA
PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS HORTÍCOLAS EN SISTEMAS VERTICALES
DE INTERIOR

POR

DEYALEM YAZMIN ADAME ADAME

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR - DIRECTOR

SALTILLO, COAHUILA

NOVIEMBRE 2023.

RESUMEN

Los sistemas verticales de interior con iluminación artificial producida por diodos emisores de luz (LED) representan una fuente de alimentos alternativa a la agricultura convencional. Para asegurar el éxito de las cosechas, es primordial obtener plántulas de calidad. El tomate y pimiento figuran entre las especies de mayor importancia a nivel mundial, en el presente trabajo se implementó la producción de plántula de ambas especies con el objetivo de comparar su producción en invernadero con la de un sistema vertical de interior con iluminación artificial LED, así mismo, definir la densidad de flujo fotónico fotosintético (DFFF) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva óptimas para el crecimiento vegetativo en plántulas. Se evaluaron tres diferentes DFFF en el sistema vertical, $511 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y otro de $376 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ubicado en invernadero bajo luz natural, se aplicó solución nutritiva Steiner a CE de 1.6 dS m^{-1} , 2.0 dS m^{-1} y 2.4 dS m^{-1} . La mayor acumulación de biomasa total en tomate y pimiento se vio favorecida en el sistema vertical, en tomate bajo una DFFF $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 2.0 dS m^{-1} , mientras que en pimiento una DFFF $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 2.4 dS m^{-1} . En tomate, las plántulas crecidas en invernadero obtuvieron una mayor relación parte aérea/raíz sin efecto de la CE, en pimiento a una DFFF $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 1.6 dS m^{-1} , indicando que el desarrollo de raíz fue inferior a la parte aérea siendo esto desfavorable, generando plántulas de mala calidad. Por otra parte, la mayor acumulación de biomasa y crecimiento de raíz en tomate se obtuvo a CE 1.6 y 2.0 dS m^{-1} y una DFFF $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en pimiento una DFFF $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ lo favoreció, sin embargo, la CE no tuvo efectos significativos. En general las plántulas crecidas en invernadero tuvieron un crecimiento inferior a las del sistema vertical y la CE no tuvo ningún efecto, las plántulas de tomate se vieron favorecidas bajo una DFFF $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 2.0 dS m^{-1} , en plántulas de pimiento una DFFF $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 2.4 dS m^{-1} promovió el crecimiento vegetativo generando plántulas de calidad.

Palabras clave: densidad de flujo fotónico fotosintético, conductividad eléctrica, sistema vertical, LED, invernadero.

ABSTRACT

EFFECT OF PHOTOSYNTHETIC PHOTON FLUX DENSITY AND
ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE NUTRIENT SOLUTION ON THE
PRODUCTION OF HORTICULTURAL SEEDLINGS IN INDOOR VERTICAL
SYSTEMS

BY

DEYALEM YAZMIN ADAME ADAME

MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING IN PRODUCTION SYSTEMS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR – ADVISOR-

SALTILLO, COAHUILA.

NOVEMBER 2023.

ABSTRACT

Indoor vertical systems with artificial lighting produced by light-emitting diodes (LEDs) represent an alternative food source to conventional agriculture. To ensure the success of the crops, it is essential to obtain quality seedlings. Tomato and pepper are among the most important species worldwide. In this work, seedling production of both species was implemented with the aim of comparing their production in a greenhouse with that of an indoor vertical system with artificial LED lighting. Likewise, define the optimal photosynthetic photonic flux density (PPFD) and electrical conductivity (EC) of the nutrient solution for vegetative growth in seedlings. Three different PPFD were evaluated in the vertical system, $511 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and another of $376 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ located in the greenhouse under natural light, Steiner nutrient solution was applied at EC of 1.6 dS m^{-1} , 2.0 dS m^{-1} and 2.4 dS m^{-1} . The greatest accumulation of total biomass in tomato and pepper was favored in the vertical system, in tomato under a PPFD $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and CE 2.0 dS m^{-1} , while in pepper a PPFD $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and CE 2.4 dS m^{-1} . In tomato, seedlings grown in the greenhouse obtained a higher aerial/root ratio without effect of EC, in pepper at a PPFD $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and EC 1.6 dS m^{-1} , indicating that root development was lower than the aerial part, this being unfavorable, generating poor quality seedlings. On the other hand, the greatest accumulation of biomass and root growth in tomato was obtained at EC 1.6 and 2.0 dS m^{-1} and a PPFD $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, in pepper a PPFD $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ favored it, however, the EC did not have significant effects. In general, the seedlings grown in the greenhouse had lower growth than those in the vertical system and the EC had no effect, the tomato seedlings were favored under a PPFD $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and EC 2.0 dS m^{-1} , in pepper seedlings, a PPFD $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and EC 2.4 dS m^{-1} promoted vegetative growth, generating quality seedlings.

Keywords: photosynthetic photonic flux density, electrical conductivity, vertical system, LED, greenhouse.

INTRODUCCIÓN

El tomate y el pimiento son los cultivos hortícolas de mayor importancia por su alto consumo y rentabilidad económica. Estos cultivos se consideran los de mayor crecimiento mundial entre otras hortalizas (FAO, 2020). En México, el tomate y el pimiento se encuentran entre las principales hortalizas de consumo en fresco o bien como productos industrializados (SIAP, 2021).

Ambos cultivos se propagan de manera sexual utilizando semillas (Verhoeven *et al.*, 2021). Una buena germinación junto con un adecuado manejo nutricional, entre otros factores abióticos, generan plántulas sanas y vigorosas que se pueden adaptar con éxito al trasplante y establecerse rápidamente desarrollando plantas productivas, es el punto de partida para obtener una buena producción y alcanzar el máximo rendimiento de los cultivos (Reed *et al.*, 2022).

La producción de plántulas es una práctica rentable económicamente, en la que los productores buscan mediante la manipulación y la conducción de las plantas, promover el desarrollo vegetativo y radical, lo cual dará como resultado unas plántulas de buena calidad para ser trasplantadas y, en consecuencia, lograr con éxito la cosecha final (Liriano *et al.*, 2017).

La producción de plántulas de baja calidad es un problema notable al momento de la comercialización de éstas y al momento de establecerlas en campo, ya que las plántulas son más susceptibles a los patógenos y tienen una menor capacidad de adaptación al ser trasplantadas; lo que representa una pérdida económica para el productor (Yucailla, 2022).

La producción de cultivos a campo abierto o en invernadero presenta ciertas dificultades entre ellas que el crecimiento y reproducción de las plántulas están sujetas a los cambios estacionales, debido a que las respuestas fisiológicas dependen en gran parte de las señales espectrales que emite la radiación solar (Kotilainen *et al.*, 2020). Durante el verano, las plantas se exponen a estrés abiótico causado por temperaturas altas asociadas a una alta intensidad de luz, esta puede tener efectos negativos, especialmente si se combina con un estrés hídrico afectando mayormente a los cultivos sensibles como lo son las plántulas jóvenes. Por el contrario, en invierno las plantas suelen verse afectadas por bajas

intensidades de luz y bajas temperaturas, lo que genera plantas de menor biomasa y alargadas (Ferrante y Mariani, 2018).

La agricultura moderna está aplicando tecnologías avanzadas en el cultivo de plantas en condiciones controladas y sistemas de cultivos de alta densidad con lo que se garantiza una alta producción incluso si los factores ambientales exteriores son desfavorables (Paradiso y Proietti, 2021). La agricultura vertical con iluminación artificial es un biosistema agrícola en los que se realiza la producción de plantas integrando una infraestructura cerrada y controlada, en la cual se implementan técnicas de iluminación e hidropónicas, uso de aire acondicionado y utilizan dispositivos tecnológicos de control, garantizando el uso eficiente de los recursos y el cuidado del medio ambiente (Flores, 2020).

La agricultura vertical con iluminación artificial fue desarrollada con éxito en China, Japón y Estados Unidos de América (EUA), es el resultado de la investigación y desarrollo de tecnología que actualmente se aplica a nivel comercial. En México, esta tecnología aún está limitada a proyectos de investigación (Flores *et al.*, 2022). La agricultura o las granjas verticales con iluminación artificial permiten una producción a gran escala ya que se implementan técnicas hidropónicas y se optimiza el uso de terreno, pudiéndose obtener productos frescos locales de fácil comercialización y libres de pesticidas (Asprilla y Morales, 2020).

Para la agricultura vertical con iluminación artificial, la luz (intensidad, calidad y duración) es un parámetro clave para el éxito de estos sistemas (Paradiso y Proietti, 2021). La iluminación artificial a base de lámparas LED tienen características de una larga vida funcional, no generan alta temperatura y tienen un bajo consumo de energía (Flores, 2021; Hernández y Kubota, 2012). La intensidad y calidad de luz, en interacción con otros parámetros ambientales y el manejo agronómico, determinan el comportamiento de la planta. La luz proporciona energía para la fotosíntesis, regulando el metabolismo de las plantas (Paradiso y Proietti, 2021).

Otro aspecto para considerar seriamente en estos sistemas es la técnica hidropónica; mediante ella se aplica una solución nutritiva cuyo manejo y

formulación afecta directamente el estado nutrimental de las plantas (López, 2018). En las soluciones nutritivas se encuentran disueltos y disponibles iones inorgánicos de elementos esenciales y micronutrientes (Steiner, 1968). La CE de la solución permite regular la nutrición del cultivo, de tal manera que se pueda obtener un desarrollo favorable sin deficiencias (De la Rosa *et al.*, 2018). En un estudio de tomate bola y silvestre, se aplicó la solución Steiner a diferentes CE (2.0, 2.5 y 3.9 dS m⁻¹), reportándose que las características fisicoquímicas del fruto fueron diferentes para cada CE (Martínez *et al.*, 2017).

Debido a que el tomate se cultiva en todo el mundo y todo el año, su importancia ha hecho que las plántulas de esta especie sean modelo de investigación en sistemas controlados con luz artificial, con el fin de producir a gran escala, mejorar el crecimiento, buena calidad y alto rendimiento durante todo el año (Fan *et al.*, 2013).

Los sistemas verticales de interior con iluminación artificial LED son factibles para aumentar la productividad, reducir la incidencia de plagas, enfermedades y evitar los eventos climáticos extremos (Avendaño *et al.*, 2023). En un futuro la agricultura tradicional podría ser reemplazada parcialmente por la producción en granjas verticales con iluminación LED y técnicas hidropónicas ya que muestran potencial como una técnica de agricultura sostenible, pudiendo ser la principal fuente de alimentos con beneficios sociales y económicos (Sill y Serbin, 2018).

Las lámparas LED tienen entre otras ventajas, el permitir adaptar el espectro de luz y regular su intensidad o radiación en función de los requerimientos de cada cultivo y la etapa de desarrollo (Paradiso y Proietti, 2021). Existen estudios que evaluaron la intensidad de luz y el fotoperiodo en el crecimiento de plántulas, resultando que éstas mejoraron al aplicar luz artificial suplementaria (Aguirre *et al.*, 2020). En otro estudio se logró determinar cómo las diferentes combinaciones de intensidad de luz y fotoperiodo afectaron la morfología y eficiencia fisiológica de las plántulas de pimiento dentro de una integral de luz diaria (DLI), que van desde 8.6 hasta 22.68 mol m⁻² d⁻¹, siendo la de 10.08 y 11.52 mol m⁻² d⁻¹ las que indujeron las mejores características de altura, diámetro de tallo y área foliar (Félix *et al.*, 2022). En fresa, se observó que al aplicar 20% de luz verde (GL) de

la intensidad de luz total, benefició el crecimiento y productividad de las plantas, mejorando la fotosíntesis reflejada en una mayor acumulación de biomasa; sin embargo, aumentar la GL al 27% tuvo efectos negativos (Avendaño *et al.*, 2023). En el cultivo de tomate enano, durante la etapa de crecimiento vegetativo, la biomasa seca y la tasa fotosintética aumento a medida que la PPFD aumentó de 300 a 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Ke *et al.*, 2022).

Debido a la suma importancia del cultivo de tomate y pimiento, también a la poca investigación existente sobre ellos en estos novedosos sistemas verticales, se implementó el estudio de ambas especies, con el objetivo de comparar la producción de plántulas en un sistema vertical de interior con iluminación LED con la producción de plántulas en invernadero, así mismo, definir la DFFF y la CE de la solución nutritiva óptimas para el crecimiento vegetativo y desarrollo de plántulas de calidad. La hipótesis planteada fue que la DFFF y la CE de la solución nutritiva puede afectar los parámetros medidos y, por lo tanto, modificar el crecimiento de las plántulas determinando la calidad de estas mismas.

Objetivo general

Comparar la producción de plántulas de tomate y pimiento en un sistema vertical de interior con la producción de plántulas en invernadero.

Objetivos específicos

Definir la densidad de flujo fotónico fotosintético que promueve el crecimiento vegetativo de plántula.

Determinar la conductividad eléctrica de la solución nutritiva óptima que promueve el crecimiento vegetativo en plántula.

Hipótesis

Las plántulas van a crecer diferencialmente en respuesta a la densidad de flujo fotónico fotosintético y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, afectando los parámetros medidos y modificando el crecimiento de las plántulas, determinando la calidad de estas mismas.

REVISIÓN DE LITERATURA

Botánica del tomate y pimiento

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pertenece a la familia de las solanáceas, originario de la región Andina de América del sur (Panno *et al.*, 2021). Aporta a la dieta principalmente vitamina C, fósforo, potasio, licopeno y β -caroteno, flavonoides (Farooq *et al.*, 2020). Su valor nutricional reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares y hepáticas, cuyas propiedades nutricionales se mantienen incluso cuando el tomate es procesado (Srivastava y Kalpana, 2013). La planta de tomate es herbácea, con un sistema radicular conformado por raíz principal y ramificaciones, tallo anguloso y cubierto de vellosidades, al inicio es de porte erguido y se vuelve rastrero, hojas compuestas, tiene inflorescencias, el fruto generalmente al madurar es una baya globosa roja que presenta semillas pequeñas (Salim *et al.*, 2020).

El pimiento dulce (*Capsicum annum* L.) también pertenece a la familia de las solanáceas, tiene propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, ha sido asociado a la disminución del riesgo de cáncer de próstata y enfermedades cardiovasculares (Della valle *et al.*, 2020). El tallo de pimiento, al ir madurando se lignifica y se ramifica, presenta raíz pivotante, hojas lanceoladas, tienen flores hermafroditas blancas y el fruto es una baya con pericarpio de estructura hueca, que en el interior contiene semillas aplastadas en forma redonda y pequeñas (Huang *et al.*, 2014).

Importancia socioeconómica

El tomate es de los cultivos hortícolas de mayor producción, se destina para el consumo en fresco y productos procesados (Panno *et al.*, 2021). A nivel mundial los principales productores son China, China continental, India, Turquía, EUA, Italia, Egipto, España y México con el décimo lugar produciendo 4,149,240.67 toneladas para mercado nacional e internacional (FAO, 2021). En México, se destinaron 5,854.66 Ha para la siembra de tomate de exportación, produciendo 598,600.22 toneladas, con un valor de producción de \$7,334,270.15, el principal mercado de exportación es EUA. El consumo nacional se cubrió con la siembra

de 43,432.36 Ha, produciendo 2,863,166.21 toneladas, con un valor de producción de \$24,175,088.86 (SIAP, 2020).

El pimiento se consume en fresco, productos procesados, condimento y en la industria farmacéutica (Baenas et al., 2019). Los principales productores son India, Bangladesh, Tailandia, China, China continental Etiopía, Benin, Myanmar, México ha aumentado la producción llegando a ocupar el dieciseisavo lugar (FAO, 2021). En México se consignaron 2,360 Ha para la siembra de pimiento morrón de exportación, produciendo 193,166.52 toneladas, con un valor de producción de \$3,148,539.44. El principal mercado es EUA adquiriendo al menos un 99% de la producción. Para consumo nacional se sembraron 4,771.54 Ha produciendo 368,908.58 toneladas, con un valor de producción de \$5,391,819.55 (SIAP, 2020).

