

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

**INFLUENCIA DE FACTORES LUMÍNICOS SOBRE EL RENDIMIENTO Y CALIDAD
DE ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.) CULTIVADA EN SISTEMA HIDROPÓNICO**

POR:

NELLY YAMILETH VÁSQUEZ HERNÁNDEZ

TESIS



CATACAMAS

OLANCHO

DICIEMBRE, 2024

INFLUENCIA DE FACTORES LUMÍNICOS SOBRE EL RENDIMIENTO Y CALIDAD
DE ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.) CULTIVADA EN SISTEMA HIDROPÓNICO

POR:

NELLY YAMILETH VÁSQUEZ HERNÁNDEZ

CARLOS ORLANDO INESTROZA LIZARDO, Ph.D.

ASESOR PRINCIPAL

TESIS PRESENTADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA COMO
REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERA EN TECNOLOGÍA ALIMENTARIA

CATACAMAS

OLANCHO

DICIEMBRE, 2024

DEDICATORIA

A mi madre, **Amparo Hernández**, quien ha sido el pilar y la luz que guía cada paso de mi vida. Con su ejemplo de fortaleza, responsabilidad y entrega incondicional, me enseñó a ser la persona que soy hoy. Su fe inquebrantable, y su alegría por mis logros, siempre más profunda que la mía, me han dado la confianza para avanzar. Agradezco cada sacrificio, cada oración, y todo el amor que tiene puesto para que mis sueños se hagan realidad.

A mi padre **Saturnino Vásquez**, por ser ese apoyo constante, siempre dispuesto a extenderme su mano y darme aliento. Su amor y sus palabras de ánimo me han acompañado siempre. Gracias por cuidar de mi e inspirarme a ser mejor cada día.

A mis hermanos, **Edwin, Evelin, Nancy y Ruth**, por ser mi refugio y apoyo. Agradezco su escucha y su cariño en cada momento que necesite compañía. Son, sin duda, una parte esencial de este logro.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a **Dios**, que, como lo dice el nombre de mi clase “Arexius”, levanta mis sueños hacia las estrellas. Su amor siempre me acompaña, y su presencia constante ilumina mi vida.

Mi profundo agradecimiento a mi asesor principal, **Ph.D. Carlos Inestroza**, por su invaluable apoyo, dedicación y guía a lo largo de este proceso. Su paciencia, rigor académico y sabios consejos han sido fundamentales para culminar este trabajo. Sin su ayuda y confianza en mí, este logro no habría sido posible. También a mis asesores auxiliares, **M.Sc. Zoila Flores y Ph.D. Héctor Gómez**, por su orientación y apoyo en la realización de este proyecto.

Al **Ph.D. Víctor y al equipo del CEPOC**, quienes me abrieron las puertas y me brindaron una maravillosa experiencia de aprendizaje. Agradezco profundamente su paciencia, apoyo y la generosidad con la que compartieron su conocimiento, enriqueciendo tanto este proyecto como mi formación personal y profesional.

A **Enrique**, por ser mi compañero incondicional en este camino. Su cariño, apoyo y motivación nunca me han faltado. Gracias por estar ahí, sosteniéndome con paciencia y recordándome siempre lo que soy capaz de lograr.

Vásquez Hernández, NY. 2024. Influencia de factores lumínicos sobre el rendimiento y calidad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en sistema hidropónico. Tesis. Ing. En Tecnología Alimentaria. Catacamas, Olancho, Honduras. Universidad Nacional de Agricultura. 67 p.

RESUMEN

En esta investigación se estudió la influencia de factores lumínicos en el rendimiento y calidad de dos variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) Red Rubin e Italiano Sel Ligure, cultivadas en sistema hidropónico. Se evaluaron parámetros físicos, químicos y rendimiento a los 0, 15 y 30 días post-trasplante, bajo tres espectros de luz (rojo - verde, rojo - azul y verde - rojo) combinados con dos intensidades lumínicas (baja: 180 y alta: 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) además de un tratamiento control (luz blanca). Los resultados muestran que, en comparación a la intensidad baja, a los 30 d la intensidad alta favoreció la acumulación de biomasa en 4%, además de que los espectros con mayor proporción de rojo e intensidad alta estimularon el crecimiento (32-37 cm) y la intensidad baja aumentó el área foliar (16-18 cm^2) en relación a la intensidad alta. En cuanto a los compuestos bioactivos, a los 30 d la actividad antioxidante (FRAP) con intensidad baja fue 44% mayor con relación a la obtenida con intensidad alta, mientras que la capacidad antioxidante (DPPH) y el contenido de polifenoles aumentaron en 35 y 33 % respectivamente con intensidad alta en comparación con intensidad baja. El contenido de flavonoides fue mayor con intensidad baja en Red Rubin y con alta en Italiano Sel Ligure. Los tratamientos con espectros rojo - azul a los 15 d incrementaron las antocianinas en 14 % para la variedad Red Rubin. Los mejores resultados se obtuvieron combinando intensidad alta y espectros que incluyeron rojo y azul, pero se recomienda emplear intensidad baja en etapas iniciales para una mayor eficiencia energética. Estos hallazgos son relevantes para mejorar la producción y calidad de albahaca hidropónica producida en ambientes controlados.

Palabras clave: Red Rubin, Italiano Sel Ligure, intensidad, espectro, ambiente controlado.

CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ANEXOS	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
3.1. Albahaca (<i>Ocimum basilicum</i> L.): características y composición.....	3
3.1.1. Cultivar de albahaca Red Rubin	4
3.1.2. Cultivar de albahaca Italiano Sel. Ligure	4
3.2. Ambientes controlados para la producción de cultivos hidropónicos	5
3.3. Factores lumínicos y su influencia en el desarrollo de las plantas	6
3.3.1. Calidad de la luz sobre las plantas.....	8
3.3.2. Efecto del fotoperiodo sobre las plantas.....	9
3.3.3. Efecto de la intensidad lumínica sobre las plantas	10
IV. MATERIALES Y MÉTODO.....	12
4.1. Lugar de investigación.....	12
4.2. Material biológico	12
4.3. Descripción de los tratamientos.....	13

4.4.	Metodología.....	14
4.4.1.	Etapa 1: Montaje y condiciones de crecimiento.....	14
4.4.2.	Etapa 2: Trasplante	15
4.4.3.	Etapa 3: Cosecha de las plantas.....	16
4.4.4.	Etapa 4: Evaluaciones físicas y de rendimiento	17
4.4.5.	Etapa 5: Evaluaciones químicas	19
4.4.6.	Diseño experimental y análisis estadístico	23
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.5.	Evaluaciones físicas y de rendimiento.....	24
4.5.1.	Peso fresco de la planta	24
4.5.2.	Altura de la planta.....	26
4.5.3.	Área foliar.....	27
4.5.4.	Color de las hojas	29
4.5.5.	Peso seco de la planta	31
4.5.6.	Contenido relativo de agua (CRA).....	33
4.6.	Evaluaciones químicas en las plantas.....	34
4.6.1.	Capacidad antioxidante (FRAP y DPPH).....	34
4.6.2.	Polifenoles totales.....	36
4.6.3.	Contenido de flavonoides	38
4.6.4.	Antocianinas totales.....	40
VI.	CONCLUSIONES.....	42
VII.	RECOMENDACIONES	43
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	44
IX.	ANEXOS	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Tratamientos aplicados. UV = ultravioleta, A = azul, V = verde, R = rojo, RL = rojo lejano, B = blanco.	13
Tabla 2: Distancias utilizadas entre los niveles de las carpas para el montaje de las lámparas.....	14
Tabla 3: Composición de la solución nutritiva utilizada para la nutrición de las plantas de albahaca.	16
Tabla 4: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en color (L^* , C^* y h°) de albahaca (A y B).....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variedades de albahaca utilizadas en el experimento.	vii
Figura 2: Montaje de las bandejas hidropónicas y su disposición espacial durante el cultivo de albahaca.	15
Figura 3: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el peso fresco de albahaca (A y B).	25
Figura 4: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en la altura de albahaca (A y B).	27
Figura 5: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el área foliar de albahaca (A y B).	28
Figura 6: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el porcentaje de peso seco de albahaca (A y B).	32
Figura 7: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el porcentaje de CRA de albahaca (A y B).	34
Figura 8: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en la capacidad antioxidante de albahaca (A, C y B, D).	35
Figura 9: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el contenido de polifenoles de albahaca (A y B).	37
Figura 10: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el contenido de flavonoides de albahaca (A y B).	39
Figura 11: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el contenido de antocianinas de albahaca (A y B).	41

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Condiciones de crecimiento y lámparas utilizadas en el estudio.	56
Anexo 2: Unidad experimental, bandeja hidropónica con 14 plantas.....	56
Anexo 3: Extracción de muestras para evaluaciones químicas.....	56
Anexo 4: Determinación de área foliar (Izquierda) y corte realizado para medir CRA (derecha).	57
Anexo 5: Curvas de calibración realizadas con Trolox (1), Acido galico (2) y Rutina (3)..	57

I. INTRODUCCIÓN

En Honduras, la malnutrición se debe en gran parte a la falta de acceso a dietas nutritivas, asequibles y seguras, la mayoría de la población no consume con frecuencia alimentos saludables como frutas y hortalizas, lo que resulta en sobrepeso y obesidad, condiciones asociadas con enfermedades crónicas no transmisibles (Elvir *et al.* 2022). En este sentido resulta crucial fomentar la inclusión de alimentos saludables en la dieta, como la albahaca, una hortaliza aromática rica en ácidos fenólicos y flavonoides con beneficios para tratar enfermedades cardiovasculares y reducir el riesgo de cáncer (Cisternas *et al.* 2022).

La albahaca es un cultivo muy popular en todo el mundo, es relativamente fácil de cultivar y se adapta bien a sistemas hidropónicos, lo que asegura su producción y disponibilidad durante todo el año, contribuyendo a la seguridad alimentaria (Sipos *et al.*, 2021). Sin embargo, para su correcto desarrollo es importante tener en cuenta algunos factores lumínicos, que regulan procesos fisiológicos y bioquímicos como el crecimiento y la síntesis de compuestos bioactivos (Lobiuc *et al.*, 2017; Harakotr *et al.*, 2019).

Aunque la albahaca es considerada un cultivo valioso y nutricionalmente beneficioso, se desconocen sus rendimientos, calidad nutricional y nutracéutica en función de las condiciones lumínicas que se le puedan brindar (Rivas 2023). Es por ello que esta investigación tiene por objetivo, estudiar la influencia de la intensidad lumínica y el fotoperiodo sobre la calidad global y el rendimiento de albahaca cultivada en sistema hidropónico, así como determinar las condiciones lumínicas óptimas para su cultivo.

