

# NIVELES DE INTEGRAL DE LUZ DIARIA Y LA CALIDAD DE PLÁNTULAS DE CHILE PIMIENTO BAJO LUZ LED BLANCA\*

Jesús W. Félix Vega<sup>1</sup>, Luis Á. Serrano López<sup>1</sup>, Felipe Ayala-Tafoya<sup>1</sup>, Moisés G. Yáñez-Juárez<sup>1</sup>, Antonio González Balcázar<sup>1</sup> y Azareel Angulo Castro<sup>1</sup>

## RESUMEN

Se evaluó el impacto de diferentes niveles de integral de luz diaria (DLI), desde 8,6 a 22,68 mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, sobre la calidad de plántulas de chile pimiento (*Capsicum annuum* L.), haciendo uso de la iluminación LED blanca. Las variables en estudio fueron el índice de área foliar, relación raíz-vástago, compactidad e índice de calidad. Se utilizó un diseño experimental aleatorizado 2x4, evaluando dos niveles de PPFD (200 y 350 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) y cuatro fotoperiodos (12, 14, 16 y 18 h·d<sup>-1</sup>). Se aplicaron ocho tratamientos (DLI) con cuatro repeticiones cada uno. La interacción entre una PPFD de 200 μmol m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> y un fotoperiodo de 14 h·d<sup>-1</sup> produjo un mayor índice de área foliar; mientras que, la relación raíz-vástago, compactidad e índice de calidad de plántula, fueron características que destacaron cuando la PPFD de 350 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> se combinó con el fotoperiodo de 12 h·d<sup>-1</sup>. Estos resultados son fundamentales para la agricultura en ambientes controlados, porque permiten estandarizar protocolos de iluminación que aseguren plántulas de alto vigor para el trasplante, promoviendo al mismo tiempo el uso eficiente de la energía y reduciendo los costos operativos en la producción de hortalizas.

**Palabras clave adicionales:** DLI, fotoperiodo, interacción, luz, pimiento, plántula.

## ABSTRACT

### Daily lighting integral levels on the quality of bell pepper seedlings under white led light

This research evaluated the impact of different daily light integral (DLI) levels ranging from 8,6 to 22,68 mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> on the quality of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings using white LED lighting. The study variables were leaf area index, root-to-shoot ratio, compactness, and quality index. A randomized 2x4 experimental design was used, evaluating two PPFD levels (200 and 350 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) and four photoperiods (12, 14, 16, and 18 h·d<sup>-1</sup>). Eight treatments (DLI) with four replications were applied. The interaction between a PPFD of 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and a 14 h·d<sup>-1</sup> photoperiod resulted in a higher leaf area index, while root-to-shoot ratio, compactness, and seedling quality index were highlighted when 350 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> PPFD was combined with the 12 h·d<sup>-1</sup> photoperiod. These results are fundamental for controlled-environment agriculture, as they allow for the standardization of lighting protocols that ensure high-vigor seedlings for transplanting, while simultaneously promoting energy efficiency and reducing operational costs in vegetable production.

**Additional Keywords:** DLI, interaction, light, pepper, photoperiod, seedling.

---

Editor Asociado: Dra. Marie Tamara González

---

## INTRODUCCIÓN

La incidencia de luz es muy importante en la regulación de la fisiología de las plantas como fuente de energía para la fotosíntesis y señal externa para activar y regular su crecimiento y desarrollo (Paradiso y Proietti, 2022). Varios estudios han investigado la influencia de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (en

inglés, PPFD) o el fotoperíodo en el crecimiento y desarrollo de plántulas de hortalizas cultivadas en agricultura vertical o en un invernadero (Aguirre *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021); sin embargo, estas variables por separado no reflejan las respuestas de la planta al entorno lumínico. Una manera de establecer la correlación entre ambos conceptos es a través de la Integral de Luz Diaria (DLI, en inglés). La DLI representa la

---

Recibido: Noviembre 18, 2025

Aceptado: Marzo 25, 2026

\*Parte del trabajo de grado para Maestro en Agricultura Protegida del primer autor en la Universidad Autónoma de Sinaloa, México, año 2023.