Germinación de semillas

El tomate y pimiento pueden ser reproducidos de manera asexual, hasta ahora utilizado para fines de investigación, sin embargo, la forma más utilizada es por semilla, esta técnica utilizada para fines de comercialización (Al-Kurtany *et al.*, 2023).

La semilla es una estructura vegetal que contiene un embrión, bajo condiciones adecuadas da origen a una nueva planta, a estas se les da un tratamiento y selección previa, para tener semillas libres de enfermedades y con alta tasa de germinación (Rifna *et al.*, 2019), su vigor y genética en interacción con las condiciones ambientales determinan la duración y éxito del establecimiento de cultivos (Reed *et al.*, 2022). Un aspecto deseable es que la emergencia sea uniforme, algunos de los múltiples factores que afectan son la profundidad de siembra y la temperatura del sustrato.

En tomate se recomienda una temperatura de 25 °C y una profundidad de siembra de 2 cm, bajo estas condiciones la germinación puede durar entre 3 a 5 días (Souza *et al.*, 2020). En pimiento la germinación puede ocurrir hasta los 8 días, lo ideal son temperaturas de 29 °C y una profundidad de siembra de 0.5 a 1 cm (Forigo *et al.*, 2022). Se debe evitar el estrés salino, ya que afecta

negativamente la tasa y velocidad de germinación, reduciendo su crecimiento y desarrollo (Singh *et al.*, 2012). El aumento de concentración de sales disminuye la germinación y la tolerancia al estrés salino depende en gran medida a la especie y variedad de la semilla (Chakma *et al.*, 2019).

El sustrato debe tener una alta retención de humedad, aireación e inocuo (Salkic *et al.*, 2022). Una buena retención de humedad en la germinación promueve que el agua disponible se mueva hacia los tejidos internos de la semilla modificando su metabolismo (Carrera *et al.*, 2020). Cuando la semilla absorbe agua comienzan a movilizarse las reservas, se sintetizan proteínas, la división y extensión celular rompen las cubiertas seminales terminando con la latencia y dando lugar a la emergencia de la radícula seminal (Doria, 2010).

La luz participa como una señal del ambiente que ajusta los niveles de hormonas entre el ácido abscísico y las giberelinas en el proceso de latencia y germinación (Sano y Marion, 2021). Algunas especies requieren luz moderada para germinar y al emerger, si la luz es excesiva, puede haber una quema de los brotes o si la luz es débil, puede ocurrir una etiolación (Lu *et al.*, 2021).

Producción de plántulas

Los productores buscan obtener frutos a menor tiempo, por lo que adquieren plántulas listas para el trasplante (Al-Kurtany *et al.*, 2023). La estimulación de germinación de semillas y el crecimiento de la planta, el uso reducido de agroquímicos, el aumento a la resistencia de enfermedades, ambientes inocuos, son algunos de los cuidados para obtener plántulas sanas y vigorosas (Pérez *et al.*, 2020). Obtener plántulas de calidad es importante ya que afecta el éxito del establecimiento de cultivos y el rendimiento final de las cosechas (Carrera *et al.*, 2020).

En tomate, se considera plántulas de calidad aquellas rectas y vigorosas; con una altura de 13 a 15 cm, tallos gruesos con diámetro mayor a 3 mm, tamaño de hojas uniformes de 3 a 4 hojas, buen desarrollo radicular y un característico color verde oscuro (Kim y Hwang, 2019). La temperatura del ambiente que fomenta la fotosíntesis en plantas de tomate es de 28 °C en el día y 20 °C en la noche

(Scarano *et al.*, 2020). La humedad relativa (HR) que se recomienda es del 60 a 70%, un nivel adecuado de HR ayuda a mitigar los efectos negativos de temperaturas altas, manteniendo la calidad de las plantas (Zheng *et al.*, 2020). Para obtener plántulas uniformes y de calidad en pimiento; se recomienda un manejo de temperatura de 28 °C en el día y 18 °C en la noche, la HR preferible debe mantenerse al 70% (Ding *et al.*, 2022). Se buscan diámetros no menores a 3 mm, al menos 2 hojas verdaderas bien desarrolladas, una longitud de raíz mínima de 5.6 cm y una altura de planta entre 13 a 16 cm (Carballo *et al.*, 2021). El espectro de luz que reciben las plántulas afecta su fisiología, es la fuente de energía para la fotosíntesis, cuando se desarrollan bajo una calidad e intensidad de luz adecuada la capacidad fotosintética y el crecimiento mejora (Meiramkulova *et al.*, 2021).

Sistemas agrícolas verticales de interior

Los sistemas agrícolas verticales de interior se complementan con la agricultura de precisión, la productividad de los cultivos que se obtiene es mayor que la agricultura convencional ya que la producción se extiende a una dimensión vertical y ciclos durante todo el año (Van Delden *et al.*, 2021). La radiación solar es sustituida principalmente por iluminaria LED, tienen operaciones autónomas, reducen el uso de insumos agrícolas, el clima es controlado y al ser un sistema cerrado protege a los cultivos de climas externos extremos (de Carbonnel *et al.*, 2022). Son una alternativa para producir alimentos de calidad y locales, con mayor eficiencia en el uso de agua, evitar problemas de climas extremos, plagas, enfermedades, suelos contaminados, etc. (Chowdhury *et al.*, 2020).

Solución nutritiva y conductividad eléctrica

Dentro de un sistema vertical de interior se aplican técnicas hidropónicas por medio de estas se aplican y manejan las soluciones nutritivas (Chowdhury *et al.*, 2020). En las soluciones nutritivas se encuentran disueltos y disponibles iones inorgánicos de elementos esenciales y micronutrientes que las plantas necesitan (Steiner, 1968). La CE permite monitorear y ajustar la solución nutritiva, mantener

un equilibrio ya que está relacionada con la concentración de los nutrientes que contiene (Velazquez *et al.*, 2022). Determinar la CE óptima y específica para el crecimiento de cada una de las especies de plantas, evitaría la pérdida y la deficiencia de nutrientes dentro de los sistemas verticales de interior (Hosseini *et al.*, 2021).

En plantas de rúcula crecidas en un sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique), el rendimiento y calidad aumento a CE de 1.5-1.8 dS m⁻¹, CE más bajas o altas redujeron el rendimiento, calidad y concentración de compuestos fitoquímicos (Yang *et al.*, 2021). Por otra parte, en plantas de albahaca y lechuga dentro de un sistema vertical de interior se aplicó la técnica hidropónica ebb-flow con cinco niveles de CE, las plantas tuvieron mayor crecimiento a CE de 1.2 y 0.9 dS m⁻¹ (Hosseini *et al.*, 2021).

Iluminación LED

Las granjas verticales integradas con luz artificial LED permiten la producción de plántulas debido a las condiciones controladas y acortando su ciclo de crecimiento (Chen *et al.*, 2020). Los diodos emisores de luz tienen amplias aplicaciones, su introducción a la producción agrícola en especial en hortalizas se debe a sus características, son luz fría que iluminan sin quemar plantas (Ma *et al.*, 2021). Tienen una eficiencia del 95% y un consumo de energía más bajo que el de cualquier otro tipo de lámparas, los espectros pueden ser personalizados para controlar procesos vitales de las plantas (Olle y Virsilè, 2013), permiten el manejo de la intensidad y calidad de luz, mantener luces monocromáticas o combinadas y se han utilizado como luz suplementaria o para sustituir totalmente la radiación solar (Amoozgar *et al.*, 2017).

En comparación a otro tipo de lámparas como las fluorescentes, las luces LED monocromáticas o combinadas mejoraron el estado de plántulas de papa y el número de tubérculos (Chen *et al.*, 2020).

En la producción de germinado de remolacha roja en interior bajo luz LED los factores de intensidad de luz y fotoperiodo influyeron en la eficiencia del agua (WUE), la intensidad de luz bajo mejoro la WUE un 13% en comparación a la

intensidad más alta, el fotoperiodo más corto mejoro la WUE un 30.7% que el más largo, con un resultado de 36.6 a 28.0 g FW L⁻¹ m⁻² (Hernández *et al.*, 2023). En plántulas de tomate se utilizó luz LED y se obtuvo una mejor WUE bajo LG con 13 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Lanoue *et al.*, 2018).

La iluminación LED, tiene múltiples ventajas, a pesar de eso también genera costos de manejo altos, sin embargo, pueden ser reducidos al determinar la integral de luz diaria optima y específica para cada especie, reduciendo los tiempos de cosecha (Kelly *et al.*, 2020).

Calidad e intensidad de luz.

La calidad e intensidad son dos componentes de la luz que afectan a las plantas en su fotosíntesis, morfología, fisiología y bioquímica (Shafiq *et al.*, 2021), su manejo puede tener aplicaciones para inducir un mejor rendimiento y concentración de fitonutrientes, en altas densidades de plantación (Givens *et al.*, 2023), el transporte de fotoasimilados a través de floema también se ve afectado por la intensidad y calidad de luz (Lanoue *et al.*, 2018).

La calidad de luz hace referencia a la longitud de onda que emite la fuente, para ella se hace referencia en nanómetros (nm) (He *et al.*, 2018). La densidad de flujo fotónico fotosintético, también llamada por sus siglas DFFF o bien PPFD en inglés, representa a la intensidad de luz (Ke *et al.*, 2023). La intensidad de luz regula el crecimiento y metabolismo de las plantas, se mide en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, refiriéndose a la cantidad de luz que irradia la fuente en determinada área y tiempo (Utasi *et al.*, 2023). La combinación del fotoperiodo y la intensidad de luz resultan en la integral de luz diaria (DLI) que es el flujo total de fotones fotosintéticos irradiados en un día por una fuente de luz específica, las unidades que generalmente se utilizan para representarla es $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Xu *et al.*, 2021). El manejo de la calidad, intensidad de luz y fotoperiodo se hace con el fin de dar a las plantas la suficiente energía lumínica, de lo contrario su crecimiento y reproducción pueden ser atípicas provocando desbalances fisiológicos (Darko *et al.*, 2014). Un caso de este tipo se dio en plántulas de tomate las que presentaron intumescencia; es un problema fisiológico atribuido a la deficiencia de luz UV,

ocasiona deformación y pardeamiento en hojas, por último, ocurre una defoliación (Miyama, 2022). En otros casos ocurre una activación desequilibrada de los distintos fotorreceptores, puede ocurrir una acumulación incorrecta de pigmentos fotosintéticos o un comportamiento estomático inusual, perjudicando la fotosíntesis (Yang *et al.*, 2017), en otros casos, bajo iluminación excesiva puede ocurrir una fotoinhibición (Elkins y Van Iersel, 2020).

En plántulas de lechuga, el aumento de la intensidad de luz redujo la altura de las plantas y se determinó un punto de saturación de $288 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para la misma variable (Givens *et al.*, 2023). Incluso dentro de las mismas especies las variedades tienen diferentes requerimientos de calidad de luz, en dos variedades de lechuga Carmoli y Locarno, a pesar de ser la misma especie respondieron de manera diferente a las mismas calidades de luz (Alrajhi *et al.*, 2023)

En lechuga 'Rex' y 'Rouxai', aumentar la DLI de 6.9 a $15.6 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ mejoró la calidad de las lechugas, utilizando una intensidad de luz de 120 a $270 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y fotoperíodos de 16 a 24 h d^{-1} (Kelly *et al.*, 2020).

Fotorreceptores

Los fotorreceptores están compuestos de una parte proteica unido a un pigmento “proteínas fotocromáticas” actúan como un mecanismo que monitorea y absorbe la luz (Smith, 2000).

Existen distintos tipos de fotorreceptores en las plantas, que, al detectar determinada calidad de luz, se activan (Jones, 2018). Las señalizaciones por la luz permiten que la fisiología y el desarrollo de las plantas se regulen, adaptándose a los cambios ambientales (Paink y Huq, 2019). En otras palabras, la plasticidad de las plantas se da gracias a las señales que reciben los fotorreceptores (Küpers *et al.*, 2020). El conocimiento de estos puede permitir manejar los espectros de luz con precisión para obtener el desarrollo, calidad y rendimiento deseado en los cultivos (Jones, 2018). *Arabidopsis thaliana* es la especie más comúnmente utilizada como planta modelo y algunos de los fotorreceptores detectados son; Fitocromos (PHYA-E) luz roja-roja lejana,

criptocromos (CRY1, CRY2 y CRY3), fototropinas (PHOT1 y PHOT2) para la luz azul (Pedmale *et al.*, 2016).

Fitocromos

Son fotorreceptores que detectan la luz roja/roja lejana de 600 a 750 nm, cuando reciben un estímulo de luz, regulan la división y elongación celular (Cordeiro *et al.*, 2022), por lo que están involucrados en la evitación de la sombra, tolerancia al estrés, germinación y floración (Pinho *et al.*, 2012). Las respuestas son en función a la fluencia de luz percibida, un nivel bajo $< 0.0001 \mu\text{mol m}^{-2}$ fotones respuestas no reversibles como etiolación y germinación (Zeidler, 2022). Los fitocromos en obscuridad o poca luz son monómeros inactivos, al recibir luz ocurre un cambio conformacional, este tipo de fotorreceptores interactúan con proteínas para formar complexomas (Wan y Lin, 2020), cuando están activos se estimula la síntesis de auxina (Küpers *et al.*, 2020). Una fluencia de $1\text{-}1000 \mu\text{mol m}^{-2}$ fotones generan respuestas reversibles como la síntesis de clorofila y a una alta irradiancia $>1000 \mu\text{mol m}^{-2}$ fotones las respuestas son irreversibles y proporcionales a la intensidad de luz (Bose *et al.*, 2018).

Criptocromos

Perciben la luz azul y UV, transducen las señales por interacción entre proteínas, algunas de estas son proteínas reguladoras o de acción hormonal (Wan y Lin, 2020), algunas de las respuestas de los criptocromos se relacionan con la apertura y desarrollo de estomas e inhibición de la síntesis de ácidos giberélicos, por lo que bloquea la elongación de tallo y germinación de semillas (Zhao *et al.*, 2019), gravitropismo, fototropismo, estimulación de la floración (Folta y Childers, 2008).

Fototropinas

Son receptores de la luz azul y radiación UV, estas unidas a dos proteínas de luz, oxígeno y voltaje, dos cromóforos y una kinasa, relacionadas con el fototropismo

(Zhao et al., 2019), regulando el movimiento de los órganos fotosintéticos con el fin capturar luz (Spalding y Folta, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La investigación se realizó en dos lugares dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicado en Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México. En el laboratorio de agricultura vertical del Departamento Ciencias del Suelo el cual está ubicado en la latitud N 25°35'37" y longitud O 101°03'36" a 1765 msnm y, en el área de invernaderos del Departamento de Horticultura, cuyas coordenadas son: 25°23'55" latitud N, 101°25'16" longitud O y 1763 msnm.

Material vegetal y siembra.

Se utilizó semilla de tomate variedad el CID y semilla de pimiento variedad California Wonder. Como sustrato se utilizó peat moss (Premier Sphagnum), el cual tenía un pH=4; se le aplicó bicarbonato de sodio 1 g L⁻¹ de sustrato para ajustar el pH=5.8. Posteriormente, se hizo una mezcla con perlita (Multiperl) en una relación 90:10 volumen/volumen y se humedeció. Se prosiguió con el relleno de las charolas de unicel de 200 cavidades, la dimensión de la charola fue de 67 x 33 x 6.5cm y dimensión de cavidad 2.5 x 2.5 x 0.7 cm. Las semillas de tomate y pimiento se sembraron a una profundidad aproximada de 1 cm. Por último, se acomodaron las charolas en el sistema vertical y otras en invernadero.

Sistema de cultivo vertical de interior y condiciones de cultivo.