II. OBJETIVOS

General:

- Analizar la influencia de factores lumínicos sobre el rendimiento y calidad de albahaca cultivada en sistema hidropónico.

Específicos:

- Determinar el efecto del espectro y la intensidad lumínica sobre el rendimiento de albahaca cultivada en sistema hidropónico.
- Analizar cómo diferentes espectros e intensidades de luz afectan la capacidad antioxidante y el contenido de algunos compuestos bioactivos en albahaca.
- Identificar las condiciones lumínicas más adecuadas para el cultivo de albahaca en sistema hidropónico, en función de su efecto en el rendimiento y la calidad del cultivo.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Albahaca (*Ocimum basilicum* L.): características y composición

La albahaca es una planta aromática muy utilizada para la preparación de platillos, esto se debe principalmente a su versatilidad culinaria y a sus distintivos atributos sensoriales, tiene un olor agradable y su sabor se caracteriza por ser intenso y especiado, con notas dulces y ligeramente picantes; los portadores responsables del olor y sabor característicos de la albahaca incluyen taninos, flavonoides, saponinas y aceites esenciales; estos aceites representan entre un 0,3% y un 0,8% del contenido de la planta, siendo el carvacrol y el linalool los componentes principales (Karan *et al.* 2019).

La albahaca se ha convertido en una de las plantas más ventajosas dentro de los cultivos hidropónicos debido a la presencia de antioxidantes vegetales, incluidos los compuestos fenólicos, vitamina C, flavonoides, antocianinas, carotenoides y los macro y micronutrientes (Sipos *et al.* 2021). Estas sustancias son capaces de retrasar o inhibir la oxidación de lípidos u otras moléculas al interferir con las reacciones oxidativas en cadena, descomponer peróxidos y neutralizar radicales libres y especies reactivas de oxígeno (Lobiuc *et al.* 2017).

3.1.1. Cultivar de albahaca Red Rubin

El cultivar de albahaca "Red Rubin" es una variedad de la familia Lamiaceae con un color distintivo que se intensifica en climas cálidos y con luz solar abundante, es originaria de regiones como India, Asia y África, pero también se cultiva en otros lugares del mundo (Bufalo *et al.* 2015). Se caracteriza por su sabor más fuerte que el de la albahaca dulce, y sus hojas pueden usarse frescas, congeladas o secas, además, en la industria alimentaria, se le considera una fuente de pigmentos naturales gracias a su alto contenido de antocianinas (Fernandes *et al.* 2019).

Gracias a sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas y beneficios para la salud, esta variedad de albahaca se considera un recurso valioso para la investigación en medicina natural y nutrición (Biesiada y Kus 2010). La composición nutricional de la albahaca Red Rubin incluye un alto contenido de carbohidratos, junto con una variedad de ácidos orgánicos, de los cuales el ácido quínico es el principal, en cuanto a los ácidos grasos, el ácido α -linolénico es el predominante, y presenta una alta concentración de γ -tocoferol, lo cual resalta su potencial antioxidante, a nivel de compuestos fenólicos, se han identificado 26 moléculas, entre las cuales el ácido rosmarínico y ciertas antocianinas, como la cianidina-3-(6,6'-di-p-cumaroil)-soforósido-5-glucósido, son las más prominentes (Hend 2018) .

3.1.2. Cultivar de albahaca Italiano Sel. Ligure

La albahaca italiana, conocida también como Genovesa o "Italiano Sel. Ligure", es una destacada variedad de *Ocimum basilicum* L. famosa por su uso en la gastronomía mediterránea, especialmente por ser el ingrediente principal del pesto, en Italia (Maggio *et al.* 2016). Su perfil aromático distintivo, caracterizado por un alto contenido de linalol y

eugenol y la ausencia de estragol, le confiere un sabor inconfundible y apreciado. Además de su uso culinario, la albahaca italiana se emplea como hierba medicinal debido a sus beneficios para la salud. Su versatilidad permite utilizarla fresca o seca en salsas, sopas, ensaladas y como especia, siendo un ingrediente ampliamente reconocido en la cocina internacional (Ciriello *et al.* 2021).

En cuanto a su composición, la albahaca italiana posee una notable riqueza fitoquímica, que incluye metabolitos secundarios, micronutrientes como vitaminas y minerales, y una alta concentración de compuestos volátiles que aportan su aroma característico, es rica en ácidos fenólicos como el ácido rosmarínico, el ácido chicórico y el ácido cafeico, conocidos por sus propiedades antioxidantes y beneficios para la salud; la variabilidad genética influye en la presencia de estos compuestos, y se han identificado prácticas de cultivo que pueden potenciar su perfil fitoquímico y nutricional como el manejo y las condiciones del cultivo (Ciriello *et al.* 2022).

3.2. Ambientes controlados para la producción de cultivos hidropónicos

En el pasado, el aprovechamiento del espacio suprayacente solucionó una parte de los problemas de crecimiento en las grandes urbes, transformando locaciones de un solo piso en los grandes rascacielos conocidos en la actualidad. Ese mismo concepto se aplica a la producción de alimentos, cuyos requerimientos esenciales renuncian al uso de grandes superficies de tierra para la obtención de biomasa (Pérez y Morales-Fonseca 2022). Ante este problema, surge la agricultura en ambientes controlados,

Se conoce como agricultura en ambientes controlados, aquella técnica que permite desarrollar cultivos, controlando factores externos como la luz, el agua, la temperatura y los fertilizantes. Esta forma de producción de alimentos resulta más eficiente y ofrece cultivos

todo el año independientemente de la estación (Pérez & Morales-Fonseca 2022). La evolución de las técnicas de producción ha conducido a potencializar la agricultura en ambientes controlados; entre los tipos más comunes se encuentran los invernaderos, techos verdes, fábricas de plantas y lo que hoy día se conoce como granjas verticales.

La agricultura vertical rompe con el esquema tradicional, ya que los cultivos pasan del plano horizontal a un aprovechamiento de la verticalidad; es un método para el cultivo de plantas usualmente sin uso de suelo ni luz natural (Frazier 2017). La técnica de agricultura vertical ejemplifica un sistema de producción sostenible, ya que resume una actividad que genera impactos ambientales positivos; la tecnología e innovación de esta nueva forma de agricultura contribuyen al desarrollo de prácticas ambientales que ocasionan múltiples beneficios no solo al contexto ambiental sino al social y económico (Pérez y Morales-Fonseca 2022).

La agricultura vertical solo puede adaptarse a una selección de cultivos, principalmente aquellos utilizados en ensaladas y hierbas, los cultivos de albahaca son ideales para la agricultura vertical porque son sensibles a las bajas temperaturas y responden bien a las condiciones climáticas controladas lo que resulta en un mejor sabor que el de la albahaca cultivada en el campo; su producción hidropónica en invernadero proporciona condiciones óptimas de clima y fertilidad, lo que tiene el potencial de reducir la variabilidad que pueda surgir debido a los cambios estacionales y las condiciones del suelo durante su crecimiento y desarrollo (Sipos *et al.* 2021).

3.3. Factores lumínicos y su influencia en el desarrollo de las plantas

La luz es una de las señales de desarrollo esenciales para las plantas. Las plantas responden a la presencia y a la ausencia de luz a través de sus componentes de señalización. Las

diferentes longitudes de onda de la luz estimulan el conjunto respectivo de fotorreceptores, como los fitocromos, los criptocromos y las fototropinas (Singh *et al.* 2023). Con su calidad, intensidad y fotoperiodo, la luz es un factor abiótico decisivo que influye directamente en la biomasa vegetal y en la acumulación de metabolitos especializados (ME). La radiación fotosintéticamente activa (RFA) tiene efectos significativos en el metabolismo primario y secundario de las plantas, lo que influye en sus características morfológicas y sus sistemas antioxidantes (Vrkić, Šić, Dujmovic y Benko 2024).

La iluminación basada en LED (diodos emisores de luz) encierra la tecnología más reciente para ingresar al campo de la agricultura en ambientes controlados como fuente principal de energía para las plantas. Estos dispositivos presentan la ventaja de emitir longitudes específicas de onda electromagnética, las cuales pueden ajustarse para proporcionar la energía adecuada y estimular los pigmentos fotosintéticos, lo que implica una mayor acumulación de peso seco y un uso más eficiente de la energía en comparación con dispositivos convencionales como lámparas de sodio de alta presión o fluorescentes (Pérez y Morales-Fonseca 2022).

Controlar el fotoperiodo y las longitudes de onda de luz durante el crecimiento y desarrollo de hortalizas como el brócoli resulta en un mejor rendimiento y calidad nutricional, según una investigación realizada por Pardo *et al.* (2015). Los beneficios de controlar los factores lumínicos también se ven reflejados en un estudio que demostró cómo la manipulación del fotoperiodo y la intensidad lumínica promueven el crecimiento y mejoran la nutrición de cultivos de col rizada y col rizada china, lo que se traduce en un aumento significativo de la biomasa y la concentración de nutrientes, incluyendo clorofila, carotenoides, azúcares solubles, proteínas solubles, vitamina C y capacidad antioxidante (Liu *et al.* 2022).

3.3.1. Calidad de la luz sobre las plantas

La luz se compone de diferentes colores, que se corresponden con luces de diferentes longitudes de onda (expresadas en nanómetros). El espectro visible al ojo humano cubre la región de 400 a 700 nm, mientras que las plantas perciben además de esto, las regiones del ultravioleta (uv) y del rojo lejano. Para ello están dotadas de distintos tipos de proteínas: receptores de luz uv-B (280 - 320 nm); criptocromos, que absorben mayoritariamente luz uv-A (320-390 nm) y azul (400 - 500 nm); clorofilas que absorben luz azul y roja (600 - 700 nm); carotenoides, que absorben luz verde y amarilla (400 - 600 nm), y los fitocromos, que absorben luz roja y roja lejana (700 - 800 nm) (Martínez-García *et al.* 2002).

Todo el espectro de luz no es beneficioso para las plantas y su efecto puede variar según el tipo de planta al que se aplique. Los organismos vivos generalmente absorben únicamente el espectro electromagnético visible (luz). La luz se encarga de controlar procesos como la fotosíntesis, el tiempo de floración y la morfogénesis en las plantas donde, dos fotorreceptores principales, los fitocromos y los criptocromos, son los responsables de los cambios morfológicos y de su desarrollo (Hasan *et al.* 2017).