<sup>1</sup>Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.

e-mail: 13506595.felix@ms.uas.edu.mx, luisangelserrano68@gmail.com; tafoya@uas.edu.mx, moisesyj@uas.edu.mx; gonzalezantonio@uas.edu.mx; azareel.angulo@uas.edu.mx (autor de correspondencia).

cantidad total de fotones fotosintéticos recibidos por unidad de superficie durante un día y se expresa en  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ . Actualmente, no se han definido con precisión los umbrales de DLI que maximicen los índices de calidad de la plántula de chile pimiento sin incurrir en un desperdicio energético, factor que eleva innecesariamente los costos de producción en sistemas cerrados. Debido a que el chile pimiento es una especie modelo dentro de las solanáceas, los valores establecidos en este estudio servirán como referencia técnica para optimizar la propagación de otras hortalizas de alto valor de la misma familia, como el tomate y la berenjena. Se ha evaluado un aumento en DLI, sea extendiendo el fotoperiodo al mismo PPFD (Pennisi *et al.*, 2020a) o aumentando el PPFD al mismo fotoperiodo (Dou *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2020; Pennisi *et al.*, 2020b) y se han observado relaciones lineales o funciones cuadráticas entre DLI y la acumulación de biomasa (Ji *et al.*, 2020; Pennisi *et al.*, 2020a; Gao *et al.*, 2020) en plantas cultivadas en un sistema de producción cerrado. Sin embargo, la relación entre DLI y el crecimiento de las plántulas de chile pimiento aún no está clara; también requiere un mayor estudio el impacto de una amplia gama de DLI, creados por varias combinaciones de PPFD y fotoperiodo, en la calidad de las plántulas.

Las plantas que crecen bajo un ambiente de luz natural se han adaptado a utilizar un amplio espectro de luz solar mediante una evolución a largo plazo (Yan *et al.*, 2020). Chen *et al.* (2016) informaron que la influencia de la calidad de la luz monocromática en los cultivos hortícolas podría demostrarse de manera más objetiva y suficiente cuando se proporciona un espectro relativamente amplio, por ejemplo, mediante el uso de diodos emisores de luz (LED) blancos, que de acuerdo con Yan *et al.* (2019) presentan una mejor eficiencia de vida útil y la radiación fotosintéticamente activa que es generada es de mejor calidad, dando resultados muy favorables a la agricultura moderna sobre la agricultura convencional. Asimismo, Park y Runkle (2018) indicaron que el LED blanco tiene un impacto en el crecimiento de las plantas similar al del LED rojo más azul; no obstante, el espectro blanco se asocia con una mayor eficiencia energética y una mejor evaluación visual del cultivo.

Por su parte, el chile pimiento posiciona a

México como líder en la producción mundial, cultivado en los estados de Sinaloa, Chihuahua y Zacatecas, al situarse en el grupo de los cinco principales productores a nivel global durante el año 2023 (FAO, 2023). Por la falta de información sobre cómo diferentes niveles de DLI generados por combinaciones de PPFD y fotoperiodo bajo LED blanco afectan el crecimiento, la respuesta fisiológica y la eficiencia en el uso de recursos de plántulas de chile pimiento, el objetivo de este estudio fue cuantificar dichos efectos e identificar el rango de DLI que optimiza la calidad de plántula y el uso eficiente de los recursos en almacigo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Fisiología y Anatomía Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, ubicado en el kilómetro 17,5 de la carretera Culiacán-Mazatlán, a 24°37'29" N, 107°24'30" W, y una altitud de 38 msnm.

La siembra del chile pimiento cv. Zayas (Seminis) se realizó en charolas de poliestireno de 128 cavidades, utilizando turba como sustrato. Las plántulas se mantuvieron en cámaras de crecimiento de 1,72 m<sup>3</sup> de espacio útil, equipadas con nueve lámparas de LEDs blancos LS01 (40 W, Igoto Electric). Para obtener los dos niveles de PPFD (200 y 350  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), se mantuvo constante la intensidad lumínica mediante un ceptómetro (LP-80, Decagon), ajustando la distancia entre la fuente de luz y las plántulas conforme estas crecían. La distribución espectral de los LEDs se verificó con un espectrorradiómetro (FieldSpecPro VNIR, ASD). Para la nutrición de las plántulas, se utilizó la solución de Steiner (1984) al 30 % de la concentración original, aplicada por aspersión manual, cada tercer día durante el periodo en que se desarrolló el experimento.

El experimento se desarrolló desde el 14 de octubre (fecha de siembra) hasta el 28 de noviembre (sexta semana de muestreo) del 2022. Las plántulas fueron cosechadas para su evaluación a los 35 días después de la siembra.

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 2x4, considerando como factores los niveles de PPFD (200 y 350  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y los fotoperíodos (12, 14, 16 y 18

horas al día) (Cuadro 1). Se evaluaron ocho tratamientos (DLI) con cuatro repeticiones. Se utilizó un espectro radiómetro (Field SpecPro®VNIR, ASD) para obtener la distribución espectral de los LEDs (Figura 1) y un ceptómetro (LP-80, Decagon) para mantener constante la PPFd ajustando la distancia con la fuente de luz, conforme al crecimiento de las plántulas. Se utilizó un temporizador analógico de 24 horas (15119, GE) para asegurar cada fotoperíodo.