Para el estudio se utilizó un rack de 1.72 m de largo, 0.80 m de ancho y 2.45 m de alto (Karma Verde Fresh modelo KVF7, Monterrey, México), conformado por tres niveles separados 0.45 m. Cada nivel estuvo compuesto de una bandeja de aluminio de 0.80 m de ancho, 1.72 m de largo y 0.095 m de profundidad y un área total de 1.38 m², sobrepuesta a la bandeja de aluminio una bandeja de plástico negro de acrilonitrilo butadieno estireno. En la parte superior de cada nivel se colocó el sistema de iluminación LED compuesto por seis lámparas para el primer nivel, ocho lámparas para el segundo nivel y 10 lámparas para el tercer nivel.

Durante el estudio, la temperatura promedio en el laboratorio se mantuvo en 26 °C (29°C día/18°C noche) (WatchDog modelo 1000, Spectrum Technologies Inc., Plainfield, IL, EUA) la temperatura ambiental se controló con un minisplit de 2 toneladas (Whirlpool, modelo WA5260Q, Grand Rapids, EUA), mientras que la HR se mantuvo en 60% \pm 5% controlada con un humidificador ultrasónico de 0.5 L h⁻¹ y 25 cm de diámetro (MistCloud, modelo MXCUD-001-001, México, México) y un extractor conectado a un controlador de humedad digital de enchufe programable (IHC-200, Inkbird Tech, Guangdong, China).

Diseño experimental y análisis estadístico

Cada nivel del estante contenía lámparas LED que generaban las tres intensidades de luz evaluadas en este estudio.

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente aleatorio con arreglo factorial y se emplearon tres repeticiones con 10 plántulas por repetición para ser evaluadas, aunque cada tratamiento constó de 100 plántulas. Los datos se analizaron con un análisis de varianza (SAS, 2.1, EUA) y cuando se detectó significancia, las medias se separaron mediante el procedimiento de Tukey con $p < 0.05$.

Tratamientos de intensidad de radiación y solución nutritiva

En invernadero la temperatura promedio fue 25°C y humedad relativa 70%, bajo estas condiciones se estableció el tratamiento testigo; se colocó un sensor de luz, temperatura y HR (WatchDog modelo 1000, Spectrum Technologies Inc., Plainfield, IL, EUA) la DFFF promedio de la luz natural fue de 376 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Para los tratamientos ubicados en el laboratorio de agricultura vertical; las lámparas LED (Karma Verde Fresh, Modelo 1, Monterrey, México) se caracterizaron con un espectrorradiómetro de un rango de medición de 340 a 820 nm y con una precisión de \pm 4% (Apogee Instruments, modelo SS-110, Logan, UT, EUA). La DFFF promedio por nivel; se determinó dividiendo el área completa en una cuadrícula de 18 secciones con la misma superficie, el espacio de las secciones fue 26.7 x 29.7 cm y un área de 792.9 cm²; las mediciones se hicieron

a 30 cm de la fuente de luz. Las DFFF evaluadas en este estudio fueron $511 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la aplicación de solución nutritiva con el balance de aniones y cationes de Steiner a diferentes CE: 1.6 dS m^{-1} , 2.0 dS m^{-1} y 2.4 dS m^{-1} .

La distribución espectral de las lámparas utilizadas se muestra en el Cuadro (2) y Figura (1), especificando el balance de luz azul, verde y roja. Se consideró comparable la DFFF y el balance fue muy similar.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados.

Número de tratamiento	Factores	
	DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CE (dS m^{-1})
1	376 invernadero	1.6
2		2.0
3		2.4
4	511	1.6
5		2.0
6		2.4
7	616	1.6
8		2.0
9		2.4
10	721	1.6
11		2.0
12		2.4

Cuadro 2. Caracterización espectral de lámparas LED, densidad de flujo fotónico fotosintético (DFFF) y balance de luz azul, verde y roja.

Luz azul 400–500 nm	Luz verde 500–600 nm	Luz roja 600–700 nm	DFFF	Luz azul 400–500 nm	Luz verde 500–600 nm	Luz roja 600–700 nm
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$			$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	%		
58.8	132.7	319.6	511	11.5	26	62.5
71.6	162.4	381.8	616	11.6	26.4	62.0
84.4	192.1	444.0	721	11.7	26.7	61.6

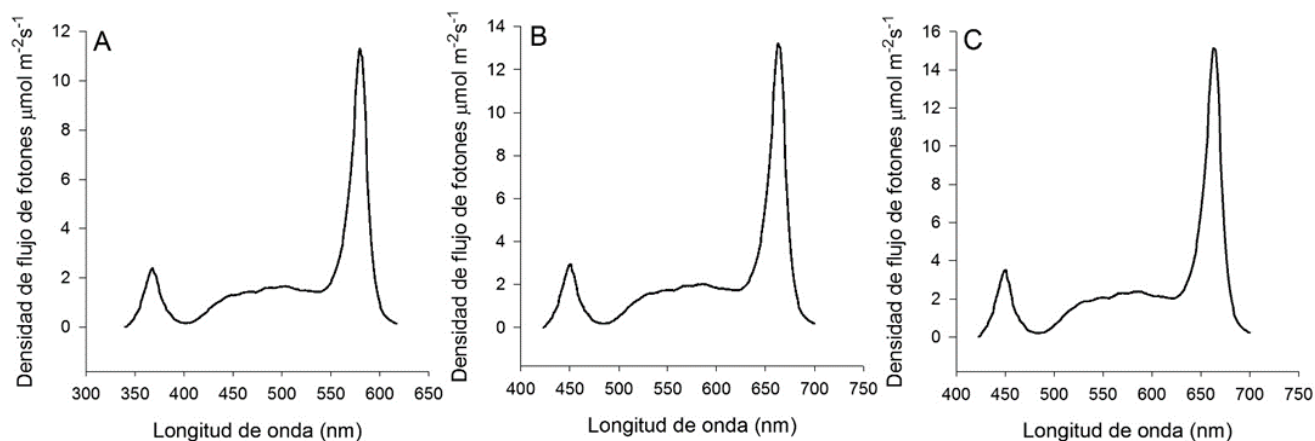


Figura 1. Distribución espectral de luz en lámparas LED registrada con un espectrorradiómetro a 30 cm de distancia. (A) = 11.5 % azul, 26 % verde, 62.5 % luz roja. (B) = 11.6% azul, 26.4% verde, 62% luz roja. (C) = 11.7 % azul, 26.7 % verde, 61.6 % luz roja.

Parámetros de crecimiento

Para determinar el peso en fresco de hojas, tallos y raíz se utilizó una balanza de precisión (AYD Weighing, modelo GF-200, EUA) y una báscula digital (MH, modelo 005, China), para la medición de altura de planta, diámetro de tallo y longitud de raíz, se utilizó un vernier digital (PUKAU, modelo Lcd pie de rey, México). Para evaluar el volumen de raíz se utilizó una probeta de laboratorio de 10 mL (B Blesya, modelo 10, México) en base al principio de Arquímedes. Para la obtención del peso seco de hojas, tallo y raíz, las muestras se colocaron en bolsas de papel Kraft del número dos, posteriormente se acomodaron en una estufa a 60 °C donde se almacenaron en un lapso de 24 horas, una vez secas se procedió a pesar cada muestra.

Extracción de clorofila

Se realizó un muestreo obteniendo la segunda hoja más joven de la plántula, por cada muestra se pesó 0.05 g de hoja en una balanza de precisión (AYD Weighing, modelo GF-200, EUA), se utilizó etanol anhidro y se alistó al 85% con agua destilada, la muestra pesada se llevó a un mortero para ser molida, una vez molida se añadió 10 mL de etanol al 85% medidos en una probeta, se mezcló hasta quedar una muestra homogénea la cual se vació a un tubo de ensaye de 15mL este fue ingresado a la centrifugadora (Hettich, EBA 21, Alemania) durante 10 minutos, una vez terminado el tiempo se procedió a realizar las lecturas en el

espectrofotómetro (Thermo Scientific, modelo Genesys 10 UV, EUA) se utilizaron celdas espectrofotométricas desechables y las lecturas realizadas fueron a 645 y 663 nm, las lecturas obtenidas se sustituyeron en las ecuaciones respectivas para obtener los contenidos de pigmentos fotosintéticos.

$$\text{Clorofila a} = (12.7 \cdot A_{663}) - (2.69 \cdot A_{645})$$

$$\text{Clorofila b} = (22.9 \cdot A_{645}) - (4.68 \cdot A_{663})$$

$$\text{Clorofila total} = \text{clorofila a} + \text{clorofila b}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acumulación de biomasa

El peso fresco total (Figura 2A), peso seco total (Figura 2B), peso fresco de tallo (Figura 2C) y peso seco de tallo (Figura 2D) en plántulas de tomate tuvieron un comportamiento similar; en las plántulas crecidas en el sistema vertical la mayor biomasa se presenta cuando la CE fue de 2.0 dS m^{-1} , sin embargo, cuando la CE se elevó a 2.4 dS m^{-1} hubo una reducción significativa. La mejor respuesta se observó cuando las plántulas fueron sometidas a una DFFF de $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En condiciones de invernadero la CE no tuvo efecto, pero en general, la biomasa fue menor en comparación con la biomasa de las plántulas con iluminación LED a bajas CE (Figura 2).

En el caso del pimiento, el peso fresco (Figura 3A) y peso seco total (Figura 3B), peso fresco de tallo (Figura 3C) y peso seco de tallo (Figura 3D) mostraron un comportamiento similar. La biomasa incrementó para las plántulas crecidas en el sistema vertical a medida que la CE se fue elevando, siendo la mayor acumulación a una CE de 2.4 dS m^{-1} y una DFFF de $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En contraste; las plántulas crecidas en invernadero no mostraron ningún efecto de la CE y la biomasa fue menor al de las plántulas crecidas bajo luz LED, incluso a bajas CE.

Ke *et al.* (2022) reportaron que se produjo una mayor masa seca y tasa fotosintética en tomate enano con una intensidad de luz de $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bajo iluminación LED, asimismo, se ha reportado que el cultivo de tomate tiene tolerancia moderada a la salinidad y una CE arriba de 2.5 dS m^{-1} puede ser perjudicial (Cuartero y Fernández, 1998). Estos datos coinciden con los resultados del presente estudio para el caso de las plántulas de tomate, excepto que la CE ideal fue de 2.0 dS m^{-1} . Sin embargo, Avendaño *et al.* (2020) demostraron que con el tratamiento de mayor intensidad de luz LED ($235.69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtuvieron un mayor peso fresco y seco total en lechuga romana, lo que sugiere que la intensidad de luz optima difiere para cada especie.

Ding *et al.* (2022) reportaron resultados similares en plántulas de pimienta, las cuales se sometió a diferentes CE; el mayor peso fresco y seco se obtuvo bajo una CE de 2.9 dS m^{-1} . Los resultados obtenidos en el presente estudio en plántulas de pimienta concuerdan con lo anteriormente reportado ya que se promovió una mayor acumulación de biomasa bajo la intensidad de luz y CE más alta, $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 2.4 dS m^{-1} , respectivamente.

Por otra parte, una reducción en la acumulación de biomasa seca también puede estar relacionado a una disminución de la absorción total de luz de la planta. Kalaitzoglou *et al.* (2021) sostiene que el aumento del 61% de porción luz azul LED en plantas de tomate, redujo un 22% la absorción total de luz correlacionada con la disminución del área foliar. Larsen *et al.* (2020) menciona que a una intensidad de luz de $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se obtuvo la mayor biomasa fresca en variedades de albahaca Dolly y Emily.

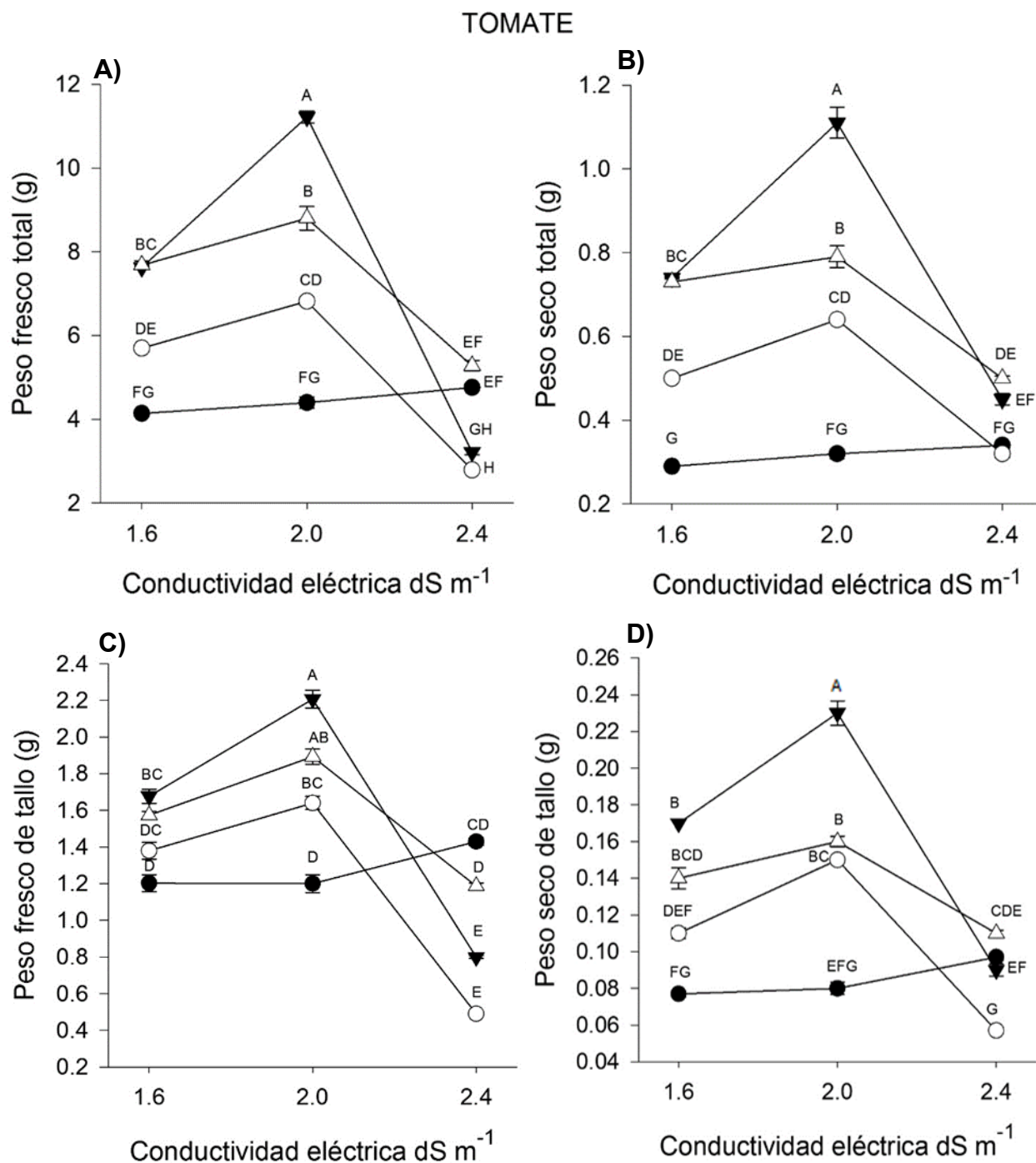


Figura 2. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco total (A), peso seco total (B), peso fresco de tallo (C) y peso seco de tallo (D) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical de interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