Concretamente, un estudio realizado con cinco variedades de rábano (*Raphanus sativus* L.) expuestas a diferentes espectros de luz, se observó que el uso de un espectro de luz roja y azul incrementó el crecimiento de las plantas en términos de diámetro, peso fresco y peso seco, promoviendo de manera eficaz su desarrollo. Además, la adición de luz verde al espectro de luz roja y azul mejoró la tasa fotosintética (Chutimanukul *et al.*, 2024). En germinados de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) las concentraciones más altas de clorofila en el tejido, β -caroteno, luteína, carotenoides, calcio, magnesio, fósforo, azufre, boro, cobre, hierro, manganeso, zinc, glucoiberina, glucorafanina, 4-metoxiglucobrassicina y neoglucobrassicina se encontraron al cultivar bajo un tratamiento de luz azul al 20 % y luz roja al 80 % (Kopsell *et al.* 2014).

3.3.2. Efecto del fotoperiodo sobre las plantas

Los cambios en el ritmo interno de la planta, la síntesis y desempeño de los metabolitos secundarios, dependen en gran medida de los factores ambientales que controlan su crecimiento, siendo uno de los más importantes el fotoperiodo (Fayezizadeh 2024). El fotoperiodo es la cantidad de luz y oscuridad en un ciclo diario de 24 h, influye significativamente en el rendimiento y también en la acumulación de compuestos activos biológicos (Jackson 2009 y Sipos *et al.* 2021). Es una herramienta adecuada que busca crear un leve fotoestrés en los microvegetales, con el objetivo de mejorar su contenido de fitoquímicos (Delian *et al.* 2015).

La respuesta de diferentes plantas a fotoperíodos prolongados es diferente, investigaciones recientes muestran que la iluminación continua (IC, fotoperiodo de 24 h) puede conducir a la producción de microvegetales sin daño por la luz, reduciendo los costos de producción (Lanoue *et al.* 2022). Sin embargo la IC significa que tanto la energía como los componentes de señalización de la luz se suministran continuamente y existen algunas especies de plantas sensibles que en respuesta a la IC presentan clorosis y necrosis foliar, disminución en la fotosíntesis y senescencia foliar acelerada (Shibaeva 2022), exceder los límites tolerables del fotoperiodo puede estar asociado con daño fotooxidativo, producción de especies reactivas de oxígeno (ERO) y desajuste en los ritmos circadianos internalizados, causando reducción en el rendimiento y pérdidas económicas para los productores (Fayezizadeh *et al.* 2024).

Por otro lado, en los períodos cortos de luz con oscuridad prolongada, el factor CSN5B aumenta la degradación de la GDP-d-manosa pirofosforilasa (GMP) a través de la proteasoma 26S y reduce el nivel de vitamina C; por tanto, la oscuridad causa el catabolismo de la vitamina C (Truffault *et al.* 2016). Los dos fotoperiodos que se utilizan

con mayor frecuencia en la producción vegetal son de 12 y 16 horas ya que estos favorecen el crecimiento óptimo y la salud de las plantas (Appolloni *et al.* 2021).

Concretamente, en amaranto, remolacha y espinaca se obtuvieron concentraciones altas de clorofila, polifenoles y antioxidantes totales con un fotoperiodo de 12 h, mientras que, con un fotoperiodo de 24 h, las concentraciones fueron menores (Gallo 2020). En lechuga cultivada hidropónicamente bajo tres fotoperiodos de 8, 16 y 24 h se obtuvo mayor crecimiento vegetativo con un fotoperiodo de 24 h (Thomas y Awadh 2020). Mientras que, albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada con un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad presentó un mejor perfil aromático y promovió la acumulación de ácido chicórico y ácido rosmarínico en las variedades italiana y griega (Pulvirenti 2024).

3.3.3. Efecto de la intensidad lumínica sobre las plantas

Para mejorar los efectos de los diferentes fotoperiodos en la síntesis fitoquímica de las plantas, se debe ajustar también la intensidad lumínica, optimizando así la integral de luz diaria (ILD). La ILD resulta de la combinación del fotoperiodo y la intensidad lumínica, representa la cantidad total de luz fotosintéticamente activa que recibe una planta a lo largo del día, se mide en moles por metro cuadrado por segundo ($\text{mol/m}^2/\text{s}$) y su adecuado manejo es esencial para maximizar la fotosíntesis y el desarrollo de las plantas, influyendo significativamente en la calidad y el rendimiento (Fayezizadeh *et al.* 2024).

La intensidad lumínica se refiere al número de fotones que inciden en una cierta superficie por segundo o por día. Se puede cuantificar instantáneamente con un sensor cuántico o medir el acumulado por día para obtener la integral de luz diaria (ILD), en la región fotosintéticamente activa (RFA) del espectro luminoso (Massa *et al.* 2015). La intensidad lumínica promueve la acumulación de pigmentos como, carotenos (α y β) y clorofila b,

debido a una estimulación de la actividad enzimática que ocurre cuando hay estrés luminoso, ya que una de las funciones de los carotenoides es coleccionar luz para la fotosíntesis o desviarla para proteger a las clorofilas de la oxidación (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

Un aumento en la intensidad lumínica incrementa la radiación fotosintéticamente activa interceptada, lo que resulta en la acumulación de biomasa; por otro lado, el contenido de proteína está relacionado con la fotosíntesis y depende de la intensidad de radiación durante el crecimiento de la planta (Rivas 2023). Una intensidad lumínica alta favorece la acumulación de carbohidratos en cloroplastos y citoplasma; lo que aumenta el contenido energético (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Respecto a las intensidades muy bajas, cada especie de planta comienza el proceso de fotosíntesis a distintos niveles de energía de luz, lo que se denomina punto de compensación de la luz. Este punto comienza cuando la energía de la luz es suficiente para realizar la actividad fotosintética (Lopez 2023) por lo que bajas intensidades lumínicas afectan la fotosíntesis y se deben evitar.

En un estudio sobre cultivos de colinabo morado (*Brassica oleracea* var. *gongylodes*), mizuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) y mostaza (*Brassica juncea*) cultivados en sistemas de bandejas hidropónicas, se observó un aumento en el porcentaje de peso seco a medida que la intensidad lumínica incrementaba de 105 a 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Gerovac *et al.* 2016). Así mismo se ha encontrado que una intensidad lumínica de 330 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ es óptima para el crecimiento y la acumulación de compuestos bioactivos en vegetales de convolvulus acuático (*Ipomoea aquatica*), albahaca sagrada roja (*Ocimum tenuiflorum*), eneldo (*Anethum graveolens*) y albahaca limón (*Ocimum citriodorum*), produciendo el mayor peso seco, capacidad de neutralización de radicales libres, contenido total de fenoles y flavonoides (Harakotr *et al.* 2019).

IV. MATERIALES Y MÉTODO

4.1. Lugar de investigación

La investigación se llevó a cabo en el Centro de Estudios Postcosecha de la Universidad de Chile (CEPOC), ubicado en Avenida Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago de Chile.

4.2. Material biológico

Se cultivaron semillas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.), del proveedor Galassi Sementi Srl, en la variedad morada (Red Rubin) y la variedad verde (Italiano Sel Ligure) (Figura 1). Previo a la siembra, se realizó una prueba de germinación de las semillas según las reglas ISTA (ISTA 2016), colocando 70 semillas en papel absorbente al interior de placas Petri a 25 °C y 95 % de HR. Posteriormente se sembró una semilla de albahaca por alveolo en bandejas de almacigo con 162 alveolos. Se utilizó como sustrato turba (Kekkilä, DSM 2 W, Finlandia) y perlita expandida en proporción de 1:1. Las bandejas fueron colocadas en carpas y regadas cada 4 días con agua potable.



Figura 1: Variedades de albahaca utilizadas en el experimento.

4.3. Descripción de los tratamientos

Los tratamientos fueron una combinación de 2 factores: intensidad (baja 180 y alta 250) y espectro (RV, RA, VR, B), el nombre de cada espectro se asignó en función de las iniciales de los porcentajes espectrales predominantes en su composición, excepto en el caso del tratamiento control, ya que, en este, la composición espectral resulta en luz equivalente a la luz blanca, por lo que simplemente se denominó B. En todos los tratamientos se utilizó un fotoperiodo 16 h luz y 8 h oscuridad. En total se obtuvieron 7 tratamientos (Tabla 1), el tratamiento control con intensidad de 250 y luz blanca simuló las condiciones de luz natural y permitió comparar con los efectos de los otros tratamientos. Los tratamientos se aplicaron a las 2 variedades de albahaca (Morada y verde). Cada tratamiento se repitió 5 veces y la unidad experimental consistió en una bandeja hidropónica con 14 plantas.

Tabla 2: Tratamientos aplicados. UV = ultravioleta, A = azul, V = verde, R = rojo, RL = rojo lejano, B = blanco.

Nombre del tratamiento	Intensidad ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Espectro	Relación en % de espectro (UV : A : V : R : RL)	Variedad
180RV	180	RV	1 : 17 : 24 : 47 : 11	Morada (Red Rubin)
180RA		RA	1 : 20 : 8 : 62 : 9	
180VR		VR	0 : 18 : 39 : 38 : 5	
250RV	250	RV	1 : 17 : 24 : 47 : 11	
250RA		RA	1 : 20 : 8 : 62 : 9	
250VR		VR	0 : 18 : 39 : 38 : 5	
Control	250	B	0 : 26 : 49 : 22 : 3	
180RV	180	RV	1 : 17 : 24 : 47 : 11	Verde (Italiano Sel Ligure)
180RA		RA	1 : 20 : 8 : 62 : 9	
180VR		VR	0 : 18 : 39 : 38 : 5	
250RV	250	RV	1 : 17 : 24 : 47 : 11	
250RA		RA	1 : 20 : 8 : 62 : 9	
250VR		VR	0 : 18 : 39 : 38 : 5	
Control	250	B	0 : 26 : 49 : 22 : 3	

4.4. Metodología

4.4.1. Etapa 1: Montaje y condiciones de crecimiento

Para desarrollar la investigación, se utilizaron cultivos hidropónicos de albahaca que crecieron en un ambiente controlado (Anexo 1); dentro de dos cámaras frigoríficas de 350 x 260 x 280 cm, mantenidas a una temperatura promedio de 25 ± 2 °C y una humedad relativa (HR) de 80 ± 5 %, condiciones que fueron monitoreadas mediante dataloggers (Elitech, RC-51, Reino Unido). Cada cámara fue destinada a intensidades lumínicas diferentes; $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en una y $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la otra. La intensidad se midió a 10 cm de altura de la base de las bandejas, en 5 puntos (al centro y en las 4 esquinas de la bandeja) utilizando un espectro-radiómetro (UPRtek, MK350D, Taiwán).