La temperatura y la humedad relativa fueron registradas mediante higrómetros colocados en el ambiente de cada tratamiento. La temperatura media fue de 25,9 °C, con máximas y mínimas de 32,5 y 18,8 °C, respectivamente. La humedad relativa media, máxima y mínima fueron 56,9, 79,9 y 39,1 %, respectivamente.

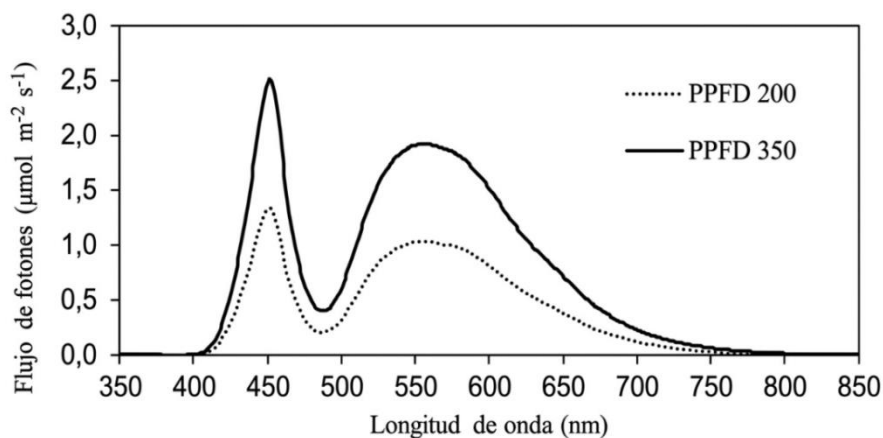
Para evaluar la calidad de la plántula, se consideraron las siguientes variables: la relación raíz-vástago (RRV:  $g \cdot g^{-1}$ ), mediante la ecuación  $RRV = \text{peso seco de la raíz (PSR)} / \text{peso seco del vástago (PSV)}$ ; el índice de área foliar (IAF:  $cm^2 \cdot cm^{-2}$ ), por medio de la ecuación  $IAF = \text{área foliar} / \text{área del cepellón}$ ; la compactidad (COM:  $g \cdot cm^{-1}$ ), mediante la ecuación  $COM = PSV / \text{altura de planta (AP)}$  (Hernández *et al.*, 2016); y el índice de calidad de plántula (ICP), a través del índice de Dickson = (diámetro de tallo / AP) + (PSR / PSV) x peso seco total (Birchler *et al.*, 1998).

Los datos de cada variable fueron sometidos al análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) mediante el programa Statistica versión 7.0 (StatSoft).

**Cuadro 1.** Diseño de tratamientos en función de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD), el fotoperíodo y la integral de luz diaria (DLI) resultante, utilizados para la producción de plántula de Chile pimienta.

Tratamiento	PPFD ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Fotoperíodo ( $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ )	DLI ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )
T1	200	12	8,64
T2	200	14	10,08
T3	200	16	11,52
T4	200	18	12,96
T5	350	12	15,12
T6	350	14	17,64
T7	350	16	20,16
T8	350	18	22,68

$$DLI = \text{PPFD} \times \text{fotoperíodo} \times 3600 \times 10^{-6}$$



**Figura 1.** Distribución espectral de los LEDs blancos utilizados en el sistema de iluminación para la producción de plántula de Chile pimienta.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos se analizaron mediante ANOVA de dos vías, considerando los efectos de PPFDF, fotoperíodo y su interacción (Cuadro 2). Los análisis evidenciaron efectos significativos de ambos factores y de su interacción sobre los indicadores de calidad de plántula (IAF, RRV, ICP y COMP).

Con la PPFDF de  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  se indujo que las plántulas de chile pimiento produjeran 17,14 % más índice de área foliar, con respecto a la PPFDF de  $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Cuadro 3). Este resultado concuerda con Hwang *et al.* (2020), quienes registraron efectos similares en el índice de área foliar de plántulas de tomate y pimiento rojo bajo la influencia de la PPFDF de 250 y  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente, el que disminuyó cuando la

PPFD fue igual o mayor a  $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

El resultado de mayor índice de área foliar por la exposición a diferentes fotoperíodos se obtuvo con los de 14 y  $16 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  (Cuadro 3) cuyo valor promedio superó en 13,52 y 15,17 % al índice de área foliar de las plántulas bajo los efectos del fotoperíodo de 12 y  $18 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ , respectivamente. El resultado es similar a los de Iqbal *et al.* (2022) quienes observaron que al extender el fotoperíodo de 11 a 14 o  $17 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ , las plantas de lechuga fueron más eficientes en el uso de la energía luminosa, debido a que fotoperíodos más largos proporcionaron más tiempo para la fotosíntesis, lo que a su vez condujo a una mayor eficiencia en la captura y conversión de la energía luminosa en carbohidratos. Esto se traduce en un crecimiento más saludable de las plantas por una mayor disponibilidad de energía para el metabolismo.