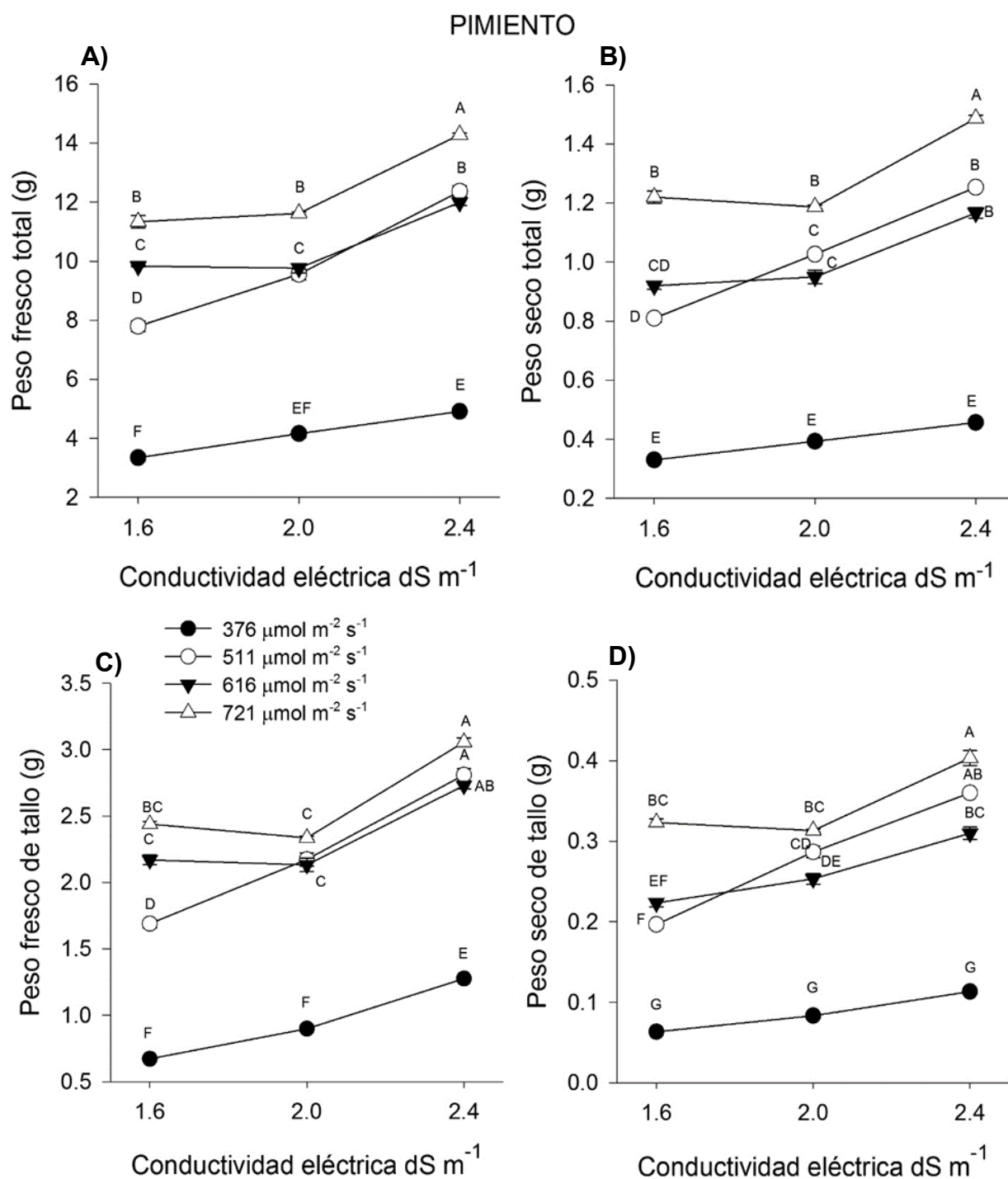


Figura 3. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco total (A), peso seco total (B), peso fresco de tallo (C) y peso seco de tallo (D) en plántulas de pimienta cultivadas en un sistema vertical de interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

Relación parte aérea/raíz

En tomate, las plántulas crecidas en invernadero y las crecidas bajo luz LED a $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 1.6 dS m^{-1} , mostraron una mayor relación parte aérea/raíz, en plántulas de invernadero la CE no tuvo efecto significativo (Figura 4A), valores altos de esta variable indican que la parte aérea de las plántulas se desarrolló más que la raíz. En cambio, en condiciones de iluminación LED la relación parte aérea/ raíz fue menor a la de las plántulas de invernadero, con excepción de las plántulas iluminadas con luz LED a $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a baja CE, sugiriendo que las raíces tuvieron un mejor desarrollo radicular. En general, un aumento en la CE causó una disminución en la relación parte aérea/raíz, llegando a ser mínima en las plantas tratadas con $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $511 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e irrigadas con una solución nutritiva de 2.4 dS m^{-1} (Figura 4A).

En plántulas de pimienta (Figura 5A), la mayor relación parte aérea/raíz se obtuvo a una CE de 1.6 dS m^{-1} bajo una DFFF de $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, presentando un mayor desarrollo aéreo que radicular; en los restantes tratamientos del sistema vertical y de invernadero la relación parte aérea/raíz no se vio afectada por la CE y los valores indican que hubo un mayor desarrollo radicular.

Miyama (2022) menciona que en plántulas de tomate desarrolladas bajo luz LED una mayor relación parte aérea/raíz fue perjudicial aumentando la intumescencia, sugiriendo que una alta relación parte aérea/raíz es indeseable en la producción de plántulas, ya que la raíz no se desarrolla lo suficiente para ser trasplantadas. Por otra parte, Brazaityte *et al.* (2021) observaron que al aumentar la luz azul LED al 100%, la relación parte aérea/raíz aumentó a 5.18 en microgreen de Brassicaceae, siendo las plantas de menor calidad. Los datos del presente estudio indican que las plántulas con un mejor balance entre el desarrollo de las raíces en relación con el desarrollo de la parte aérea se producen en condiciones de agricultura vertical de interior y con iluminación LED, en particular con CE de 2.4 dS m^{-1} y una DFFF de 616 y $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para tomate, mientras que en pimienta es bajo una CE de 2.0 dS m^{-1} y una DFFF de $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La mayor relación parte aérea/raíz es indeseable en la producción de plántulas ya que la tendencia a acumular menos biomasa en la raíz retrasa el momento en que éstas

se encuentran listas para ser extraídas de las charolas de germinación, mientras que la parte aérea continúa desarrollándose y provocando la etiolación de las plantas (Khan *et al.*, 2021).

Altura de plántula

En tomate bajo luz LED, la mayor altura se dio a una CE de 2.0 dS m⁻¹; no obstante, al elevar la CE a 2.4 dS m⁻¹ la altura decreció, llegando incluso a ser menor que la obtenida por las plántulas de invernadero con DFFF de 376 μmol m⁻² s⁻¹ (Figura 4B). La disminución de la altura de planta a altas CE se presentó cuando la intensidad de las lámparas LED fue de 511 μmol m⁻² s⁻¹ (Figura 4B). En general, la altura de las plántulas establecidas en invernadero no se vio afectada por la CE y no superaron a las del sistema vertical (Figura 4B).

En pimiento desarrollado bajo iluminación LED, la mayor altura de planta presentó aumentó con una DFFF de 721 μmol m⁻² s⁻¹ y una CE de 2.0 dS m⁻¹, estas se igualaron a las crecidas bajo una intensidad de luz de 616 μmol m⁻² s⁻¹ en la que la CE no tuvo efectos significativos (Figura 5B). En las plántulas de invernadero, la altura aumentó al elevar la CE a 2.4 dS m⁻¹, sin embargo, no superaron a las del sistema vertical (Figura 5B).

La luz roja es percibida por los fitocromos y se le atribuye el crecimiento vertical de las plantas. La fluencia de luz roja afecta el metabolismo de las plantas proceso en el que intervienen los fitocromos (Utasi *et al.*, 2023). En el presente estudio, la mayor altura para ambas especies de plántulas se generó bajo altas intensidades de luz de 616 y 721 μmol m⁻² s⁻¹, las cuales tienen el mayor flujo de fotones en el rango rojo 600-700 nm (Cuadro 2). Jin *et al.* (2023) observaron que a medida que la proporción de luz LED roja disminuye, la altura de plántulas de pepino también decreció, la mayor altura fue de 6.22 cm a los 19 días después de la siembra y se obtuvo a una proporción 90% luz roja y 10% luz azul. En otro estudio en tomate, un aumento de 61% en la proporción de la luz azul LED redujo un 55% la altura de las plantas, manifestándose en una morfología más compacta (Kalaitzoglou *et al.*, 2021). Los datos mencionados se asemejan a los resultados obtenidos en el presente estudio, los cuales sugieren que la luz roja es la

responsable del crecimiento vertical de las plantas. Puede deberse a que la luz roja es percibida por los fitocromos y su actividad induce respuestas para la evitación de sombra. Kalaitzoglou *et al.* (2019) mencionan que con la disminución del estado estacionario bajo del fitocromo (PSS) de 0.90 a 0.70 en plantas de tomate la altura aumentó de 80 a 130 cm bajo iluminación LED suplementaria. También se ha demostrado que el aumento de la intensidad de luz sin llegar a puntos de saturación puede aumentar la altura de las plantas (Larsen *et al.*, 2020).

Longitud de tallo

Las plántulas de tomate crecidas bajo luz LED bajo intensidades de luz de 511, 616 y 721 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tuvieron una mayor longitud de tallo a CE de 1.6 y 2.0 dS m^{-1} , sin embargo, al elevar la CE a 2.4 dS m^{-1} la longitud disminuyó significativamente (Figura 4C). Las plántulas crecidas en invernadero bajo una intensidad de luz de 376 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aumentaron ligeramente su longitud de tallo a una CE de 2.4 dS m^{-1} superando a las plántulas del sistema vertical crecidas a CE 2.4 dS m^{-1} (Figura 4C). En las plántulas en el sistema vertical, la longitud fue similar entre los tratamientos de DFFF excepto cuando la CE fue de 2.4 dS m^{-1} , ya que los tallos fueron de menor longitud conforme disminuye la DFFF (Figura 6A).

En contraste, las plántulas de pimiento crecidas en el sistema vertical tuvieron mayor longitud de tallo al elevar la CE a 2.0 y 2.4 dS m^{-1} (Figura 5C); la longitud de tallo fue mayor en plántulas desarrolladas con una DFFF de 616 y 721 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la CE de 2.4 dS m^{-1} (Figura 5C). Las plántulas crecidas en invernadero bajo una intensidad de luz de 376 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mostraron mayor longitud de tallo a medida que la CE se fue elevando hasta 2.4 dS m^{-1} , sin embargo, no llegó a superar a las crecidas en el sistema vertical (Figura 5C).

En el presente estudio se pudo observar en tomate que CE inferiores o igual a 2.0 dS m^{-1} incrementó la longitud de tallo, por el contrario, en pimiento CE igual o superior a 2.0 dS m^{-1} aumentó la longitud del tallo. Las intensidades de luz no presentaron grandes diferencias a excepción de las desarrolladas en

invernadero. Algo similar reporta Ke *et al.* (2022) en tomate enano ya que la aplicación de una intensidad de luz de 300 a 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ evaluado a los 9 días del tratamiento no afectó la longitud de tallo. En otro estudio en tomate y pimiento rojo, un fotoperiodo de 20 horas y una intensidad de luz de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con iluminación LED provocó la mayor longitud del brote, en tomate fue de 15 cm y en pimiento de 12 cm (Hwang *et al.*, 2020). En el presente estudio la mejor longitud de tallo considerando el desarrollo foliar y radicular en tomate fue de 16 cm bajo una DFFF de 616 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 2.0 dS m^{-1} , en pimiento bajo una DFFF de 721 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE 2.4 dS m^{-1} con 15 cm de longitud de tallo sin embargo hubo longitudes de tallo superiores. Altos valores de esta variable no es precisamente la cualidad más deseada en plántulas de calidad, ya que plantas demasiado alargadas con poco desarrollo foliar y radicular indica un desarrollo pobre de la planta afectando su calidad (Javanmardi y Emami, 2013).

Kalaitzoglou *et al.* (2021) encontraron que la luz azul promueve morfologías más compactas al aumentar la proporción de luz azul del 27% a 61% provocando que la longitud de tallo en tomate disminuyera linealmente, sugiriendo que a mayor porción luz roja las longitudes son mayores, por otra parte, Larsen *et al.* (2020) menciona que el aumento de la intensidad de luz de 200 a 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ incrementó la longitud de dos variedades de albahaca.

Diámetro de tallo

En tomate crecido en el sistema vertical el mayor diámetro del tallo fue con una CE de 2.0 dS m^{-1} bajo intensidades de luz de 616 y 721 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y se redujo al elevar la CE a 2.4 dS m^{-1} (Figura 4D). Para las plántulas crecidas bajo 511 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y las crecidas en invernadero la CE no tuvo efectos sobre el grosor de tallo (Figura 4D). Por otra parte, en pimiento, las plántulas crecidas bajo luz LED y a DFFF de 511 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, el diámetro fue mayor a CE altas y bajo 616 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ el diámetro se igualó a los mayores diámetros y la CE no tuvo efectos (Figura 5D). Con 721 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ el diámetro aumentó a 2.4 dS m^{-1} . Las plántulas crecidas en invernadero no superaron a las crecidas en sistema vertical y a una CE de 2.0 dS m^{-1} su diámetro se redujo significativamente (Figura 5D).

Hwang *et al.* (2020) evaluaron en plántulas de tomate y pimiento rojo distintos fotoperiodos e intensidades de luz LED, en las cuales se obtuvo un grosor de tallo mayor de 2.5 mm en tomate y 2.8 mm en pimiento, con 20 horas de fotoperiodo y DFFF de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, los resultados del presente estudio superaron a los datos reportados ya que en tomate fue de 3.4 mm y pimiento 4 mm; las intensidades de luz y CE que favorecieron a cada especie fueron diferentes.

Por otra parte, hay datos reportados por Ding *et al.* (2022) en plántulas de pimiento quienes bajo una CE de 2.9 ds m^{-1} obtuvieron un mayor diámetro con 9 mm de grosor, superando a los del presente estudio. Se reportan datos diferentes en lechuga REX manejada en un sistema vertical con luz fluorescente ya que en etapa de plántula el aumento de la intensidad de luz de 60 a $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, incrementó cuadráticamente 0.7 mm el grosor de tallo (Givens *et al.*, 2023). En un estudio de plántulas de tomate Cherry bajo diferentes intensidades de luz LED, se encontró que a la intensidad más alta de $550 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se indujo un mayor diámetro de tallo (Fan *et al.*, 2013), esto sugiere que a mayor DFFF mayor grosor de tallo; sin embargo, esto no se observó en los resultados del presente estudio ya que los mayores diámetros se obtuvieron a intensidades de luz variables.