Dentro de las cámaras se instalaron cinco carpas de cultivo de 50 x 120 x 190 cm, cada una con tres niveles apilados uno sobre otro a diferentes distancias (Tabla 2). En cada nivel se colocaron dos bandejas, una para cada variedad de albahaca y se instalaron luces LED (Light Grow LED, “LGL”) (Anexo 1), con tres combinaciones de espectros (RV, RA, VR). Para el ensayo control, se montó una estantería metálica de 170 x 180 x 45 cm, con tres niveles. Durante todo el ensayo se aplicó un fotoperiodo de 16 h de luz y 8 h de oscuridad, controlado mediante un temporizador análogo (T-101, Completel, China). Antes del montaje, las carpas y bandejas fueron debidamente sanitizadas.

Tabla 5: Distancias utilizadas entre los niveles de las carpas para el montaje de las lámparas.

Intensidad ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Espectro	Distancia (cm)
180	RV	44
	RA	62
	VR	32
250	RV	20
	RA	40
	VR	50
250 (control)	B	39

4.4.2. Etapa 2: Trasplante

Una vez las plántulas desarrollaron cuatro hojas verdaderas se extrajeron 20 plántulas de cada repetición, 14 para trasplante y 6 para análisis físicos y químicos. Durante la extracción, se limpió por completo el sustrato de las raíces utilizando agua. Las 14 plántulas seleccionadas para el trasplante se colocaron en un sistema hidropónico de raíz flotante, con 14 plántulas por bandeja de hidroponía (Anexo 2). Las bandejas consistieron en una plancha de acrílico de 45 x 35 x 0.5 cm con 15 perforaciones (14 para plantas y 1 para la manguera de bombeo de oxígeno), una base de esponja de 3 x 3 cm y una bandeja plástica de 45 x 35 x 7 cm (Figura 2).



Figura 4: Montaje de las bandejas hidropónicas y su disposición espacial durante el cultivo de albahaca.

Para la nutrición de las plantas se preparó la solución nutritiva propuesta por Hernández (2023), esta formulación cuenta con los micro y macronutrientes necesarios para el desarrollo óptimo de las plantas (Tabla 3). A cada bandeja de hidroponía se le suministraron 4 litros de esta solución, la cual fue renovada semanalmente. La oxigenación de la solución se realizó a través de bombas individuales (EJET 268, China) conectadas a mangueras de 4

mm de diámetro y a un compresor de aire. Al realizar la solución, el pH se ajustó a un rango de 5.5 – 6.0 con una solución ácida (95 % H₂O, 3.8 % HNO₃, 1.2 % H₃PO₄) y fue medido con un medidor de pH (HANNA, HI2020, Italia). También se realizaron mediciones del oxígeno disuelto mediante un medidor portátil de oxígeno disuelto (HANNA, HI946, Italia) y mediciones de la conductividad eléctrica a través de un medidor de conductividad portátil (HANNA, HI99300, Italia).

Tabla 7: Composición de la solución nutritiva utilizada para la nutrición de las plantas de albahaca.

Fertilizante	Concentración (g 100 L ⁻¹)
Nitrato de calcio	11.6
Nitrato de magnesio	22.1
Fosfato monopotásico	26.4
Nitrato de potasio	22.3
Nitrato de amonio	14
Ácido bórico	0.04
Sulfato de manganeso	0.12
Sulfato de cobre	0.01
Molibdato de amonio	0.01
Sulfato de zinc	0.01
Quelato de hierro (6% Fe)	0.7

4.4.3. Etapa 3: Cosecha de las plantas

Las muestras de cada unidad experimental se cosecharon en tres momentos distintos, 0, 15 y 30 días (0 d, 15 d y 30 d) post-trasplante. La cosecha se realizó extrayendo plantas de la bandeja hidropónica y cortando sus raíces. En cada periodo se extrajeron de manera aleatoria 6 plantas por cada repetición, donde 3 plantas fueron destinadas a evaluaciones físicas y 3 a evaluaciones químicas. Las evaluaciones físicas se realizaron de inmediato. Para las evaluaciones químicas se utilizaron las hojas de las plantas seleccionadas, se congelaron con nitrógeno líquido a -200 °C y se trituraron en un mortero hasta conseguir

una textura similar a la harina (Anexo 3). El triturado fue rápidamente almacenado en tubos cónicos para centrífuga Falcon de 15 mL, se rotularon y almacenaron en un congelador de ultra-baja temperatura (SANYO, MDF-U33V, Japón) a -80 °C hasta el día del análisis.

4.4.4. Etapa 4: Evaluaciones físicas y de rendimiento

a) Peso fresco de la planta

Se obtuvo el peso fresco de todas las albahacas de cada repetición, esta medición se expresó en peso fresco por g de la planta (PF / g planta), para evaluar la cantidad de biomasa producida en cada tratamiento. Las muestras cosechadas se pesaron enseguida para evitar pérdidas por deshidratación. Se utilizó una balanza semi-analítica (Kern, CMN3000-1, Alemania)

a) Altura de la planta

La medición de la altura de las plantas se llevó a cabo utilizando una regla graduada en centímetros (cm), la medida fue tomada desde el punto de corte en el momento de la cosecha (hipocótilo) hasta la parte superior de las hojas. Los resultados se expresaron en cm.

a) Área foliar

Para medir el área de las hojas, se utilizó el programa ImageJ (versión 1.53k, desarrollado en Estados Unidos). Se fotografiaron las hojas de las plantas con alta resolución,

asegurando una iluminación uniforme y un fondo contrastante para facilitar la segmentación de la imagen, en las fotografías se incluyó una escala de referencia visible graduada en cm (regla). Las fotografías se cargaron en el software ImageJ, donde se realizó un proceso de calibración para establecer la escala adecuada, esto se logró relacionando los píxeles con la unidad de medida que se incluyó como escala de referencia. Luego, se delimitó con precisión el contorno de las hojas y se registró el área en cm² (Anexo 4).

a) Color de las hojas

Para la evaluación del color se llevaron a cabo dos mediciones de luminosidad, en la cara adaxial de las hojas, evitando la nervadura central, mediante el uso de un colorímetro triestímulo (Modelo Minolta Chroma meter, CM-2500d, Japón). Calibrado previamente con un estándar blanco, usando el sistema CIE Lab. Los parámetros evaluados en esta medición fueron L que indica luminosidad del color (0 = negro 100 = blanco), croma o saturación (C*) y ángulo de tono (h°).

b) Peso seco de la planta

Se midió la materia seca a partir de 10 g de albahaca fresca de cada repetición, posteriormente estas muestras se secaron en una estufa a 60 °C hasta que mantuvieron un peso constante. Se pesó utilizando una balanza semi-analítica y los resultados se expresaron como porcentaje de rendimiento en materia seca, usando la siguiente ecuación:

$$\% PS = \frac{PMS}{PTM} * 100 \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde: PS = peso seco, PMS = peso de materia seca, PTM = peso total de la muestra

c) Contenido relativo de agua (CRA)

Para evaluar el contenido relativo de agua (CRA), se comparó el contenido de agua presente en el tejido respecto a la turgencia total. Esto se realizó haciendo un recorte circular a las hojas frescas (Anexo 4), los cuales se pesaron en una balanza (RADWAG, S220.R2, Reino Unido), lo que permitió conocer su peso fresco. Luego estos recortes se colocaron sobre placas petri con agua destilada y papel absorbente, para ser almacenados dentro de un refrigerador a 4°C por un periodo de 24 horas. Posteriormente, fueron pesados para conocer su peso turgente y se dispusieron las placas petri a un horno a 80 °C por 48 horas y pesados nuevamente para obtener su peso seco. Para transformar los resultados en un porcentaje CRA se usó la siguiente ecuación:

$$CRA = \frac{PF-PS}{PT-PS} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

CRA = Contenido relativo de agua, PF = Peso fresco, PS = Peso seco y PT = Peso turgente

4.4.5. Etapa 5: Evaluaciones químicas

Para las evaluaciones de actividad antioxidante, polifenoles, flavonoides y antocianinas, se preparó la muestra diluyendo 200 mg de materia liofilizada en 10 mL de metanol al 70 %. Esta dilución se sometió a agitación en un Vortex (DLAB 8031102000 Mx-S) durante 1 minuto y posteriormente se pasó a una centrifuga (Z326-K, HERMLE, Alemania) por 15 min a 4 °C y 6000 rpm, al finalizar se extrajo el sobrenadante para realizar las evaluaciones correspondientes.

Todas las mediciones de absorbancia se realizaron usando un espectrofotómetro de microplacas (ASYS UVM340, Biochrom Ltd., Cambridge, Reino Unido).

a) Actividad antioxidante por el método FRAP

Para el método FRAP, se siguió el procedimiento propuesto por Benzie y Strain (1996), que implica preparar un reactivo FRAP mediante la combinación de tampón acetato (300 mmol L⁻¹ pH 3.6), solución acuosa de cloruro férrico hexahidratado (20 mmol L⁻¹) y TPTZ (10 mmol L⁻¹) en HCL (40 mmol L⁻¹) en una proporción 10:1:1, después de la preparación se calentó en un baño termostático a 40 °C durante 10 min. Posteriormente, se añadieron 20 µL de extracto vegetal y 600 µL del reactivo FRAP en un tubo Eppendorf de 2 mL. Después de 30 min, se extrajeron 200 µL y se colocaron en una placa de 96 compartimientos para realizar mediciones cada 30 min durante cinco horas a 593 nm mediante espectrofotómetro. La capacidad antioxidante total se calculó mediante una curva de calibración realizada con Trolox (Anexo 5) y los resultados se expresaron como mg equivalentes de Trolox por cada 100 gramos de peso fresco.

a) Actividad antioxidante por el método DPPH

Para el método DPPH, se mezclaron 250 µL de extracto con 1 mL de reactivo DPPH (0.4 mM) en un tubo Eppendorf de 2 mL y se dejó reaccionar durante 20 min. Luego, se tomó una muestra de 200 µL y se transfirió a una placa de 96 compartimientos para medir la absorbancia a 517 nm mediante espectrofotómetro), repitiendo la medición de absorbancia en la muestra a las 2 h posterior a la primera medición. La capacidad antioxidante total se calculó mediante una curva de calibración realizada con Trolox (Anexo 5) y los resultados se expresaron como mg equivalentes de Trolox por cada 100 gramos de peso fresco.

b) Contenido de polifenoles

El contenido de polifenoles totales se evaluó según el método propuesto por Singleton y Rossi (1965) y Lara *et al.* (2021). En un tubo Eppendorf de 2 mL se agregaron 100 μ L de extracto vegetal y 200 μ L de reactivo de Folin-Ciocalteu al 10% y se dejó reaccionar durante 5 min. Posteriormente se agregaron 800 μ L de carbonato de sodio (Na_2CO_3) a 700 mM y se dejó reaccionar durante una hora. Después de esto, se agregaron 200 μ L de la solución a una placa de 96 compartimientos para medir la absorbancia a 765 nm mediante espectrofotómetro. El contenido de polifenoles totales se calculó mediante una curva de calibración realizada con ácido gálico (Anexo 5). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por cada 100 gramos de peso fresco.

c) Contenido de flavonoides

Para la determinación de flavonoides se prepararon 3 soluciones: una de nitrito de sodio (NaNO_2) al 5%, disolviendo 2.5 g de NaNO_2 en un matraz de 50 mL con agua destilada; otra solución de cloruro de aluminio hexahidratado (AlCl_3) al 10%, disolviendo 5 g de AlCl_3 en un matraz de 50 mL con agua destilada y finalmente una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1M. disolviendo 4 g de NaOH en un matraz de 100 mL con agua destilada.