**Cuadro 2.** Significancia de los efectos principales de los factores independientes (fotoperíodo y PPFDF) y su interacción sobre las variables evaluadas en plántulas de chile pimiento, después de 35 días, con presentación de C.V. (%), GL, cuadrados medios, estadístico F y  $\text{Pr}>\text{F}$  para cada variable.

Variable	Fuente de variación	GL	Cuadrados medios	F	p-valor	CV (%)
IAF	Fotoperíodo	3	0,391	37,282	<0,0001	11,93
	PPFD	1	0,232	70,009	<0,0001	
	Fotoperíodo $\times$ PPFDF	3	0,929	119,018	<0,0001	
RRV	Fotoperíodo	3	0,002	4,895	0,002	7,22
	PPFD	1	0,005	10,997	0,003	
	Fotoperíodo $\times$ PPFDF	3	0,002	3,026	0,050	
ICP	Fotoperíodo	3	0,112	29,53	<0,0001	17,19
	PPFD	1	0,155	41,055	<0,0001	
	Fotoperíodo $\times$ PPFDF	3	0,072	57,212	<0,0001	
COMPAC	Fotoperíodo	3	0,001	137,464	<0,0001	26,34
	PPFD	1	0,001	174,616	<0,0001	
	Fotoperíodo $\times$ PPFDF	3	0,002	179,337	<0,0001	

IAF: Índice de Área foliar; RRV: Relación Raíz Vástago; ICP: Índice de Calidad de Plántula; COMP: Compacidad. C.V.: Coeficiente de variación, GL: Grados de libertad.

La interacción entre la PPFDF de  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y el fotoperíodo de  $14 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  (T2, DLI=10,08) indujo un índice de área foliar que superó (Tukey,  $p\leq 0,05$ ) en 19 % al ocasionado por la misma PPFDF y fotoperíodo de  $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  (T1, DLI=8,64), aunque estadísticamente igual cuando el fotoperíodo se alargó a 16 o  $18 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  (T3, DLI=11,52 y T4, DLI=12,96). La máxima respuesta con T2 también superó, desde 14,85 hasta 49,43 %, a la causada por la PPFDF de  $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  por 14 o  $18 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  (T6, DLI=17,64 y

T8, DLI=22,68), respectivamente (Cuadro 3). Al respecto, Yan *et al.* (2019) encontraron que la intensidad de la luz, el fotoperíodo y la calidad de la luz influyeron en el área foliar de plántulas de lechuga y, de acuerdo con los resultados de la calidad de las plántulas, su posterior desarrollo y los valores nutricionales de la lechuga, recomiendan la PPFDF de  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  junto con un fotoperíodo de  $16 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ , proporcionados por una fuente de iluminación LED, para la producción de plántulas en sistemas hidropónicos.

De manera similar, Hwang *et al.* (2020) observaron los mayores valores de número de hojas, área foliar e índice de área foliar de plántulas de tomate y pimiento rojo con 250 y 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente, entre todos los fotoperíodos que probaron (12, 16 y 20  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ ). En ese estudio, los DLI de 14,40 y 11,52  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  fueron lo suficientemente altos para que las hojas individuales se expandieran en respuesta al área de cultivo determinada.

La relación raíz-vástago de las plántulas de chile pimiento bajo la intensidad de 350  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  fue estadísticamente superior (Tukey,  $p\leq 0,05$ ) en 10,83 % a la de las plántulas bajo la influencia de 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Cuadro 3). Zha y Liu (2018), obtuvieron que al utilizar una intensidad de luz entre 240 y 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  produjeron un crecimiento apropiado del rábano cereza en entornos de fábrica de plantas utilizando una fuente de luz LED; a partir de esto, se obtiene que una adecuada relación raíz-vástago está fuertemente relacionada con la intensidad de la luz a la que la plántula este expuesta.