TOMATE

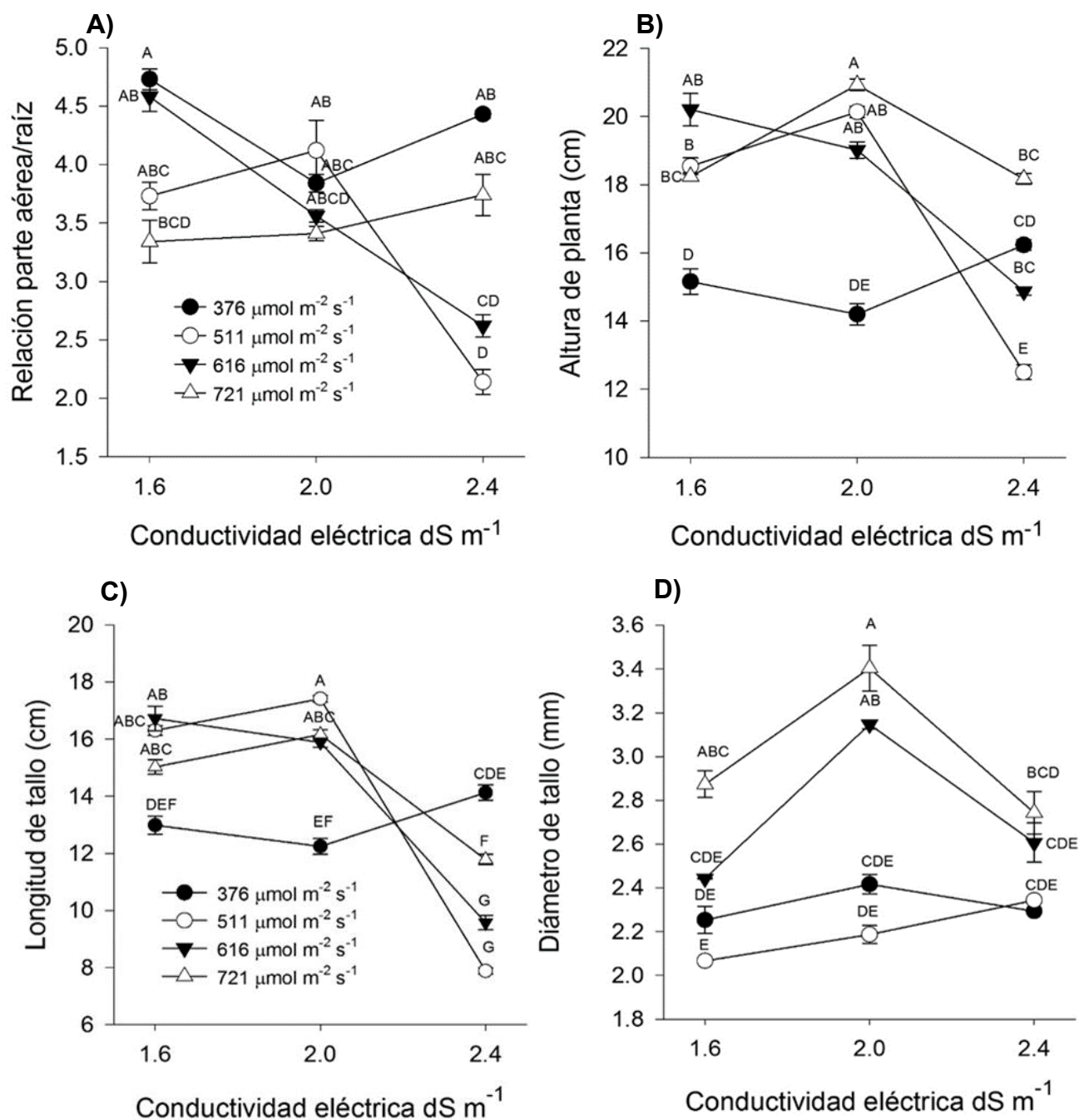


Figura 4. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre la relación parte aérea/raíz (A), altura de planta (B), longitud de tallo (C) y diámetro de tallo (D) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

PIMIENTO

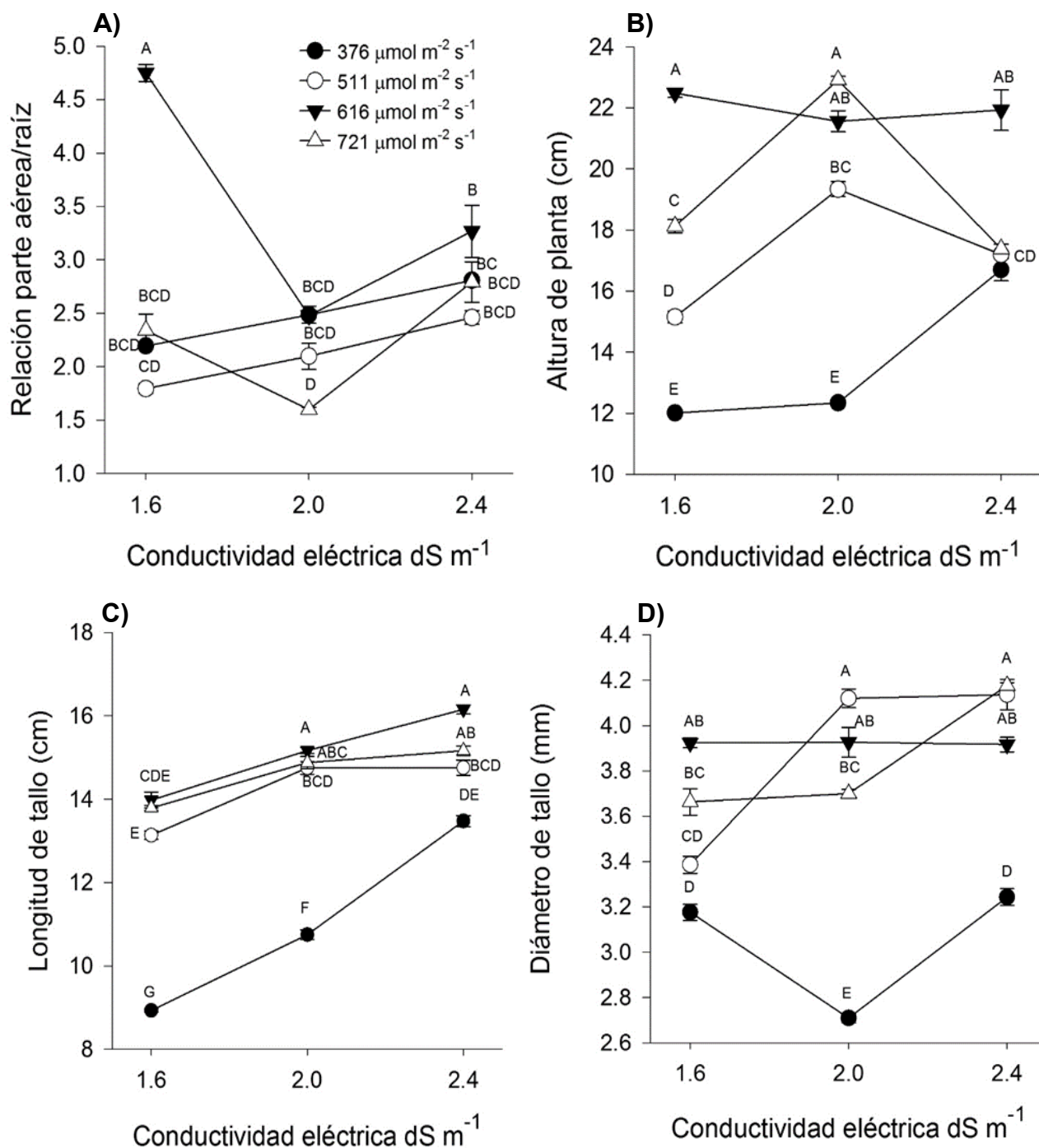


Figura 5. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre la relación parte aérea/raíz (A), altura de planta (B), longitud de tallo (C) y diámetro de tallo (D) en plántulas de pimiento cultivadas en un sistema vertical de interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

Biomasa de hojas

El peso fresco de hojas (Figura 6A) y peso seco de hojas (Figura 6B) en plántulas de tomate tuvieron un comportamiento similar; en las plántulas crecidas en el sistema vertical la mayor biomasa se presenta cuando la CE fue de 2.0 dS m^{-1} , sin embargo, cuando la CE se elevó a 2.4 dS m^{-1} hubo una reducción significativa. La mejor respuesta se observó cuando las plántulas fueron sometidas a una intensidad de luz de $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

En condiciones de invernadero la CE no tuvo efecto, pero en general, la biomasa fue menor en comparación con la biomasa de las plántulas con iluminación LED a bajas CE (Figura 6). En el caso del pimiento, el peso fresco de hojas (Figura 7A) y peso seco de hojas (Figura 7B), mostraron un comportamiento similar. La biomasa incrementó para las plántulas crecidas en el sistema vertical a medida que la CE se fue elevando, siendo la mayor acumulación a una CE de 2.4 dS m^{-1} y una intensidad de luz de $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En contraste; las plántulas crecidas en invernadero no mostraron ningún efecto de la CE y la biomasa fue menor al de las plántulas crecidas bajo luz LED, incluso a bajas CE.

En estudios anteriores en lechuga una proporción de luz LED 70:18:12 fue favorable obteniendo una biomasa foliar de 140 g (Matysiak *et al.*, 2021). En otro estudio de lechuga romana se demostró que la productividad y calidad mejoró con el manejo de la luz, al aumentar la DFFF a $194.54 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ la biomasa foliar aumentó a 280 g (Loconsole *et al.*, 2019), en otros casos el aumento de la luz azul a 61% provocó un aumento en la acumulación de peso seco en hojas a expensas del tallo (Kalaitzoglou *et al.*, 2021). Cuando la intensidad de luz aumenta y el crecimiento de las plantas se ve limitado, puede deberse a una respuesta de saturación de luz Long y Bernacchi (2003) mencionan que bajo una saturación de luz el CO_2 limita la fotosíntesis reduciendo el crecimiento en general de la planta.

Número de hojas

El número de hojas para tomate crecido con iluminación LED fue mayor a una DFFF de $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y CE de 2.0 dS m^{-1} , en general, el número de hojas

disminuyó al elevar la CE a 2.4 dS m^{-1} independientemente de la DFFF (Figura 6C). Las plantas de invernadero tuvieron menor número de hojas que las del sistema vertical y la CE no tuvo efectos significativos (Figura 6C). Con respecto al pimiento, el mayor número de hojas se observó en plantas crecidas en el sistema vertical bajo intensidades de luz de 511 y $721 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y la CE más baja (Figura 7C), sin embargo, al ir elevando la CE de 1.6 a 2.0 dS m^{-1} el número de hojas se redujo. En plántulas de invernadero, la CE no tuvo efectos significativos y el número de hojas fue inferior a las del sistema vertical (Figura 7C).

En el presente estudio se observó que al elevar la CE se reduce el número de hojas, sin embargo, la intensidad de luz que favorece a cada cultivo fue $616 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para tomate y $721 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para pimiento, sugiriendo que niveles altos de DFFF en combinación con CE bajas favorece el número de hojas. Un comportamiento similar se presentó en lechuga con 19 hojas máximo, el mayor número de hojas se obtuvo con la concentración de solución nutritiva al 75% y una intensidad de luz $350 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Song *et al.*, 2020). En otro estudio se encontró que bajo un fotoperiodo de 20 h y una DFFF de 200 a $250 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ se obtuvo el mayor número de hojas en plántulas de tomate y pimiento, con dos y tres hojas respectivamente (Hwang *et al.*, 2020). Sin embargo, el número de hojas obtenido fue menor al del presente estudio; esta diferencia puede ser atribuida a que las intensidades de luz aplicadas son más altas que las empleadas por Hwang *et al.* (2020), lo que sugiere que el aumento de la DFFF incrementa el número de hojas. Givens *et al.* (2023) sustenta resultados similares al mencionar que en lechuga Rex el aumento de la intensidad de luz fluorescente de 60 a $600 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en la etapa de plántula favoreció el incremento del número de hojas un 53%. Por el contrario, Ke *et al.* (2022) reportaron que una intensidad de luz de 300 a $700 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ evaluado a los nueve días del tratamiento no afectó el número de hojas en tomate enano, pues este se mantuvo con seis hojas promedio; a pesar de no mostrar diferencias el número de hojas, estos resultados son similares a los obtenidos en el presente estudio con las plántulas de tomate.

TOMATE

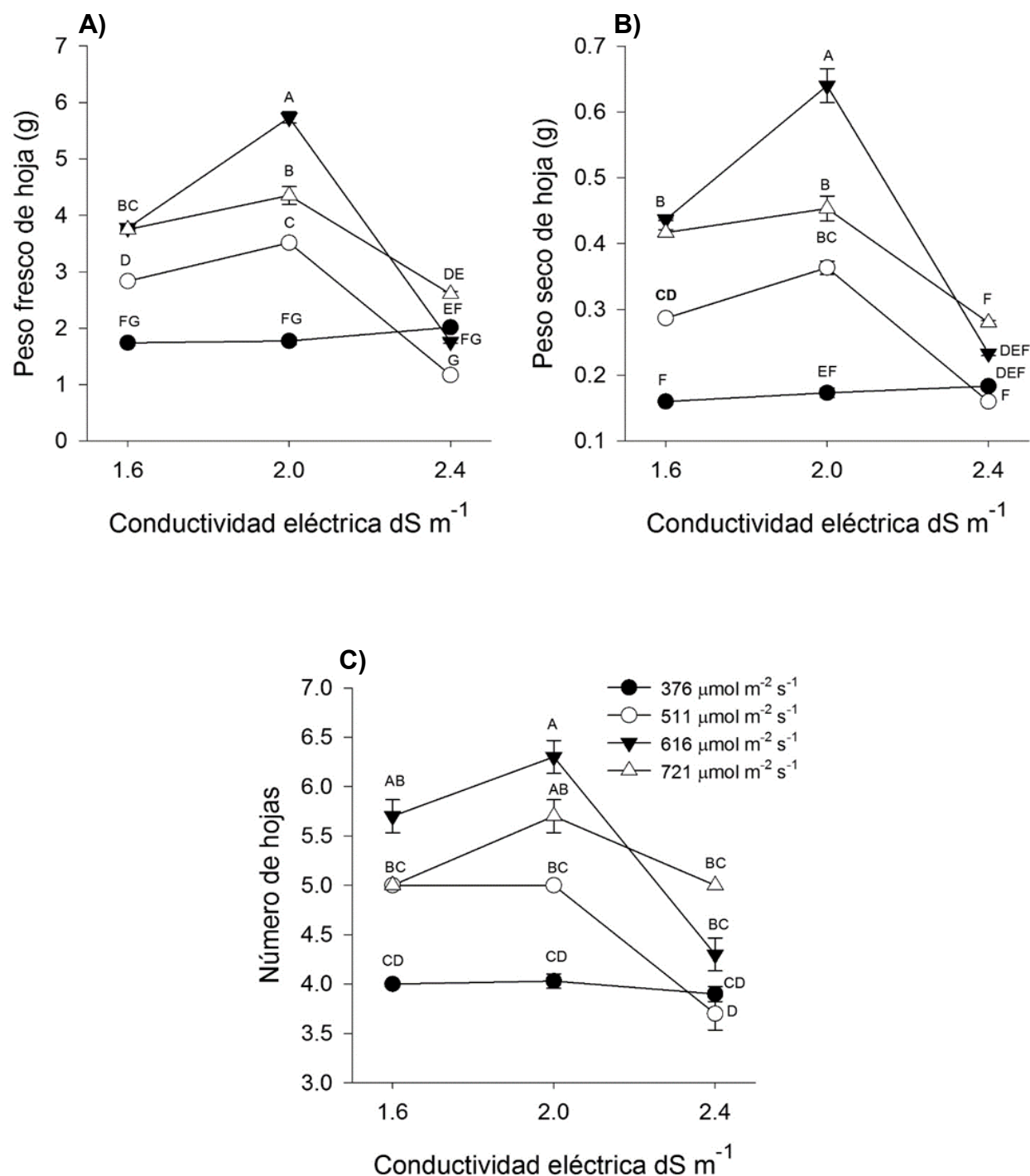


Figura 6. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco de hoja (A), peso seco de hoja (B) y número de hojas (C) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