Para la reacción, se agregaron 100 μ L del extracto y 100 μ L de NaNO_2 al 5% en un tubo Eppendorf de 2 mL, permitiendo que la mezcla reaccionara durante 5 minutos, luego se agregaron 100 μ L de AlCl_3 al 10% y se dejó reaccionar 6 minutos. Posteriormente, se incorporaron 670 μ L de NaOH 1M, y se transfirieron 200 μ L de esta solución a una placa de 96 compartimientos para medir la absorbancia a 512 nm mediante espectrofotómetro. El contenido de flavonoides totales fue calculado utilizando una curva de calibración preparada con Rutina (Anexo 5). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por cada 100 gramos de peso fresco.

d) Contenido de antocianinas totales

Las antocianinas se midieron por el método de pH diferencial (Del Carpio 2009), para ello se preparó un buffer de cloruro de potasio (KCL 0.025M) con pH 1.0. Para preparar 100 mL de solución se pesaron 186.4 mg de KCl y se aforaron con agua destilada, el pH se ajustó con ácido clorhídrico, también se preparó un buffer de acetato de sodio (CH₃COONa 0.4M) con pH 4.5. Para preparar 100 mL de este buffer se pesaron 328.2 mg de CH₃COONa y se aforaron con agua destilada, el pH se ajustó con ácido acético. Para la reacción se agregaron 100 µL del extracto y 900 µL del buffer pH 1.0 en un tubo Eppendorf de 2 mL y posteriormente se esta solución se transfirió 200 µL a una placa de 96 compartimientos para medir la absorbancia a 520 y 700 nm. en un nuevo tubo Eppendorf se agregaron nuevamente 100 µL del extracto y 900 µL del buffer pH 4.5 y se volvió a leer la absorbancia a 520 y 700 nm. Con estos datos se calculó el contenido de antocianinas totales usando las siguientes ecuaciones:

$$A = (A_{520} - A_{700})_{pH\ 1.0} - (A_{520} - A_{700})_{pH\ 4.5} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Antocianinas totales} \left(\frac{mg}{100\ g} \right) = \frac{A * PM * FD * Vol * 1000 * 100}{\epsilon * 1 * P} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde A = absorbancia, PM = peso molecular de la antocianina presente en mayor cantidad, cianidina-3-glucósido (g/mol 449.68), FD = Factor de dilución (mL), Vol = Volumen del extracto (L), ϵ = coeficiente de extinción molar (29.600), P = peso muestra (g) y 1 = camino óptico.

4.4.6. Diseño experimental y análisis estadístico

Se aplicó un diseño completamente aleatorizado, con 6 tratamientos que surgieron de la combinación de los factores intensidad lumínica (180 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y espectro (RV, RA, VR) más el tratamiento control. Se analizó la influencia de estos factores sobre las variables dependientes de calidad y rendimiento de cada una de las variedades de albahaca, utilizando un modelo lineal general y mixto. Cuando se encontraron diferencias significativas se realizó una comparación de medias utilizando una prueba de comparación múltiple LSD para determinar que tratamientos eran estadísticamente diferentes. Los análisis se realizaron mediante el programa estadístico InfoStat, con un nivel de significancia de 5 %.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de las evaluaciones físicas, de rendimiento y químicas. Estos resultados muestran los efectos de la intensidad lumínica y del espectro. No se realizó un análisis estadístico de las diferencias observadas entre los días, ya que los cambios registrados eran esperados.

4.5. Evaluaciones físicas y de rendimiento

4.5.1. Peso fresco de la planta

La figura 3 muestra el peso fresco de la variedad Red Rubin (A) y variedad Italiano Sel Ligure (B) cultivadas bajo diferentes condiciones lumínicas, durante 30 días.

El peso fresco (PF) de las variedades Red Rubin e Italiano Sel Ligure, incrementó a medida que avanzaron los días de cultivo. A los 0 d, ambas variedades presentaron un PF de entre 0 y 1 g. Después de 15 d las plantas de ambas variedades mostraron mayor PF bajo el tratamiento 180RV, mientras que, a los 30 d en la variedad Red Rubin el tratamiento 250RV mostró el mayor PF (28 g); y en la variedad Italiano Sel Ligure, los tratamientos en los que se incluyó el espectro RA fueron los que presentaron los valores más bajos. En ambas variedades, el PF del control fue superado por al menos uno de los demás tratamientos.

La acumulación de biomasa vegetal está directamente relacionada con el crecimiento de la planta (Dou *et al.* 2020). En este trabajo, se observó ese comportamiento ya que hubo un aumento de biomasa a medida que avanzaron los días de cultivo. El PF fue mayor con intensidades de $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a los 15 d, pero a los 30 d se obtuvieron valores mayores con intensidades de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ llegando hasta los 28 g para Red Rubin y 24.49 g para Italiano Sel Ligure. Esto coincide con investigaciones que sugieren el uso de intensidades cercanas a $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en etapas iniciales del cultivo y de hasta $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ hacia el final, para maximizar la acumulación de biomasa (Larsen *et al.* 2020).

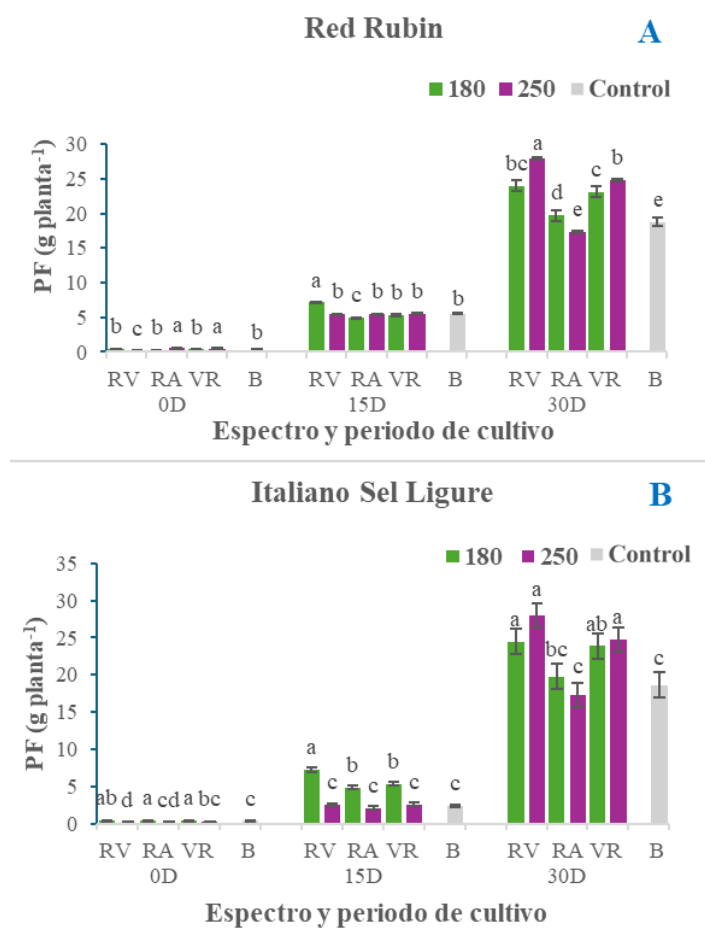


Figura 7: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR, B) en el peso fresco de albahaca (A y B).

4.5.2. Altura de la planta

La Figura 4 muestra la altura para ambas variedades de albahaca, cultivadas bajo diferentes condiciones lumínicas, durante 30 días.

En la variedad Red Rubin, a los 0 d los tratamientos 250RA (9.73 cm), 250VR (10.03 cm) y control (9.86 cm) presentaron mayor altura. Después de 15 d, el tratamiento 180RV alcanzó significativamente mayor altura (20.81 cm), mientras que los tratamientos con intensidad de 250 mostraron los valores más bajos. Luego, a los 30 d el tratamiento 250RV registró mayor altura (36.45 cm) en comparación a los demás tratamientos.

Respecto a la variedad Italiano Sel Ligure, a los 0 d el tratamiento control presentó significativamente mayor altura en comparación a los demás tratamientos y después de 15 d hubo un comportamiento similar al de Red Rubin, donde el mayor valor de altura se obtuvo con el tratamiento 180RV y el menor con intensidad de 250. Para los 30 d todos los tratamientos superaron los 30 cm, destacando 180RV, 250RV y 250VR con alturas de entre 32 y 35 cm. De forma general, ambas variedades respondieron mejor a la aplicación de una intensidad de 180 y espectros con rojo y verde.

Algunos estudios muestran que las longitudes de onda roja estimulan la expansión de hojas y elongación del tallo mediante vías de fitocromos, mientras que las longitudes azules inhiben estas respuestas mediante la acción de criptocromos y fototropinas (Bugbee 2016). Lo anterior explica los resultados obtenidos donde los espectros con mayor proporción roja presentaron valores más altos llegando a los 30 d a 36.45 cm para la variedad Red Rubin y 35.00 cm para la variedad Italiano Sel Ligure.

No obstante, el tratamiento 250RA a los 0 d promovió en ambas variedades de albahaca la elongación del tallo lo que podría atribuirse a la inclusión de longitudes de onda verde en el

espectro, que revirtieron las respuestas de inhibición de la longitud de onda azul y favorecieron la elongación del tallo, lo que resultó en mayor altura (Dou *et al.* 2020). Además, a los 0 d la aplicación de los tratamientos lumínicos estaba comenzando, lo que pudo generar este efecto inicial en la elongación del tallo, antes de que las plantas ajustaran completamente su respuesta a las nuevas condiciones lumínicas.

En cuanto a la intensidad lumínica, estudios con intensidades de $470 \pm 20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en albahaca dulce (*Ocimum basilicum*) y albahaca arbustiva (*Ocimum minimum*) reportaron alturas máximas de 26 cm antes de la floración (Aldarkazali *et al.* 2019). En este experimento, las alturas alcanzadas (32-37 cm) superaron dichos valores con intensidades más bajas. Esto sugiere que el uso de intensidades bajas no solo es eficiente sino también sostenible, aumentando el rendimiento de las plantas de albahaca y reduciendo el consumo energético.