Asimismo, Wu *et al.* (2022), en un cultivo de *Miscanthus sinensis*, observaron que cuando las plantas fueron expuestas a niveles PPF, que oscilaban entre 300 y 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , obtuvieron el fortalecimiento de las raíces y un crecimiento vigoroso en la parte área de la planta. Debido a que los resultados evidenciaron efectos positivos y estadísticamente significativos de la iluminación en la acumulación de biomasa en la zona radical, esto contribuyó a mejorar la capacidad de las plantas para absorber tanto agua como nutrientes.

El mayor efecto positivo del fotoperíodo sobre la relación raíz-vástago se observó en las plántulas con 12  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ , que superó en 16,59 % al efecto ocasionado por el fotoperíodo de 14  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ , pero estadísticamente igual (Tukey,  $p\leq 0,05$ ), al generado bajo un fotoperíodo de 16 y 18  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$  (Cuadro 3). La respuesta observada bajo el fotoperíodo de 12  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$  es similar a la de Legnani y Miller (2001), quienes observaron que los días cortos (10  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ ) influyeron significativamente en el desarrollo radicular e impulsaron el crecimiento de las raíces en plántulas de dalia, debido que al percibir una restricción en las horas de luz, alteró su partición de asimilados; redujo el crecimiento relativo de la parte aérea y redireccionó los carbohidratos disponibles hacia el sistema

radicular como un mecanismo compensatorio para maximizar la absorción de recursos. Por su parte, la alta relación raíz-vástago que se observó a las 16 y 18  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$  se fundamentó en lo descrito por Adame *et al.* (2025); estos autores demostraron que plántulas de tomate y pimiento expuestas a fotoperíodos prolongados (24  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ ) lograron una mayor concentración de biomasa total. Esta exposición prolongada a la luz permite a la planta incrementar su tasa fotosintética neta y particionar una mayor cantidad de recursos hacia el sistema radicular, explicando así la eficiencia de nuestros tratamientos más largos.

Al comparar los resultados de la interacción de los factores sobre la relación raíz-vástago de las plántulas de chile pimiento (Cuadro 3), se observó que con la PPF de 350  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y fotoperíodo de 12  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$  (T5, DLI = 15,12) fue superior desde 21 hasta 30,24 % al efecto causado por la interacción de la PPF de 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  con cualquier fotoperíodo, aunque, estadísticamente igual a la respuesta con PPF de 350  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y fotoperíodo de 16 (T7, DLI=20,16) y 18  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$  (T8, DLI = 22,68). Al respecto, Cui *et al.* (2021) investigaron los efectos de diferentes intensidades de luz y fotoperíodos en plántulas de pepino. Ellos encontraron que la biomasa de raíces, la relación raíz-vástago, el índice de plántula y la tasa de materia seca de las plántulas se incrementaron a medida que el DLI aumentó de 5,41 a 11,26  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ . Esto indicó que las plántulas de hortalizas de alta calidad se caracterizan por ser compactas, estar bien enraizadas y presentar valores mayores tanto en la relación raíz-vástago como en el índice de calidad de plántula.

La PPF de 350  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  indujo una mayor compactidad de las plántulas de chile pimiento, que superó (Tukey,  $p\leq 0,05$ ) en 22,85 % al efecto causado con la PPF de 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Cuadro 3). Lo anterior concuerda con Bures *et al.* (2018), quienes en plantas de lechuga bajo efecto de lámparas LED observaron que una mayor intensidad de luz produjo plantas más compactas. Esto puede deberse, según Sessa *et al.* (2018), a que diferentes intensidades de luz tienen un efecto directo en la compactidad, porque al exponer el dosel vegetal a una intensidad lumínica alta, las plantas experimentan un fenómeno conocido como "efecto sombra", que es el

incremento que la luz intensa provoca en el proceso fotosintético en las hojas superiores de la planta, lo que a su vez estimula la producción de hormonas vegetales, como las auxinas, las cuales son promotoras de la elongación celular y el alargamiento de la zona área o vástago de la planta (Jordán y Casaretto, 2006). Cuando la

intensidad de luz es alta y está bien distribuida, como cuando se utilizan lámparas LED en un sistema de producción en interiores, el efecto de sombreado se minimiza y, por ende, el crecimiento se vuelve más compacto (Sellaro *et al.*, 2011).

**Cuadro 3.** Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre el índice de área foliar, relación raíz-vástago, compacidad e índice de calidad de la plántula de chile pimienta cultivada con iluminación de LEDs blancos.