PIMIENTO

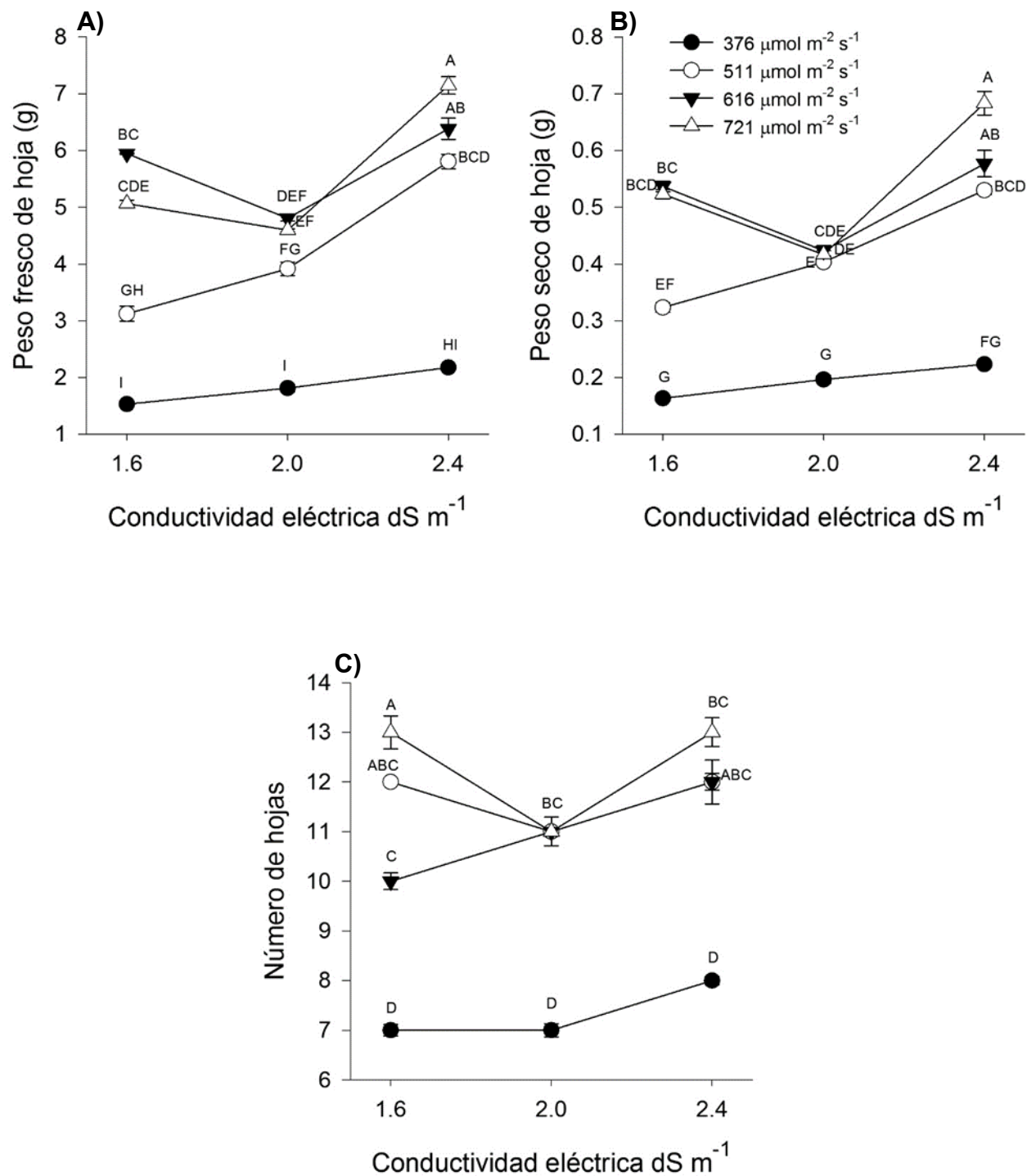


Figura 7. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre el peso fresco de hoja (A), peso seco de hoja (B) y número de hojas (C) en plántulas de pimienta cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

Acumulación de biomasa y crecimiento en raíz

El peso fresco, volumen y peso seco de raíz (Figura 8A-C) en plántulas de tomate tuvieron un comportamiento semejante; en plántulas del sistema vertical los valores más altos se obtuvieron a un CE de 2.0 dS m^{-1} y bajo una DFFF de $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, al elevar la CE a 2.4 dS m^{-1} , los valores disminuyeron (Figura 8A-C). En plántulas crecidas en invernadero la CE no tuvo efectos significativos e incluso no superaron a las crecidas en el sistema vertical con altas CE. En pimiento las mismas variables tuvieron un comportamiento similar entre ellas (Figura 9A-C); en las plántulas crecidas en el sistema vertical, los valores más altos se obtuvieron bajo una intensidad de luz de $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la CE no tuvo efectos significativos. En las plántulas crecidas en invernadero la CE no tuvo efectos, sin embargo, no superaron a las plántulas crecidas en el sistema vertical. En tomate las crecidas en el sistema vertical (Figura 8D) la mayor longitud de raíz se obtuvo bajo $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE de 1.6 y 2.0 dS m^{-1} , sin embargo, al elevar a 2.4 dS m^{-1} la longitud de raíz disminuyó. Las crecidas bajo invernadero la CE no tuvo efectos y la longitud de raíz fue menor a las crecidas bajo luz LED. En plántulas de pimiento crecidas en el sistema vertical (Figura 9D) la mayor longitud de raíz se obtuvo a 511 y $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a CE de 2.0 dS m^{-1} , elevar la CE a 2.4 dS m^{-1} la longitud disminuyó. En las plantas de invernadero la CE no tuvo efectos sobre la longitud de raíz. Lanoue *et al.* (2018) mencionan que en plántulas de tomate los azúcares se relacionaron con el crecimiento de las raíces y su exportación a través de floema fue afectado por la intensidad y calidad de luz LED. Klem *et al.* (2019) observaron que la luz roja lejano a roja estimuló el crecimiento de las raíces en plantas de cebada. En otro estudio se observó que la sacarosa y la intensidad de luz son sinérgicos, promoviendo cambios en la morfología y crecimiento de las raíces en diferentes genotipos de *Arabidopsis* (Miotto *et al.*, 2021). Por lo anterior la luz induce y es esencial para el crecimiento de raíces. Huang *et al.* (2022) observaron el aumento de la intensidad de la luz afecto significativa y linealmente el crecimiento radicular hasta un 60% en plantas de *Pleiblastus pygmaeus*.

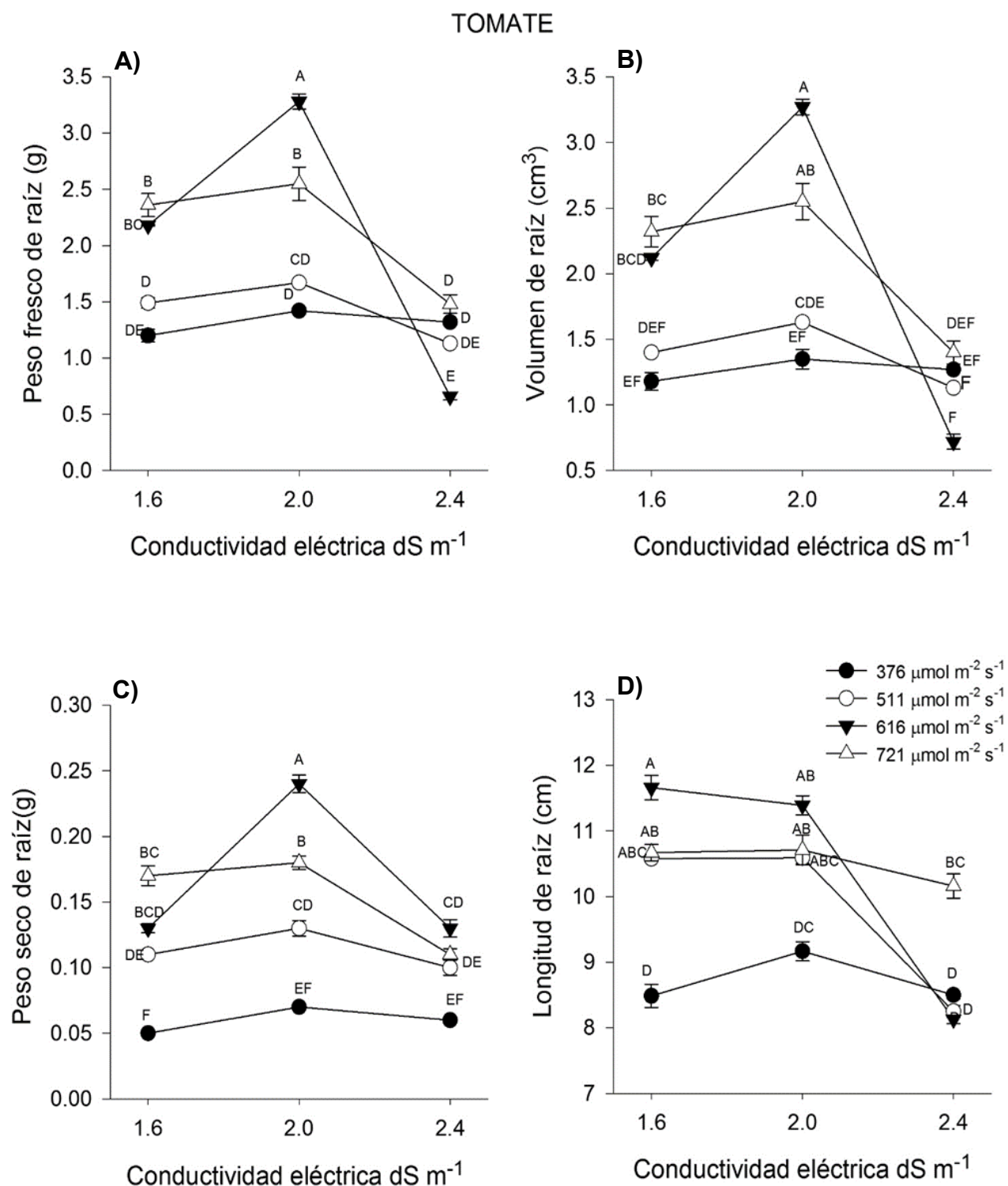


Figura 8. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz peso fresco de raíz (A), volumen de raíz (B), peso seco de raíz (C) y longitud de raíz (D) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

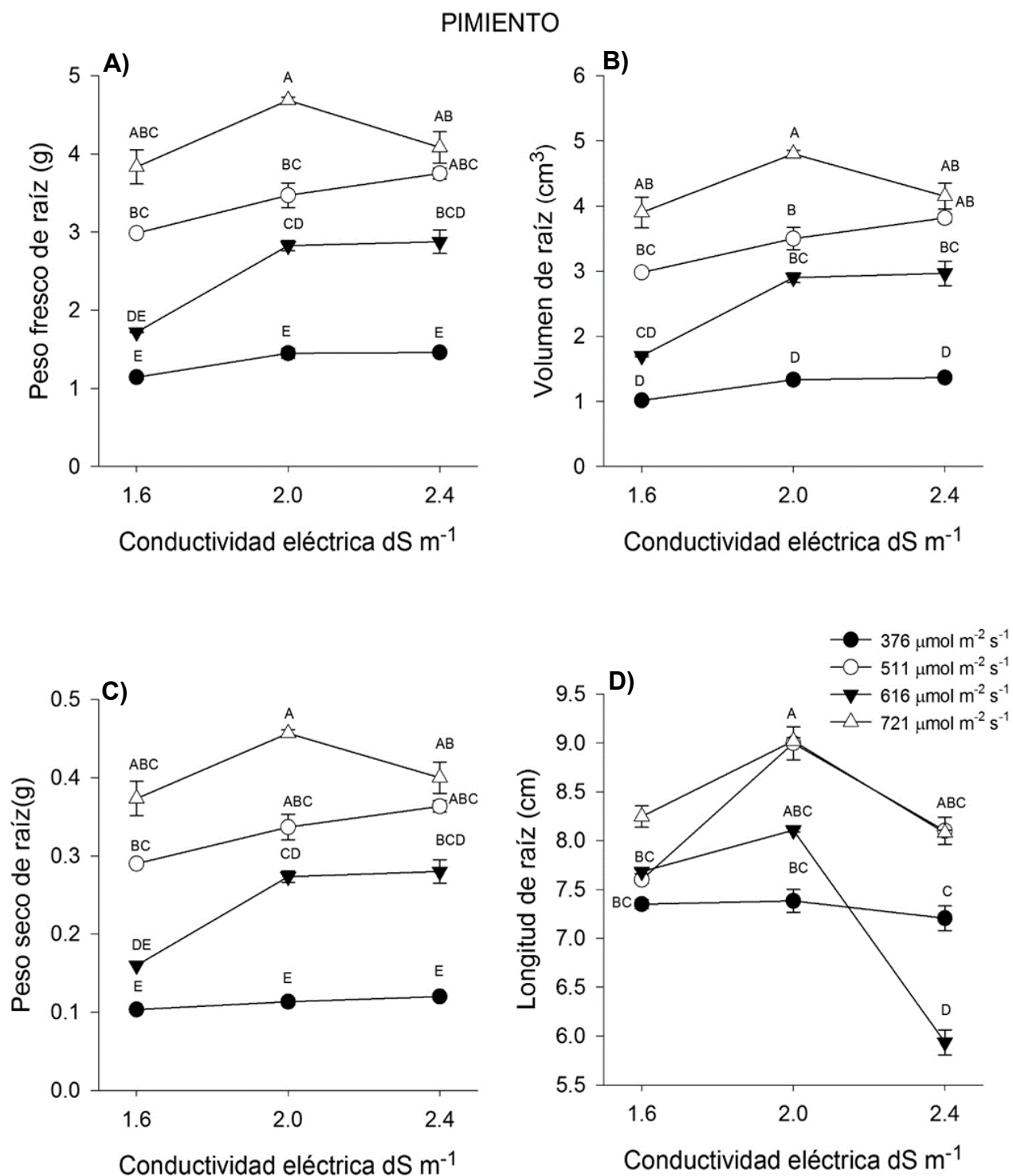


Figura 9. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz peso fresco de raíz (A), volumen de raíz (B), peso seco de raíz (C) y longitud de raíz (D) en plántulas de pimienta cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

Contenido de clorofila

En tomate, la clorofila a, clorofila b y clorofila total tuvieron un comportamiento similar; en las plántulas crecidas en el sistema vertical bajo la intensidad de luz de $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a medida que la CE se fue elevando hasta 2.4 dS m^{-1} , el contenido de clorofila incrementó (Figura 10). Bajo las demás intensidades incluso las plántulas crecidas en invernadero la CE no tuvo efecto significativo, sin embargo, las de invernadero no superaron a las del sistema vertical (Figura 10A-C). Por otra parte, en pimiento las variables de clorofila A, B y total tuvieron un comportamiento similar; en las plantas crecidas con luz LED bajo una intensidad de $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y CE de 2.0 dS m^{-1} perjudico el contenido de clorofila, para las demás intensidades la CE no tuvo efectos al igual que las plantas crecidas en condiciones de invernadero, sin embargo, no superaron a las del sistema vertical (Figura 11).

En el presente estudio se pudo observar que en tomate solo bajo la intensidad de $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ la CE provocó efectos y en pimiento bajo $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y los más altos contenidos de clorofila se obtuvieron a CE de 1.6 y 2.4 dS m^{-1} . Ding *et al.*, (2022) reportaron que en plántulas de pimiento el mayor contenido de clorofila total aumentó a $4.5 \text{ mg g}^{-1} \text{ FW}$ a medida que la CE aumento a 11.6 dS m^{-1} , sin embargo, a dicha CE otras variables de crecimiento se vieron afectadas presentando un estrés salino. También se ha reportado que el aumento de la DLI 6.9 a $15.6 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en lechuga REX y Rouxai aumentó la concentración de clorofila de ambos cultivares (Kelly *et al.*, 2020); coincidiendo con los resultados de este estudio. Por el contrario, otros estudios que afirman el aumento de la DFFF con luz fluorescente de 200 - $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ redujo la concentración de clorofila a y la clorofila b (Givens *et al.*, 2023). Al igual en tomate enano el aumento de la DFFF redujo la concentración de clorofila a, b y, total, la mayor concentración fue a $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con 2.07 mg g^{-1} , 0.59 mg g^{-1} y 2.66 mg g^{-1} respectivamente (Ke *et al.*, 2022). En lechuga Song *et al.* (2020) demostraron que aumentar la intensidad de luz LED y concentración de solución nutritiva afectó el contenido de clorofila a, b y total, el mayor contenido de clorofila se obtuvo bajo $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 50% de concentración de solución nutritiva (0.41 ,

0.079 y 0.499 mg g⁻¹ respectivamente). La absorción de luz depende de la concentración de clorofila y de la calidad de luz, la clorofila tiene una banda de absorción entre 450 a 475 nm y 650 a 675 nm, cuando la absorción de luz llega a ser excesiva ocurre un mecanismo para disipar esa energía por medio de pigmentos accesorios (Kuczynska *et al.*, 2015). Esto explica por qué las especies evaluadas en el presente estudio acumularon mayor cantidad de clorofila a las intensidades de luz más altas de 616 y 721 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ya que la calidad de luz que presentan se encuentra dentro del rango de absorción de las clorofilas (Tabla 2) y las plantas pueden haber desarrollado pigmentos accesorios.