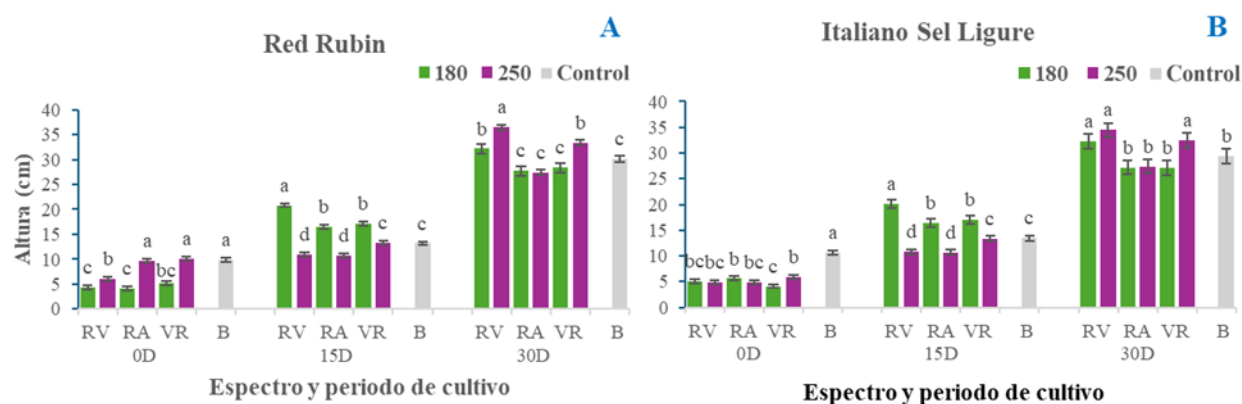


Figura 16: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en la altura de albahaca (A y B).

4.5.3. Área foliar

La Figura 5 muestra el área foliar para ambas variedades de albahaca, cultivadas bajo diferentes condiciones lumínicas, durante 30 días.

Respecto al área foliar, en ambas variedades los efectos fueron similares, a los 0 d, todos los tratamientos no presentaron diferencias significativas en sus áreas foliares $< 5 \text{ cm}^2$. A los 15 y 30 d los tratamientos con intensidad de 180 mostraron el mayor desarrollo foliar que fue de entre 12 y 15 cm^2 para los 15 d y de entre 16 y 18 cm^2 para los 30 d. En contraste con lo anterior, los tratamientos con intensidad de 250 registraron áreas foliares menores. En general los espectros combinados con una intensidad de 180 favorecieron el desarrollo foliar.

En este trabajo el área foliar fue mayor cuando se aplicó una intensidad baja, alcanzando valores de entre 16 y 18 cm^2 . Los resultados de esta variable respaldan lo encontrado en la variable altura; el uso de intensidades bajas no solo es eficiente sino también sostenible, aumentando el rendimiento de las plantas de albahaca y reduciendo el consumo energético.

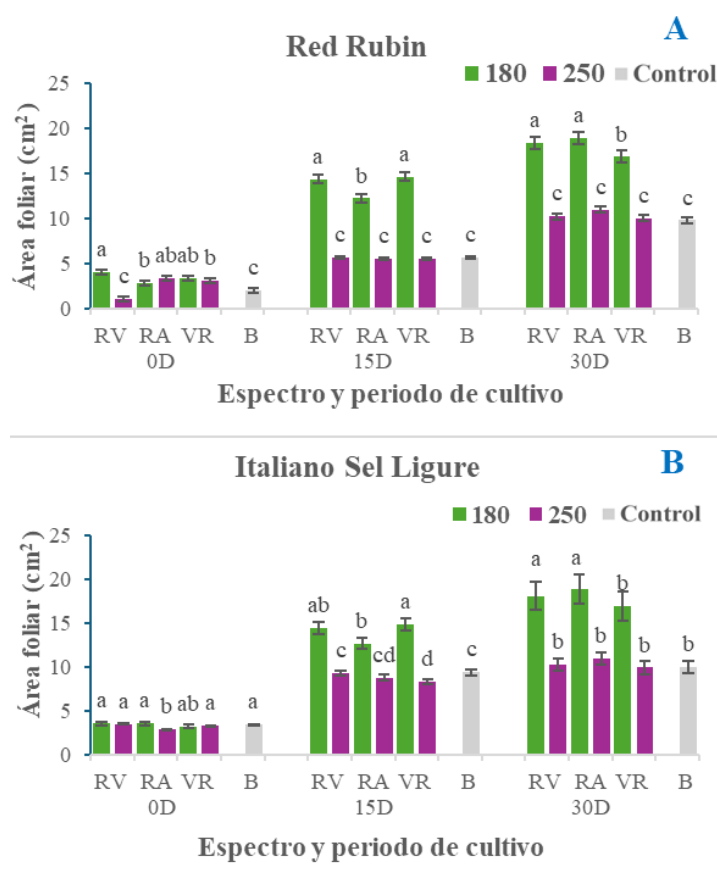


Figura 24: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA VR y B) en el área foliar de albahaca (A y B).

4.5.4. Color de las hojas

La Tabla 4 muestra la variación en el color (L^* , C^* y h°) de ambas variedades de albahaca en los tres periodos de cultivo.

Para la variedad Red Rubin a los 0 d, la luminosidad no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, con valores de L^* de entre 38 a 44. A los 15 d la luminosidad aumentó cuando se aplicó el tratamiento 250RV y el control. Al día 30, la luminosidad en el tratamiento control fue significativamente menor que en los demás tratamientos. Respecto al croma, a los 0 d se obtuvieron valores bajos, destacándose el tratamiento 250VR con el valor más alto (10.76). A los 15 d, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos; y a los 30 d, el valor más bajo de croma correspondió al tratamiento control. En cuanto a la tonalidad, a los 0 d, en la mayoría de los tratamientos hubo una tendencia verde, sin embargo, los tratamientos 250RV, 250RA y control mostraron tendencia morado. A los 15 d, los tonos se encontraron en valores de entre 77° y 107° ; a los 30 d, los tonos aumentaron un promedio de 8.26° en comparación a los 15 d.

Por otro lado, la variedad Italiano Sel Ligure, a los 0 d, presentó una luminosidad con valores de L^* de entre 53 y 62. A los 15 d, los valores disminuyeron respecto a los 0 d, destacándose los tratamientos 250RV y 250VR con los valores más altos (L^* 48.43 y 48.32, respectivamente). Luego, a los 30 d, la luminosidad experimentó nuevamente una reducción, esta vez en comparación con los 15 d. En cuanto al croma a los 0 d los valores más altos de croma (44.55 y 47.68) se obtuvieron con los tratamientos 250VR y control. A los 15 d al igual que en la luminosidad hubo una disminución en el croma. A los 30 d, la aplicación del tratamiento 180VR resultó en el valor más alto de croma (49.63). Respecto a la tonalidad, a los 0 d, predominó la tonalidad verde con valores de entre 116° y 127° ; a los 15 d, esta tonalidad verde se intensificó y luego a los 30 d las tonalidades mantuvieron valores similares a los observados a los 15 días, sin diferencias entre los tratamientos.

Tabla 13: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en color (L*, C* y h°) de albahaca (A y B).

Tratamiento	Red Rubin								
	Luminosidad (L*)			Croma (C*)			Ángulo de tono (h°)		
	0D	15D	30D	0D	15D	30D	0D	15D	30D
180RV	41.97 ± 3.58a	40.35 ± 1.6c	42.24 ± 2.0a	9.09 ± 1.32ab	15.60 ± 7.18a	14.00 ± 1.16a	89.21 ± 9.61ab	93.71 ± 3.14b	104.30 ± 5.92ab
180RA	39.85 ± 3.58a	44.77 ± 1.6b	39.52 ± 2.0a	7.57 ± 1.32b	10.90 ± 7.13a	11.70 ± 1.16b	81.82 ± 9.61b	88.10 ± 3.13bc	94.52 ± 5.92bc
180VR	43.27 ± 3.58a	43.59 ± 1.6b	38.91 ± 2.0a	8.68 ± 1.55ab	30.63 ± 7.43a	10.13 ± 1.16b	99.10 ± 8.94a	106.94 ± 3.21a	96.58 ± 5.92bc
250RV	38.87 ± 3.73a	50.77 ± 1.7a	38.24 ± 2.2a	9.6 ± 1.34ab	11.73 ± 9.36a	12.45 ± 12.42ab	44.98 ± 9.8d	77.04 ± 3.76d	85.10 ± 6.32c
250RA	39.22 ± 3.58a	43.50 ± 1.7b	38.80 ± 2.2a	8.40 ± 1.32b	15.00 ± 8.91a	14.64 ± 1.20a	64.23 ± 9.61c	83.82 ± 3.62cd	94.10 ± 6.15bc
250VR	43.40 ± 3.58a	43.63 ± 1.6b	39.34 ± 2.2a	10.76 ± 1.55a	13.81 ± 8.29a	14.22 ± 1.20a	94.63 ± 8.94a	85.89 ± 3.46c	110.46 ± 6.14a
Control (B)	41.39 ± 3.73a	52.70 ± 1.67a	32.15 ± 2.15b	9.85 ± 1.34ab	13.19 ± 7.15a	8.58 ± 1.2c	50.72 ± 8.76cd	87.03 ± 3.11bc	88.94 ± 5.92c
Italiano Sel Ligure									
180RV	56.90 ± 1.54d	41.97 ± 0.37d	43.07 ± 11.25b	35.66 ± 1.84b	30.91 ± 0.55cd	30.50 ± 7.95b	125.95 ± 0.66a	130.21 ± 4.49b	129.70 ± 3.09a
180RA	53.33 ± 1.54d	42.64 ± 0.37d	41.94 ± 11.25b	35.56 ± 1.84b	29.50 ± 0.55e	29.71 ± 7.95b	126.19 ± 0.66a	130.87 ± 4.49b	129.81 ± 3.09a
180VR	56.00 ± 1.54d	44.36 ± 0.37c	70.80 ± 11.25a	35.45 ± 1.84b	31.18 ± 0.55c	49.63 ± 7.95a	124.56 ± 0.66b	145.87 ± 4.49a	129.75 ± 3.09a
250RV	61.51 ± 1.75bc	48.43 ± 0.37a	42.75 ± 11.25b	32.28 ± 2.04b	32.64 ± 0.55b	29.70 ± 7.95b	118.20 ± 0.71c	126.40 ± 4.49b	129.17 ± 3.09a
250RA	57.00 ± 1.69cd	46.20 ± 0.37b	42.61 ± 11.25b	35.84 ± 1.99b	30.12 ± 0.55de	31.30 ± 7.95b	119.59 ± 0.70c	128.40 ± 4.49b	129.70 ± 3.09a
250VR	61.67 ± 1.59b	48.32 ± 0.37a	42.55 ± 11.25b	44.55 ± 1.89a	33.75 ± 0.55a	30.51 ± 7.95b	116.65 ± 0.67d	125.43 ± 4.49b	135.98 ± 3.09a
Control (B)	67.00 ± 1.75a	45.17 ± 0.37b	39.81 ± 11.3b	47.68 ± 3.89a	31.30 ± 0.55c	29.29 ± 7.95b	119.1 ± 0.7c	126.0 ± 4.49b	131.6 ± 3.09a
Medias con una letra en común no son significativamente diferentes (p > 0,05)									

En la variedad Red Rubin, la combinación de los parámetros del color resultó en plantas con hojas de color intenso. La baja luminosidad observada es característica de las hojas moradas, que suelen ser más oscuras por la acumulación de antocianinas. La saturación moderadamente baja indica que el color morado no fue muy vibrante. Los tonos obtenidos no coincidieron con los valores típicos para albahaca morada, que normalmente se aproximan a 186° (Ciriello 2022). Este resultado podría estar relacionado con la interacción entre la pigmentación morada (antocianinas) y verde (clorofila) (Fayezizadeh *et al.* 2023). El tratamiento 250RV presentó una tonalidad morada más pronunciada, lo cual coincide con los hallazgos en lechuga (*Lactuca sativa*) donde se obtuvo mayor tonalidad morada conforme se aumentó la intensidad a $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Sutuliene *et al.*, 2022).