FV	ÍAF (cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-2</sup> )	RRV (g·g <sup>-1</sup> )	C (g·cm <sup>-1</sup> )	ÍCP (cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
PPFD (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	***	**	**	**
200	2,46 a	0,692 b	0,035 b	0,77 b
350	2,10 b	0,767 a	0,043 a	0,91 a
Fotoperíodo (h·d <sup>-1</sup> )	***	**	***	***
12	2,14 b	0,794 a	0,045 a	1,00 a
14	2,45 a	0,681 b	0,033 d	0,71 c
16	2,41 a	0,714 ab	0,036 c	0,78 c
18	2,11 b	0,728 ab	0,041 b	0,86 b
PPFD x Fotoperíodo (DLI)	***	*	***	***
T1: 200 x 12 (8.64)	2,21 cd	0,719 b	0,040 b	0,85 bc
T2: 200 x 14 (10.08)	2,63 a	0,692 b	0,029 d	0,71 e
T3: 200 x 16 (11.52)	2,52 a	0,689 b	0,033 cd	0,73 de
T4: 200 x 18 (12.96)	2,46 ab	0,668 b	0,037 bc	0,80 cde
T5: 350 x 12 (15.12)	2,07 d	0,870 a	0,050 a	1,14 a
T6: 350 x 14 (17.64)	2,29 bc	0,671 b	0,037 bc	0,72 de
T7: 350 x 16 (20.16)	2,29 bc	0,739 ab	0,040 b	0,83 bcd
T8: 350 x 18 (22.68)	1,76 e	0,787 ab	0,045 a	0,93 b

FV: factor de variación, IAF: Índice de área foliar, RRV: Relación raíz-vástago, C: Compacidad, ICP: Índice de calidad de plántula, PPFD: densidad de flujo de fotones fotosintéticos; DLI: integral de luz diaria. Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey,  $p \leq 0,05$ ). \*, \*\*, \*\*\*= significativo a  $p \leq 0,05$ ,  $p \leq 0,01$  y  $p \leq 0,001$ , respectivamente.

Por su parte, el fotoperíodo de 12 h·d<sup>-1</sup> mostró ser suficiente para ocasionar la mayor compacidad de las plántulas de chile pimienta (Cuadro 3), que superó desde 9,75 hasta 36,36 % a la compacidad de las plántulas tratadas con 14 y 18 h·d<sup>-1</sup>, hecho que concuerda con Jeong *et al.* (2020), quienes en plántulas de pepino, obtuvieron que con el uso de un fotoperíodo corto de 12 h·d<sup>-1</sup>, se reguló el crecimiento de éstas, lo que es importante para no producir plántulas con una elongación que afecte su posterior desarrollo en el ciclo de producción.

El efecto causado por la interacción de la PPFD y el fotoperíodo sobre la compacidad de las plántulas (Cuadro 3) mostró que 350 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> durante 12 h·d<sup>-1</sup> (T5, DLI=15,12) promovió plántulas más compactas, estadísticamente igual a la compacidad lograda con la misma PPFD y un fotoperíodo de 18 h·d<sup>-1</sup> (T8, DLI=22,68), pero que superó desde 24,35 hasta 71 % a la compacidad de las plántulas bajo los efectos de T7 (DLI=20,16) y T2 (DLI=10,08), respectivamente. Hernández *et al.* (2016) señalaron que la compacidad de la planta, que es la relación entre la masa seca y la altura de

la planta, es otro parámetro importante para determinar la calidad de las plántulas. Un trasplante con alta masa seca y corta altura se considera una plántula de elevada calidad (Currey *et al.*, 2012; Vu *et al.*, 2014).

Asimismo, el índice de calidad de plántula (ICP) obtenido con la PPFd de  $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  superó (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) en 17,42 % al ICP con la PPFd de  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Cuadro 3). Lo anterior tiene relación con lo expresado por Fan *et al.* (2013), en plantas de tomate, quienes observaron que la eficiencia energética alcanzaba su punto máximo dentro del rango de 300 a  $450 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , hecho que se evidenció claramente al comparar con otros tratamientos de luz, que variaron entre 50 y  $550 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , durante el experimento. Bajo estas condiciones de iluminación, se encontró que las plantas jóvenes exhibieron un mayor crecimiento en términos de biomasa y un índice de salud mejorado. Además, se notó un aumento en el espesor de las hojas, tanto en el parénquima en empalizada como en el esponjoso, junto con un incremento en la densidad de estomas y el área estomática por unidad de área foliar. Esto, de acuerdo con Chen *et al.* (2022), implica encontrar un equilibrio que proporcione la cantidad de luz óptima para el crecimiento sin causar daño por fotoinhibición. El control preciso de la intensidad lumínica es esencial para facilitar la adaptación de las plántulas a la luz y promover un desarrollo saludable.