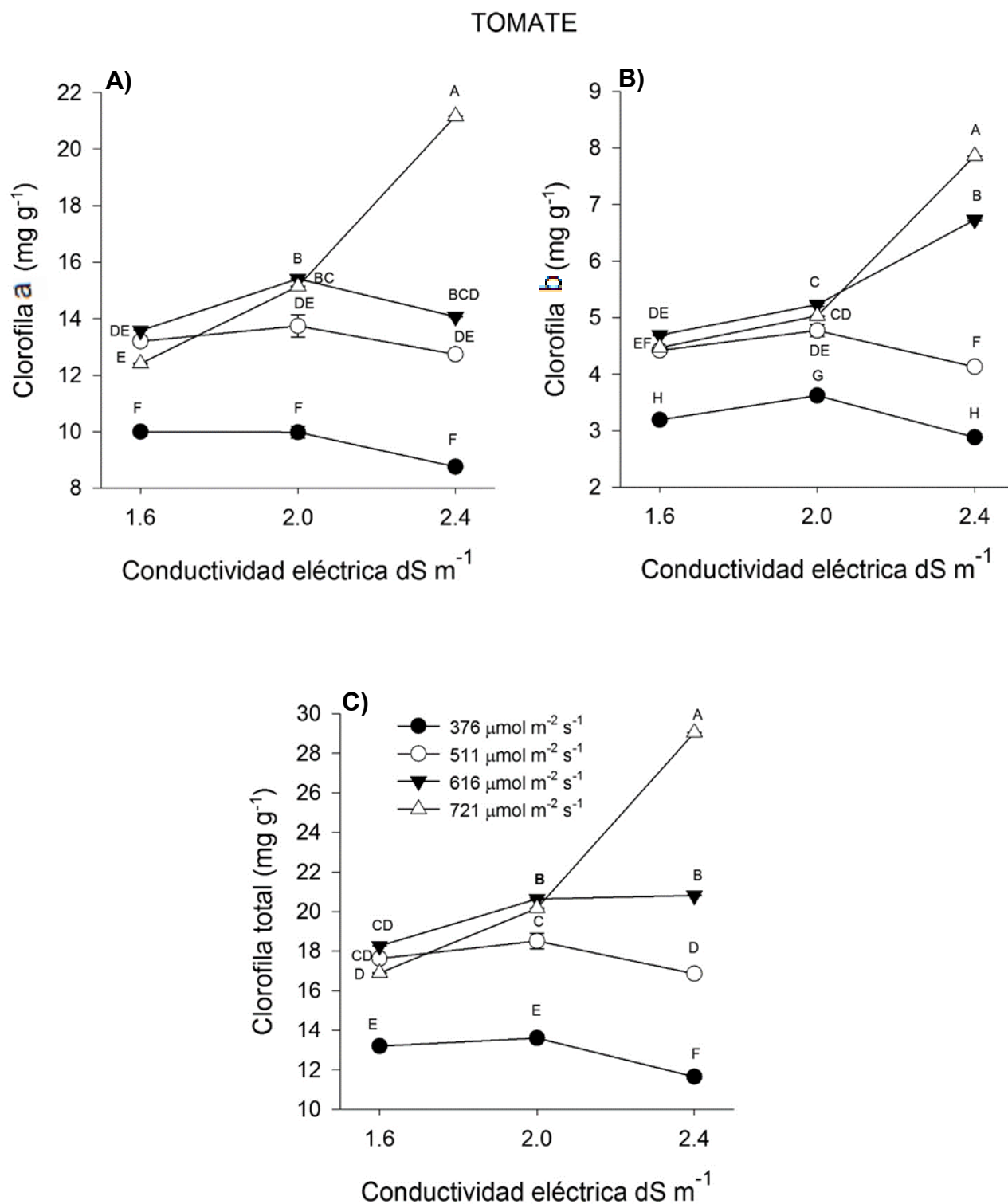


Figura 10. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre clorofila a (A), clorofila b (B) y clorofila total (C) en plántulas de tomate cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

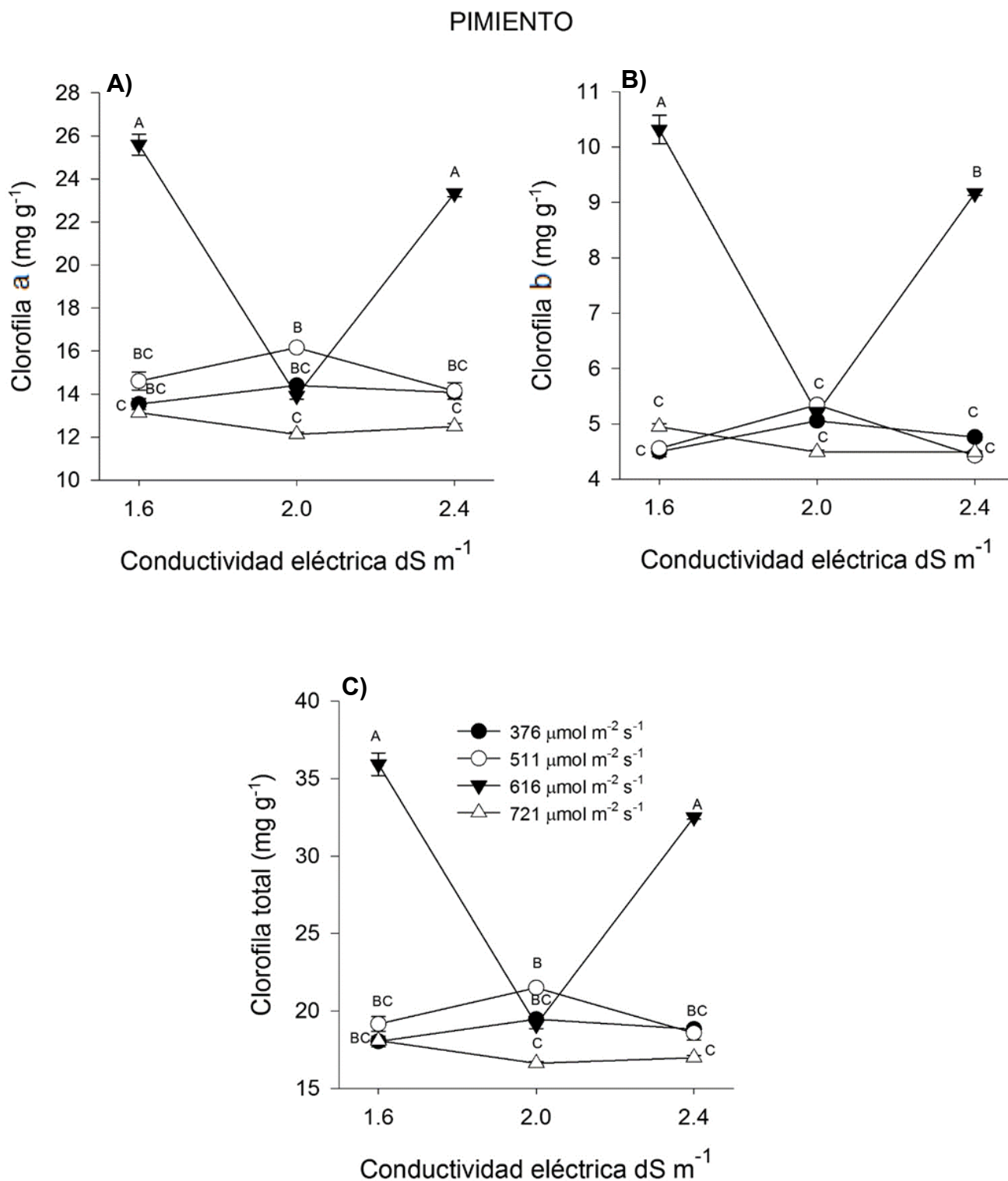


Figura 11. Efecto de la conductividad eléctrica bajo diferentes intensidades de luz sobre clorofila a (A), clorofila b (B) y clorofila total (C) en plántulas de pimienta cultivadas en un sistema vertical interior con iluminación LED. Las barras representan el error estándar de la media. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p < 0.05$.

CONCLUSIONES

En plántulas de tomate crecidas en el sistema vertical una DFFF de $616 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una CE de 2.0 dS m^{-1} promovió el crecimiento vegetativo. En plántulas de pimiento crecidas en el sistema vertical con una DFFF de $721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una CE de 2.4 dS m^{-1} se promovió el crecimiento vegetativo. En plántulas de tomate y pimiento crecidas en invernadero la CE no tuvo efecto y el crecimiento fue inferior a las del sistema vertical.

REFERENCIAS

- Aguirre, B.H.; García, T.F.; Vázquez, H.C.; Alvarado, M.A.; Feregrino, P.A.A.; Guevara, G.G.R.; Contreras, M.M. 2020. Effect of extended photoperiod with a fixed mixture of light wavelengths on tomato seedlings. *Hortscience*. 55(11):1832-1839.
- Al-Kurtany, A.E.S.; Ali, S.A.M.; Oleawy, M.F. 2023. Tomato seedling production using an inoculum prepared with plant growth-promoting rhizobacteria pgpr9 isolates. *Journal of breeding and genetics*. 55(1):230-236.
- Alrajhi, A.A.; Alsahli, A.S.; Alhelal, I.M.; Rihan, H.Z.; Fuller, M.P.; Alsadon, A.A.; Ibrahim, A.A. 2023. The effect of led light spectra on the growth, yield and nutritional value of red and green lettuce (*Lactuca sativa*). *Plants*. 12:463.
- Amoozgar, A.; Mohammadi, A.; Sabzalian, M.R. 2017. Impact of irradiation with light emitting diodes on photosynthesis, phytochemical composition, and mineral element content of lettuce cv. Brown bear. *Photosynthetics*. 55:85-95.
- Asprilla, P.D.; Morales, F.D. (2020). Vertical farms as a model of sustainable and green businesses. *Research magazine*. 14(1):17.
- Avendaño, A.V.H.; González, S.D.C.; Munguía, L.J.P.; Hernández, C.R.; Luna, M.A.I.; Vidales, C.J.A.; Niño, M.G.; Rodríguez, F.H. (2020). Growth and total nutrimental absorption of baby romaine lettuce cultivated with led lighting under plant factory system. *Agricultural economic technique*. 116(4):280-293.
- Avendaño, A.V.; Alvarado, C.D.; Valdez, A.L.A.; Sánchez, O.E.A.; Gónzales, F.J.A.; Cartimill, A.D. (2023). Response of strawberry to the substitution of blue light by green light in an indoor vertical farming system. *Agronomy*. 13(1):99.
- Baenas, N.; Belovic, M.; Ilic, N.; Moreno, D.A.; García, V.C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annum L.*) derived products technological benefits and biological advantages. *Food Chemistry*. 274:872-885.
- Bose, B.; Pant, B.; Singhal, R.K.; Kumar, M.; Mandal, S. (2018). Phytochrome: physiology, molecular aspects, and sustainable crop production. *Abbas*. 47:25-47.
- Brazaitytė, A.; Miliuskienė, J.; Vaštakaitė-Kairienė, V.; Sutulienė, R.; Laužikė, K.; Duchovskis, P.; Małek, S. (2021). Effect of different ratios of blue and red

led light on brassicaceae microgreens under a controlled environment. *Plants*. 10:801.

Carballo, M.F.J.; Urrestarazu, M.; Rodríguez, O.J.C.; Morales, I. (2021). Electrical conductivity of the nutrient solution on the vegetative propagation of bell pepper and tomato. *Rural science*. 53:2.

Carrera, C.G.; Calleja, J.C.; Pernas, M.; Gómez, L.; Oñate, S.L. (2020). An updated overview on the regulation of seed germination. *Plants*. 9(6):703.

Chakma, P.; Hossain, M.Md.; Rabbani, G.M. (2019). Effects of salinity stress on seed germination and seedling growth of tomato. *Journal bangladesh agric univ*. 17(4):490-499.

Chen, L.L.; Zhang, K.; Gong, X.C.; Wang, H.Y.; Gao, Y.H.; Wang, X.Q.; Zeng, H.Y. (2020). Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets in vitro and minituber production after transplanting in the greenhouse. *Journal of integrative agriculture*. 19(1):108-119.

Chowdhury, M.E.H.; Khandakar, A.; Ahmed, S.; Al-Khuzaei, F.; Hamdalla, J.; Haque, F.; Reaz, M.B.I.; Al Shafei, A.; Al-Emadi, N. (2020). Design construction and testing of iot based automated indoor vertical hydroponics farming test-bed in qatar. *Sensors*. 20:5637.

Cordeiro, A.M.; Andrade, L.; Monteiro, C.C.; Leitao, G.; Wigge, P.A.; Saibo, N.J. M. (2022). Phytochrome-interacting factors a promising tool to improve crop productivity. *Journal of experimental botany*. 73(12):3881-3897.

Cuartero, J.; Fernández, M.R. (1998). Tomato and salinity. *Scientia horticulturae*. 78(4):83-125.

Darko, E.; Heydarizadeh, P.; Schoefs, B.; Sabzalian, R. (2014). Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Phil trans soc b*. 369:20130243.

De la Rosa, R.R.; Lara, H.A.; Padilla, B.L.E.; Avelar, M.J.J.; España, L.M.P. (2018). Proportion of drainage of the nutritive solution in the yield and quality of tomato in hydroponics. *Ciencia agrícola*. 20:4343-4353.

Della Valle, A.; Dimmito, M.P.; Zengin, G.; Pieretti, S.; Mollica, A.; Locatelli, M.; Cichelli, A.; Novellino, E.; Ak, G.; Yerlikaya, S.; Baloglu, M.C.; Celik Altunoglu, Y.; Stefanucci, A. (2020). Exploring the nutraceutical potential of dried pepper *capsicum annum* l. on market from altino in abruzzo region. *Antioxidants*. 9:400.

- De Carbonnel, M.; Stormonth, D.J.M.; Liu, W.; Kuziak, D.; Jones, M.A. (2022). Realising the environmental potential of vertical farming systems through advances in plant photobiology. *Biology*. 11:922.
- Ding, D.; Li, J.; Xie, J.; Li, N.; Bakpa, E.P.; Han, K.; Yang, Y.; Wang, C. (2022). exogenous zeaxanthin alleviates low temperature combined with low light induced photosynthesis inhibition and oxidative stress in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plants. Curr. Issues Mol. Biol.*44: 2453-2471.
- Doria, J. (2010). General information about seeds: their production, conservation, and storage. *Tropical crops*. 31(1):5-8.
- Elkins, C.; Van Iersel, M.W. (2020). Longer photoperiods with the same daily light integral increase daily electron transport through photosystem ii in lettuce. *Plants*. 9:1172.
- Fan, X.X.; Xu, Z.G.; Liu, X.Y.; Tang, C.M.; Wang, L.W.; Han, X.L. (2013). Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia hort*. 153:50-55.
- FAO. 2020. Statistical database. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Consulted 18/02/2023.
- FAO. 2021. Statistical database: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Consulted 05/06/2023.
- Farooq, S.S.; Rather, A.; Gull, A.; Shaiq, A.G.; Massoodi, F.A.; Wani M.S.; Ganaie, A.T. (2020). Physicochemical and nutraceutical properties of tomato powder as affected by pretreatments, drying methods, and storage period. *International journal of food properties*. 23(1):797-808.
- Félix, V.J.W.; Ayala, T.F.; Angulo, C.A.; Yáñez, J.M.G.; Román, R.L.; Parra, D.J.M. (2022). Producción de plántula de chile morrón con sistema de iluminación led. En investigación en ciencias agrícolas. Astra ediciones. Baja california. México. 789-794.
- Ferrante, A.; Mariani, L. (2018). Agronomic management to improve plant tolerance to abiotic stress: high and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulture*. 4(3):21.
- Flores, P.S. (2021). Iluminación led para el crecimiento y desarrollo de plantas hortícolas. Universidad autónoma de Chapingo. Doctorado en ciencias en horticultura. Texcoco. México. 81.
- Flores, V.J. (2020). Viabilidad de biosistemas urbanos verticales. *Revista H2O*. 24:47-51.