En la variedad Italiano Sel Ligure, la luminosidad disminuyó conforme al desarrollo de las hojas, lo cual es esperado, ya que las hojas maduras tienden a mostrar menor luminosidad (Fayezizadeh *et al.* 2023). La alta saturación observada refleja un color verde intenso. El ángulo de tono se mantuvo dentro del rango de los verdes vivos, lo que sugiere que las plantas desarrollaron una pigmentación característica de tejidos vegetativos saludables (Ciriello 2022). Los tratamientos con intensidad de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mostraron un color verde más oscuro, lo cual coincide con los resultados obtenidos para la variedad de albahaca Genovese (*Ocimum basilicum*), en la cual se observó que mayores intensidades de luz dieron lugar a hojas de color verde más oscuro (Dou *et al.*, 2018).

4.5.5. Peso seco de la planta

La Figura 6 muestra el porcentaje de peso seco para ambas variedades de albahaca, cultivadas bajo diferentes condiciones lumínicas, durante 30 días.

Los porcentajes de peso seco (PS) en la variedad Red Rubin a los 0 d, fueron mayores con los tratamientos 180RV, 250RV y 180VR, con un valor promedio de 11.5 % y el tratamiento

250VR presentó el valor más bajo (7.23 %). Luego entre los 15 y 30 días los valores promedio se mantuvieron de entre 7 y 9 %. Con relación a la variedad Italiano Sel Ligure, a los 0 d, el tratamiento 180RV presentó el porcentaje más bajo (9.85 %). Después, a los 15 d los tratamientos con intensidad de 250 superaron el PS de los tratamientos que incluyeron una intensidad de 180. A los 30 d, los tratamientos 180RV, 250RA y 250VR mostraron un mayor porcentaje de PS con un valor promedio de 9.1 %.

El porcentaje de PS presentó una disminución a medida que la planta se desarrollaba y esto es inusual ya que normalmente, el patrón del crecimiento vegetal es caracterizado por una función sigmoideal donde la biomasa seca acumulada de una planta se incrementa inicialmente a una tasa exponencial, más tarde lo hace de forma lineal y finalmente crece a una tasa decreciente hasta alcanzar un nivel máximo, formando con este comportamiento una curva en forma de S (Domingo 2008). Sin embargo, los valores obtenidos de PS a los 30 d estuvieron dentro del rango típico para albahaca 6 a 8 % según (Satulienė, 2022), alcanzando entre 7 y 10 % para las dos variedades evaluadas en esta investigación.

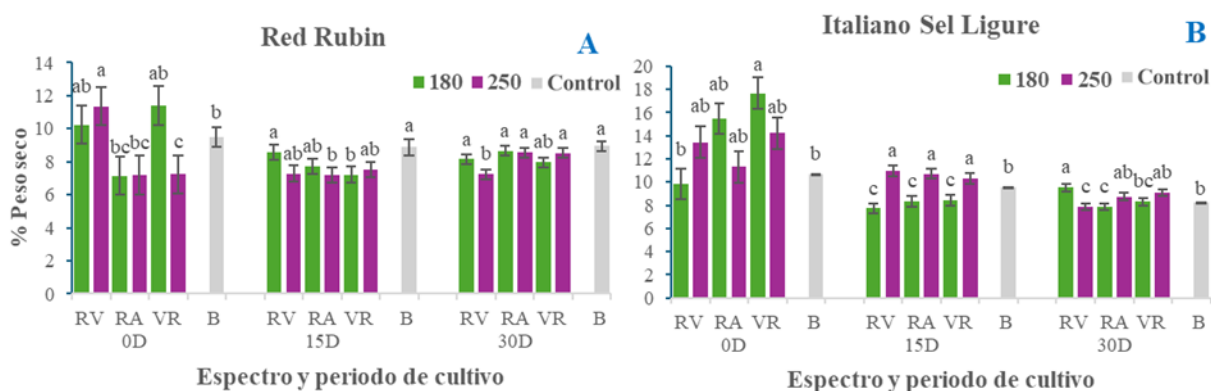


Figura 34: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en el porcentaje de peso seco de albahaca (A y B).

4.5.6. Contenido relativo de agua (CRA)

La Figura 7 muestra el CRA para ambas variedades de albahaca, cultivadas bajo diferentes condiciones lumínicas, durante 30 días.

En la variedad Red Rubin a los 0 d, el tratamiento 180RV favoreció el CRA (95.83 %). Luego, a los 15 d, 180RV y 180RA fueron los tratamientos que presentaron mayor CRA (entre 91 y 95 %) y a los 30 d nuevamente los tratamientos con intensidad de 180 presentaron significativamente mayores porcentajes en comparación a los tratamientos con intensidad de 250. En la variedad Italiano Sel Ligure a los 0 d el porcentaje de CRA fue menor en los tratamientos 250RA, 250VR y control, después, a los 15 d, el tratamiento 180VR fue significativamente más alto que los demás (96.2 %) y a los 30 d los tratamientos con intensidad de 180 presentaron valores significativamente más altos en comparación a los tratamientos con intensidad de 250.

Los resultados mostraron que, con el aumento de la proporción de luz roja, hubo también un aumento en el CRA. Esto puede explicarse por el efecto de las longitudes de onda roja que inducen la reducción en el tamaño y apertura de los estomas, reduciendo la tasa de transpiración y la pérdida de agua, mejorando la capacidad de retención de agua de las hojas (Moradi *et al*, 2023).

Las plantas expuestas a alta intensidad tienden a experimentar menor humedad relativa y temperaturas más altas, lo que resulta en menor % CRA, reflejando la deshidratación del tejido vegetal (Nicolás *et al*, 2005). En contraste, intensidades bajas, favorecen una mayor humedad relativa y menor temperatura en el ambiente lo que ayuda a disminuir la pérdida de agua y promover la absorción, al mejorar el crecimiento de las raíces y su conductancia hídrica (Zhang *et al*, 2019). En esta investigación se obtuvieron mayores valores de CRA en los tratamientos con intensidad baja lo que concuerda con lo descrito anteriormente.

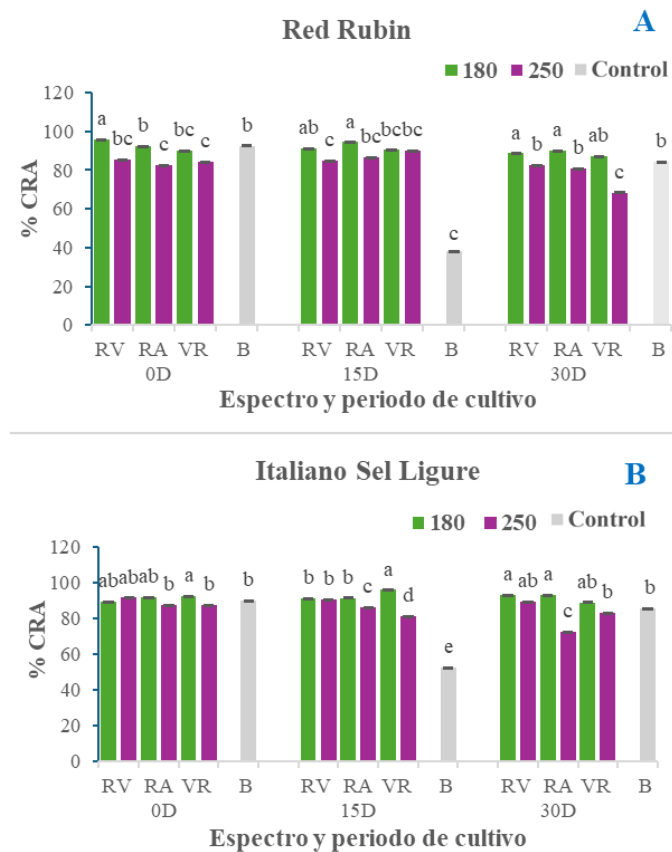


Figura 43: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en el porcentaje de CRA de albahaca (A y B).

4.6. Evaluaciones químicas en las plantas

4.6.1. Capacidad antioxidante (FRAP y DPPH)

Para la capacidad antioxidante FRAP, en la variedad Red Rubin se obtuvieron valores mayores cuando se aplicaron los tratamientos 250RV (2082.05 mg ET/100g PF), 250RA (2233.04 mg ET/100g PF) y control (2114.73 mg ET/100g PF). Luego, a los 15 y 30 días, se obtuvieron valores más altos con la intensidad de 180 en comparación a los tratamientos a los que se les aplicó la intensidad de 250 (Figura 8A). Respecto a la capacidad antioxidante DPPH, a los 0 d no hubo diferencias significativas entre los tratamientos; sin embargo, a los 15 d los valores más bajos se obtuvieron con los tratamientos 180VR (54.52

mg ET/100g PF) y control (54.62 mg ET/100g PF); mientras que a los 30 d los tratamientos con intensidad de 250 presentaron significativamente un mayor contenido de antioxidantes (114 a 140 mg ET/100g PF), con excepción del tratamiento control al que también se le aplicó una intensidad de 250 (Figura 8C).