El ICP alcanzado por las plántulas de chile pimiento con el fotoperíodo de  $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  mostró superioridad desde 15,67 hasta 39,45 %, con respecto al de las plántulas con los fotoperíodos de 18 y  $14 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ , respectivamente (Cuadro 3). Xia y Mattson (2022) en una investigación con el cultivo de *Mesembryanthemum crystallinum* L., donde se amplió el fotoperíodo por encima de  $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ , se observaron efectos negativos en la biomasa, altura de planta, la arquitectura de la zona radicular y el correcto desarrollo del aparato fotosintético. Al proporcionar una adecuada cantidad de horas luz se puede mantener estable la actividad fotosintética, lo que permite generar características morfológicas y fisiológicas de mejor calidad; sin embargo, un exceso de luz conduce a que se presenten

fenómenos de foto-protección y foto-daño en los cultivos hortícolas.

La interacción entre la PPFd de  $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y fotoperíodo de 12 h (T5, DLI=15,12) indujo el mayor ICP, que superó desde 22,92 % (T8, DLI=22,68) hasta 60,70 % (T2, DLI=10,08) al ICP producido por los demás tratamientos (Cuadro 3). Wang *et al.* (2021) también encontraron que cuando la DLI se incrementó por encima de  $14,40 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  se produjeron plántulas de pepino más compactas, con mejor calibre de tallo y un eficiente desarrollo del sistema radicular, lo cual es un indicador de calidad de plántula. Otros estudios también sugieren que las plántulas de alta calidad deben exhibir hojas gruesas, tallos firmes y grandes raíces blancas (Yan *et al.*, 2019).

## CONCLUSIONES

La calidad morfológica de la plántula de chile pimiento en agricultura vertical depende de un equilibrio preciso entre la intensidad lumínica y el fotoperíodo, más que de la acumulación total de luz por sí sola. El hallazgo principal de este estudio identifica que una PPFd de  $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  con un fotoperíodo de  $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  (DLI de  $15,12 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) es la mejor combinación para obtener una plántula de chile pimiento de calidad. Bajo estas condiciones, se garantiza el desarrollo de plántulas con una arquitectura superior, caracterizada por una mayor compactidad y un sistema radicular robusto.

## LITERATURA CITADA

1. Adame-Adame, D.Y., D. Alvarado-Camarillo, L.A. Valdez-Aguilar, A.D. Cartmill, D.L. Cartmill y L.d.A.A. Soriano-Melgar. 2025. Daily light integral and nutrient solution electrical conductivity for tomato and bell pepper seedling production in an indoor vertical farm with artificial lighting. *Horticulturae* 11: 454.
2. Aguirre-Becerra, H., J.F. García-Trejo, C. Vázquez-Hernández, A.M. Alvarado, A.A. Feregrino-Pérez, L.M. Contreras-Medina y R.G. Guevara-González. 2020. Effect of extended photoperiod with a fixed mixture of