- Flores, V.J.; Fuentes, M.D.; Roblero, H.R. (2022). La web de las cosas para monitoreo y control de biosistemas con aplicaciones prácticas en agricultura urbana. En tecnologías disruptivas y su impacto en la vida social y económica de México. Editorial plaza y valdés. México. 135-150.
- Folta, M.K.; Childers, S.K. (2008). Light as a growth regulator: controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting systems. *Hortscience*. 43(7):1957-1964.
- Forigo, B.I.; Alves, S.L.; Camargos, O.R.; Miranda, L.E. (2022). Bell pepper germination and seedling's parameters under different osmotic potentials. *Comunicata scientiae*. 13:3843.
- Givens, S.R.; Del Moro, D.S.; Parker, S.E.; Renny, A.G.; Sams, C.E.; Walters, K.J. (2023). Light intensity during green-leaf butterhead lettuce propagation influences yield and carotenoids at harvest. *Horticulturae*. 9:223.
- He, B.; Chen, Y.; Zhang, H.; Xia, C.; Zhang, Q.; Li, W. (2018). The effect of colored plastic films on the photosynthetic characteristics and content of active ingredients of *dysosma versipellis*. *Horticulture, environment, and biotechnology*. 59:519-528.
- Hernández, A C.; Palma, D.R.; Escalona, V.H. (2023). The effect of light intensity and photoperiod on the yield and antioxidant activity of beet microgreens produced in an indoor system. *Horticulturae*. 9:493.
- Hernández, R.; Kubota, C. (2012). Tomato seedling growth and morphological responses to supplemental LED lighting red: blue ratios under varied daily solar light integrals. *Acta hort*. 956:187-194.
- Hosseini, H.; Mozafari, V.; Roosta, H.R.; Shirani, H.; van de Vlasakker, P.C.H.; Farhangi, M. (2021). Nutrient use in vertical farming: optimal electrical conductivity of nutrient solution for growth of lettuce and basil in hydroponic cultivation. *Horticulturae*. 7:283.
- Huang, B.; Xin, J.; Dai, H.; Liu, A.; Zhou, W.; Yi, Y.; Liao, K. (2014). Root morphological responses of three hot pepper cultivars to cd exposure and their correlations with cd accumulation. *Environmental science and pollution research*. 22:1151-1159.
- Huang, W.; Ding, Y.; Wang, S.; Song, C.; Wang, F. (2022). Growth and development responses of the rhizome-root system in (*Pleioblastus pygmaeus*) to light intensity. *Plants*. 11:2204.
- Hwang, H.; An, S.; Pham, M.D.; Cui, M.; Chun, C. (2020). The combined conditions of photoperiod, light intensity, and air temperature control the

growth and development of tomato and red pepper seedlings in a closed transplant production system. *Sustainability*. 12:9939.

Javanmardi, J.; Emami, S. (2013). Response of tomato and pepper transplants to light spectra provided by light emitting diodes. *International journal of vegetable science*. 19 (2):138-149.

Jin, D.; Su, X.; Li, Y.; Shi, M.; Yang, B.; Wan, W.; Wen, X.; Yang, S.; Ding, X.; Zou, J. (2023). Effect of red and blue light on cucumber seedlings grown in a plant factory. *Horticulturae*. 9:124.

Jones, M.A. (2018). Using light to improve commercial value. *Horticulture research*. 5:47.

Kalaitzoglou, P.; Leperen, V.W.; Harbinson, J.; Meer, V.M.; Martinakos, S.; Weerheim, K.; Weerheim, K.; Nicole, C.C.S.; Marcelis, L.F.M. (2019). Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. *Front plant sci*. 10:322.

Kalaitzoglou, P.; Taylor, C.; Calders, K.; Hogervorst, M.; Van, W.; Harbinson, J.; 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*. 184:104377.

Ke, X.; Yoshida, H.; Hikosaka, S.; Goto, E. (2022). Optimization of photosynthetic photon flux density and quality for increasing radiation- use efficiency in dwarf tomato under led light at the vegetative growth stage. *Plants*. 11:121.

Kelly, N.; Choe, D.; Meng, Q.; Runkle, S.E. (2020). Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod. *Scientia horticulturae*. 272: 109565.

Kim, H.; Hwang, S. (2019). The growth and development of 'mini chal' tomato plug seedlings grown under various wavelengths using light emitting diodes. *Agronomy*. 9:157.

Khan, S.; Akhtar, N.; Rehman, S.U.; Shujah, S.; Rha, E.S.; Jamil, M. (2021). Biosynthesized iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄ NPs) mitigate arsenic toxicity in rice seedlings. *Toxics*. 9:2.

Klem, K.; Gargallo, G.A.; Rattanapichai, W.; Oravec, M.; Holub, P.; Veselá, B.; Sardans, J.; Peñuelas, J.; Urban, O. (2019). Distinct morphological, physiological, and biochemical responses to light quality in barley leaves and roots. *Front plant sci*. 10:1026.

- Kotilainen, T.; Aphalo, P.J.; Brelsford, C.C.; Böök, H.; Devraj, S.; Heikkilä, A.; Hernández, R.; Kylling, A.; Lindfors, A.V.; Robson, T.M. (2020). Patterns in the spectral composition of sunlight and biologically meaningful spectral photon ratios as affected by atmospheric factors. *Agricultural and forest meteorology*. 291:108041.
- Kuczynska, P.; Jemiola, R.M.; Strzalka, K. (2015). Photosynthetic pigments in diatoms. *Mar drugs*. 13:5847-5881.
- Küpers, J.J.; Oskam, L.; Pierik, R. (2020). Photoreceptors regulate plant developmental plasticity through auxin. *Plants*. 9:940.
- Lanoue, J.; Leonardos, E.D.; Grodzinski, B. (2018). Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Front. plant sci*. 9:756.
- Larsen, H.D.; Woltering, J.E.; Nicole, C.S.C.; Marcelis, F.M.L. (2020). Response of brasil growth and morphology to light intensity and spectrum in a vertical farm. *Front plant sci*. 11:597906.
- Liriano, G. R.; Terán, R. M. A.; Núñez, S.D.B.; Ibañez, M.D.; Pérez, R.J. (2017). Worm humus in the production of seedlings of *Lycopersicon esculentum Mill* in a community of Cojedes State, Venezuela. *Agricultural center*. 44:23-29.
- Loconsole, D.; Cocetta, G.; Santoro, P.; Ferrante, A. (2019). Optimization of LED lighting and quality evaluation of romaine lettuce grown in an innovative indoor cultivation system. *Sustainability*. 11(3):841.
- Long, S. P.; Bernacchi, C. J. (2003). Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis procedures and sources of error. *J exp bot*. 54:2393-2401.
- López, J.E. (2018). Hydroponic production of crops. *Idesia arica*. 36 (2):139-141.
- Lu, X.; Xu, N.; Chen, Y.; Li, Y.; Gan, X. (2021). Effects of light intensity and ground cover on seedling regeneration of tetracentron sinense oliv. *Journal of plant growth regulation*. 40:736-748.
- Martínez, D.M.T.; Cruz, A.O.; Rodríguez, P.E.J.; Colinas, L.M.T.; Góngora, C.M.A. (2017). Yield, physicochemical quality, and antioxidant capacity of "beef" and wild tomato fruits (*Solanum lycopersicum L.*) as a function of the electrical conductivity of the nutrient solution. *Agronomy colomb*. 3:13-23.
- Matysiak, B.; Kaniszewski, S.; Dyśko, J.; Kowalczyk, W.; Kowalski, A.; Grzegorzewska, M. (2021). The impact of led light spectrum on the growth,

morphological traits, and nutritional status of 'elizium' romaine lettuce grown in an indoor controlled environment. *Agriculture*. 11:1133.

Ma, Y.; Xu, A.; Cheng, Z.M. (2021). Effects of light-emitting diode lights on plant growth, development, and traits: a meta-analysis. *Journal of horticultural plants*. 7:552-564.

Meiramkulova, K.; Tanybayeva, Z.; Kydyrbekova, A.; Turbekova, A.; Aytkhozhin, S.; Zhantasov, S.; Taukenov, A. (2021). The efficiency of LED irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings. *Sustainability*. 13:9426.

Miotto, Y.E.; da Costa, C.T.; Offringa, R.; Kleine-Vehn, J.; dos Santos, M.F. (2021). Effects of light intensity on root development in a d-root growth system. *Front plant sci*. 12:778382.

Miyama, Y. (2022). Effects of different light sources on shoot to root ratio and intumescence incidence in tomato seedlings grown in a commercial closed seedling production system. *International journal of horticultural science and technology*. 10:1-8.

Olle, M.; Virsilè, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agric food sci*. 22:223-234.

Paik, I.; Huq, E. (2019). Plant photoreceptors: multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in cell y developmental biology*. 92:114-121.

Panno, S.; Davino, S.; Caruso, A.G.; Bertacca, S.; Crnogorac, A.; Mandić, A.; Noris, E.; Matic, S. (2021). A review of the most common and economically important diseases that undermine the cultivation of tomato crop in the mediterranean basin. *Agronomy*. 11:2188.

Paradiso, R.; Proietti, S. (2021). Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: the state of the art and the opportunities of modern LED systems. *Journal of plant growth regulation*. 41:742-780.

Pedmale, U.V.; Huang, SS.C.; Zander, M.; Nery, J.R.; Ecker, J.R.; Chory, J. (2016). Cryptochromes interact directly with PIFs plant growth in limiting blue light. *Cell press*. 164:233-245.

Pérez, R.M.; Pontin, M.; Lipinski, V.; Bottini, R.; Piccoli, P.; Cohen, A.C. (2020). *Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum brasilense* increase the yield and fruit quality of tomatoes under field conditions. *Journal of soil science and plant nutrition*. 20(4):1614-1624.

- Pinho, P.; K. Jokinen, Y.; Halonen, Y. (2012). "Horticultural lighting present and future challenges". *Lighting research y technology*. 44:427-437.
- Reed, C.R.; Bradford, K.J.; Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability changing climate. *The genetics society*. 128:450-459.
- Rifna, E.J.; Ramanan, R.K.; Mahendran, R. (2019). Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in food sciencie y technology*. 86:95-108.
- Salim, R.M.M.; Rashid, H.M.; Hossain, M.M.; Zakaria, M. (2020). Morphological characterization of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) genotypes. *Journal of the saudi society of agricultural sciences*. 19(3):233-240.
- Salkic, E.; Salkic, B.; Pasalic, A.; Salkic, A. (2022). Influence of substrate on germination and fruiting of tomatoes. *Journal of agriculture and ecology research international*. 23(4):44-49.
- Sano, N.; Marion, P.A. (2021). ABA metabolism and homeostasis in seed dormancy and germination. *International journal of molecular sciences*. 22:5069.
- Scarano, A.; Olivieri, F.; Gerardi, C.; Liso, M.; Chiesa, M.; Chieppa, M.; Frusciante, L.; Barone, A.; Santino, A.; Rigano, M.M. (2020). Selection of tomato landraces with high fruit yield and nutritional quality under elevated temperatures. *Journal of the science of food and agriculture*. 100:2791-2799.
- Shafiq, I.; Hussain, S.; Ali Raza, M.; Iqbal, N.; Asghar, M. A.; Raza, A. (2021). Crop photosynthetic response to light quality and light intensity. *Journal of integrative agriculture*. 20(1):4-23.
- SIAP. 2020. Servicio de información agrolimentaria y pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> consultado 05/06/2023.
- SIAP. 2021. Servicio de información agrolimentaria y pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola>. Consultado 15/01/2023.
- Sill, C.; Serbin, I. (2018). Vertical farming: a revolution to sustainable agriculture. University of pittsburgh swanson school of engineering pensilvania. USA. 9.
- Singh, J.; Sastry, D.E.V.; Singh, V. (2012). Effect of salinity on tomato (*Lycopersicum Esculetum* Mill.) during seed germination stage. *Agriculture*. 18:45-50.

- Smith, H. (2000). Phytochromes and light signal perception by plants-an emerging synthesis. *Nature*. 407: 585-591.
- Song, J.H.; Huang, Y.; Hao, S.; Song, Y.; Zhang, W.; Su, H.L. (2020). Nutritional quality, mineral and antioxidant content in lettuce affected by the interaction of light intensity and concentration of nutrient solution. *Science reports*. 10:2796.
- Souza, M.L.F.; Espíndola, L.J.M.; Sorte, C.N.H.; Chicamasso, V. F.; Reis; C.E. 2020. Determination of substrate proportion, sowing depth and temperature for tomato seedling emergence. *Ciencias agrarias*. 43(4):373-380.
- Spalding, E.P.; Folta, K.M. (2005). "Illuminating topics in plant photobiology". *Plant, cell and environment*. 28:39-53.
- Srivastava, S.; Kalpana, K. (2013). Nutritional content and significance of tomato powder. *Annals of arid zone*. 52(2):121-124.
- Steiner, A.A. (1968). Soilless culture. En proc 6th Colloq int potash inst. Italia. 324-341.
- Utasi, L.; Kovacs, V.; Gulyas, Z.; Marcek, T.; Janda, T.; Darko, E. (2023). Threshold or not: spectral composition and light-intensity dependence of growth and metabolism in tomato seedlings. *Scientia horticulture*. 313:111946.
- Van Delden, S.H.; SharathKumar, M.; Butturini, M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Natural Food*. 2:944-956.
- Velazquez, G.R.S.; Garcia, G.A.L.; Ventura, Z.E.; Barceinas, S.J.D.O.; Sosa, S. J.C. (2022). A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations. *Agriculture*. 12:646.
- Verhoeven, J.T.J.; Botermans, M.; Schoen, R.; Koenraad, H.; Roenhorst, J.W. (2021). Possible overestimation of seed transmission in the spread of pospiviroids in commercial pepper and tomato crops based on large-scale grow-out trials and systematic literature review. *Plants*. 10:1707.
- Wang, Q.; Lin, C. (2020). Mechanisms of cryptochrome mediated photoresponses in plants. *Plant biology*. 71:103-129.
- Xu, W.; Lu, N.; Kikuchi, M.; Takagaki, M. (2021). Continuous lighting and high daily light integral enhance yield and quality of mass-produced nasturtium (*Tropaeolum majus* L.) in plant factories. *Plants*. 10:1203.
- Yang, L.Y.; Wang, L.T.; Ma, J.H.; Ma, E.D.; Li, J.Y.; Gong, M. (2017). Effects of light quality on growth and development, photosynthetic characteristics,

and content of carbohydrates in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) plants. *Photosynthetica*. 55(3):467-477.

- Yang, T.; Samarakoon, U.; Altland, J.; Ling, P. (2021). Photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and flavor-related phytochemical properties of hydroponic-grown arugula (*Eruca sativa* Mill.) 'standard' under different electrical conductivities of nutrient solution. *Agronomy*. 11:1340.
- Yucailla, M.L.A. (2022). Evaluación de sustratos con la adición de ácidos húmicos para la producción de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad pietro.UTA. Ingeniero Agrónomo. Ecuador. 49.
- Zeidler M. (2022). Analysis of phytochrome-dependent seed germination in arabidopsis. *Methods mol biol*. 2494:117-124.
- Zhao, Q.P.; Zhu, J.D.; Li, N.N.; Wang, X.N.; Zhao, X.; Zhang, X. (2019). Cryptochrome-mediated hypocotyl phototropism was regulated antagonistically by gibberellic acid and sucrose in *Arabidopsis*. *Journal of integrative plant biology*. 62:614-630.
- Zheng, Y.; Yang, Z.; Xu, C.; Wang, L.; Huang, H.; Yang, S. (2020). The interactive effects of daytime high temperature and humidity on growth and endogenous hormone concentration of tomato seedlings. *Hortscience*. 55(10):1575-1583.