- light wavelengths on tomato seedlings. *HortScience* 55(11): 1832-1839.
3. Birchler, T., R.W. Rose, A. Royo y M. Pardos. 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 7(1-2): 109-121.
  4. Bures, S., M.U. Gavilán y S. Kotiranta. 2018. *Iluminación Artificial en Agricultura*. Editorial SPE3, S. L. Valencia, España.
  5. Chen, D., K. Yuan, J. Zhang, Z. Wang, Z. Sun, H. Zhang y J. Hu. 2022. Response analysis of fluorescence parameters of tomato seedlings oriented to vertical light environment adaptation. *Plant Science* 314: 111118.
  6. Chen, X.L., X.Z. Xue, W.Z. Guo, L.C. Wang y X.J. Qiao. 2016. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode. *Scientia Horticulturae* 200: 111-118.
  7. Cui, J., S. Song, J. Yu y H. Liu. 2021. Effect of daily light integral on cucumber plug seedlings in artificial light plant factory. *Horticulturae* 7(6): 139.
  8. Currey, C.J., V.A. Hutchinson y R.G. Lopez. 2012. Growth, morphology, and quality of rooted cuttings of several herbaceous annual bedding plants are influenced by photosynthetic daily light integral during root development. *HortScience* 47: 25-30.
  9. Dou, H.J., G. Niu, M.M. Gu y J.G. Masabni. 2018. Responses of sweet basil to different daily light integrals in photosynthesis, morphology, yield, and nutritional quality. *HortScience* 53(4): 496-503.
  10. Fan, X.X., Z.G. Xu, X.Y. Liu, C.M. Tang, L.W. Wang y X.L. Han. 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 Horticulturae* 153: 50-55.
  11. Gao, W., D. He, F. Ji, S. Zhang y J. Zheng. 2020. Effects of daily light integral and LED spectrum on growth and nutritional quality of hydroponic spinach. *Agronomy* 10(8): 1082.
  12. Hernández, R., T. Eguchi, M. Deveci y C. Kubota. 2016. Tomato seedling physiological responses under different percentages of blue and red photon flux ratios using LEDs and cool white fluorescent lamps. *Scientia Horticulturae* 213: 270-280.
  13. Hwang, H., S. An, M.D. Pham, M. Cui y C. Chun. 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(23): 9939.
  14. Iqbal, Z., M. Munir y M.N. Sattar. 2022. Morphological, biochemical, and physiological response of butterhead lettuce to photothermal environments. *Horticulturae* 8: 515.
  15. Jeong, H.W., R.H. Lee, H.M. Kim, H.M. Kim, S.A. Hwang y S.J. Hwang. 2020. Using light quality for cucumber seedling growth control in a closed-type plant production system. *Plants* 9: 639.
  16. Ji, F., S.Q. Wei, N. Liu, L.J. Xu y P. Yang. 2020. Growth of cucumber seedlings in different varieties as affected by light environment. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(5): 73-78.
  17. Jordán, M. y J. Casaretto. 2006. Hormonas y reguladores del crecimiento: auxinas, giberelinas y citocininas. *In: F.A. Squeo y L. Cardemil (eds.). Fisiología Vegetal*. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile. pp. 1-28.
  18. Legnani, G. y W.B. Miller. 2001. Short photoperiods induce fructan accumulation and tuberous root development in *Dahlia* seedlings. *New Phytologist* 149(3): 449-454.
  19. Paradiso, R. y S. Proietti. 2022. 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.
  20. Park, S.W., S. An y Y. Kwack. 2020. Changes in transpiration rates and growth of cucumber and tomato scions and rootstocks grown under different light intensity conditions in a closed transplant production system. *Protected Horticulture and Plant Factory* 29(4): 399-405.

21. Park, Y. y E.S. Runkle. 2018. Spectral effects of light-emitting diodes on plant growth, visual color quality, and photosynthetic photon efficacy: white versus blue plus red radiation. *PLoS One* 13(8): e0202386.
22. Pennisi, G., A. Pistillo, F. Orsini, A. Cellini, F. Spinelli, S. Nicola et al. 2020b. Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. *Scientia Horticulturae* 272: 109508.
23. Pennisi, G., F. Orsini, M. Landolfo, A. Pistillo, A. Crepaldi, S. Nicola et al. 2020a. Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs. *European Journal of Horticultural Science* 85(5): 329-338.
24. Sessa, G., M. Carabelli, M. Possenti, G. Morelli y I. Ruberti. 2018. Multiple pathways in the control of the shade avoidance response. *Plants* 7(4): 102.
25. Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. En: *Proceeding of the 6th International Congress on Soilless Culture*. International Society for Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. Pp. 633-649.
26. Vu, N.T., Y.S. Kim, H.M. Kang y I.S. Kim. 2014. Influence of short-term irradiation during pre- and post-grafting period on the graft-take ratio and quality of tomato seedlings. *Horticulture, Environment and Biotechnology* 55: 27-35.
27. Wang, Y., Y. Chu, Z. Wan, G. Zhang, L. Liu y Z. Yan. 2021. Root architecture, growth and photon yield of cucumber seedlings as influenced by daily light integral at different stages in the closed transplant production system. *Horticulturae* 7(9): 328.
28. Wu, P.C., C. Ashman, D. Awty-Carroll, P. Robson y J. Clifton-Brown. 2022. Optimizing seed-based *Miscanthus* plug plant production with supplemental heat and light, compost type and volume. *GCB Bioenergy* 14(6): 624-638.
29. Xia, J. y N. Mattson. 2022. Response of common ice plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) to photoperiod/daily light integral in vertical hydroponic production. *Horticulturae* 8(7): 653.
30. Yan, Z., D. He, G. Niu y H. Zhai. 2019. Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage. *Scientia Horticulturae* 248: 138-144.
31. Yan, Z., D. He, G. Niu, Q. Zhou y Y. Qu. 2020. Growth, nutritional quality, and energy use efficiency in two lettuce cultivars as influenced by white plus red versus red plus blue LEDs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(2): 33-40.
32. Zha, L. y W. Liu. 2018. Effects of light quality, light intensity, and photoperiod on growth and yield of cherry radish grown under red plus blue LEDs. *Horticulture, Environment and Biotechnology* 59: 511-518.