En la variedad Italiano Sel Ligure, la actividad antioxidante FRAP a los 0 d, presentó el valor más bajo cuando se aplicó el tratamiento 180VR (1329.31 mg ET/100g PF). A los 15 y 30 d, el tratamiento 180RA presento mayor contenido de antioxidantes con valores de 323.38 y 723.60 mg ET/100g PF respectivamente (Figura 8B). Para la capacidad antioxidante DPPH a los 0 d al igual que en Red Rubin no hubo diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo, a los 15 d, los tratamientos 180RV y 180VR presentaron los valores más bajos de capacidad antioxidante y a los 30 d, los tratamientos 250RV (111.08 mg ET/100g PF) y 250VR (126.88 mg ET/100g PF) presentaron los valores más altos de capacidad antioxidante (Figura 8D).

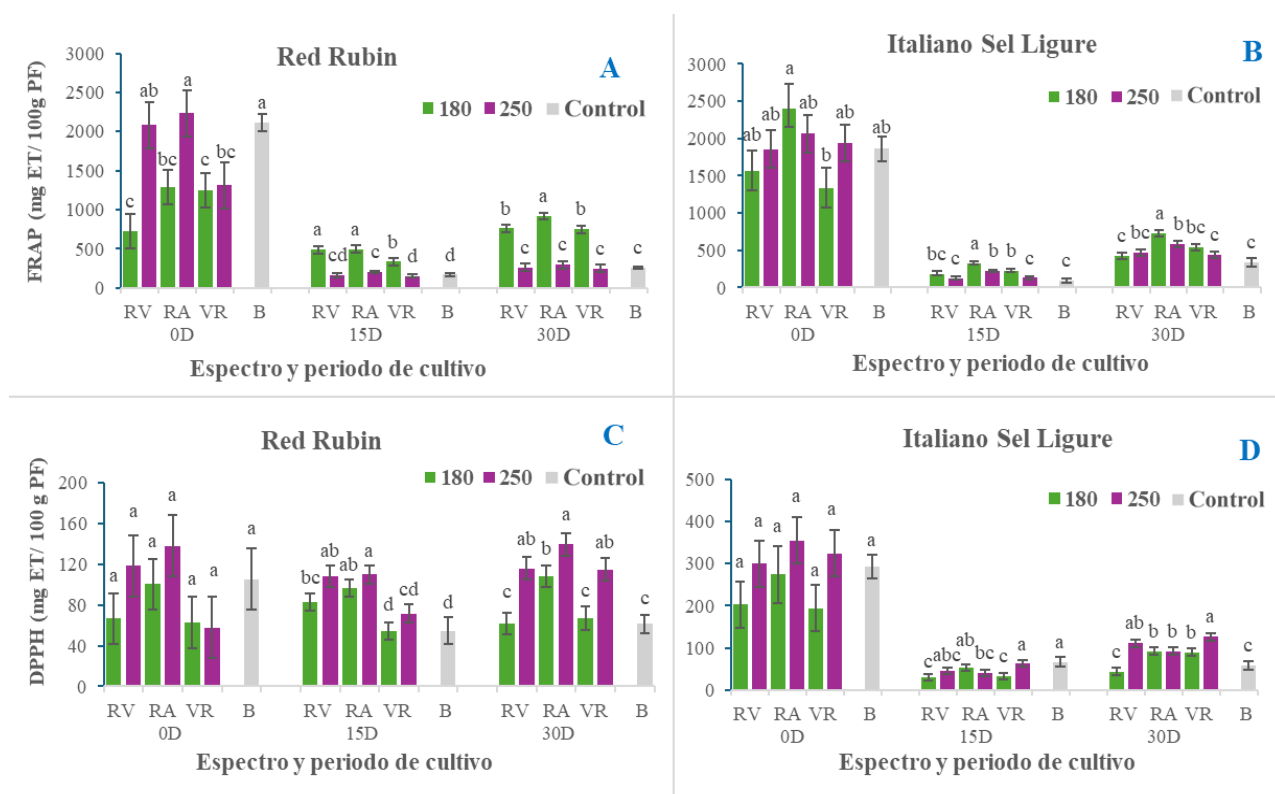


Figura 52: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en la capacidad antioxidante de albahaca (A, C y B, D).

Para la actividad antioxidante medida por el método FRAP, al inicio del cultivo se obtuvieron valores mayores con tratamientos a los que se le aplicó una intensidad alta, esto concuerda con lo obtenido al analizar la capacidad antioxidante por el método FRAP en lechuga donde hubo un mayor aumento cuando se aplicó una intensidad de luz de hasta $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en comparación con las plantas a las que se les aplicó una intensidad de $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Pennisi *et al*, 2020).

A los 15 y 30 días se obtuvieron mayores valores de actividad antioxidante por este mismo método con tratamientos a los que se les aplicó una intensidad de $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con valores a los 30 d de 918.93 mg ET/100g PF para Red Rubin y 723.60 mg ET/100g PF para Italiano Sel Ligure estos resultados son similares a los encontrados en albahaca dulce (*Ocimum basilicum*, 'Opal') madura donde se encontró una actividad antioxidante significativamente mayor con la aplicación de intensidades próximas a $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Sutuliene *et al*, 2022).

Respecto a la capacidad antioxidante medida por el método DPPH se obtuvieron los mayores resultados cuando se combinaron los espectros con una intensidad de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, resultados similares se encontraron en albahaca mobarake (*Ocimum basilicum* L.) que también presentó mayor capacidad antioxidante cuando se aplicaron intensidades mayores a $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Eghbal *et al*, 2024).

4.6.2. Polifenoles totales

Los polifenoles totales (PT), para la variedad Red Rubin, a los 0 d mostraron el valor más bajo (64.15 mg EAG/100g PF) con el tratamiento 180RV. A los 15 d los tratamientos que presentaron menor contenido de PT fueron el 250VR y el control, a los 30 d el tratamiento 180RV nuevamente mostró el valor más bajo de PT (43.89 mg EAG/100g PF). En la

variedad Italiano Sel Ligure, a los 0 d no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. A los 15 d los tratamientos 180RV y 180VR presentaron los valores más bajos de PT con valores de 25.39 y 28.47 mg EAG/100g PF respectivamente, en cuanto a los 30 d se observaron mayores valores cuando se aplicó una intensidad de 250 a los tratamientos, con excepción del tratamiento control al que también se le aplicó una intensidad de 250 (Figura 9).

Para la variedad Red Rubin, los tratamientos con intensidad baja e inclusión del espectro verde presentaron valores más bajos de polifenoles totales a los 0 y 30 d, lo que sugiere que intensidades bajas y espectros ricos en verde pueden limitar la acumulación de estos compuestos. Para la variedad Italiano Sel Ligure, ocurrió algo similar a los 15 d con los tratamientos 180RV y VR180. Esto concuerda con lo reportado en lechuga, donde se observó un incremento bajo una intensidad de luz de 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en comparación con plantas expuestas a intensidades más bajas (Pennisi *et al*, 2020).

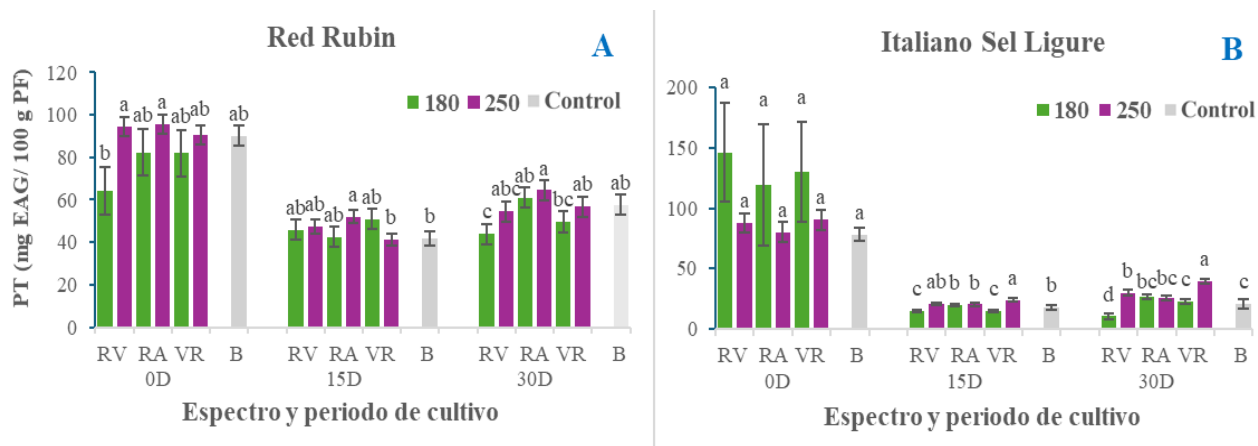


Figura 61: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en el contenido de polifenoles de albahaca (A y B).

Estos resultados son consistentes con la literatura, intensidades altas producen un aumento de estrés lumínico y las plantas para aclimatare a estas condiciones desfavorables activan sus mecanismos de defensa recurriendo a estrategias comunes como la acumulación de

compuestos fenólicos (Sharma *et al*, 2012). Además, los valores obtenidos fueron similares a los encontrados en un estudio que tuvo como objetivo evaluar el efecto de la fertilización a diferentes intensidades de luz sobre el crecimiento de albahaca dulce (*Ocimum basilicum*, 'Opal') donde el contenido de polifenoles estuvo entre 110 y 150 mg EAG/100g PF (Sutulienė *et al*, 2022).

4.6.3. Contenido de flavonoides

EL contenido de flavonoides (Fl) en la variedad Red Rubin a los 0 d presentó valores significativamente más altos con los tratamientos 250RV (67.20 mg ERUT/100 g PF) y 180VR (89.19 mg ERUT/100 g PF), luego a los 15 d, el contenido de Fl fue significativamente mayor en tratamientos con intensidades de 180 en comparación con aquellos a los que se les aplicó una intensidad de 250 y para los 30 d los tratamientos 180RV y control presentaron los valores más bajos, en comparación con los demás tratamientos (Figura 10A).

En la variedad Italiano Sel Ligure, a los 0 d los valores oscilaron de entre 78 y 130 mg ERUT/100 g PF sin diferencias significativas entre los tratamientos. A los 15 d, se observó una marcada disminución a valores de entre 14 y 24 mg ERUT/100 g PF y para los 30 d, el tratamiento 250RV mostró el mayor contenido de Fl (39.69 mg ERUT/100 g PF), en este periodo también hubo un ligero aumento de Fl en los tratamientos respecto a los 15 d (Figura 10B).

En el contenido de flavonoides para la variedad Red Rubin se observó que los tratamientos a los que se les aplicó una intensidad de $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obtuvieron valores mayores. En estudios previos no se ha encontrado una correlación directa entre el aumento de la intensidad lumínica y el contenido de flavonoides (Satulienė *et al*, 2022). Esto explica por

qué intensidades más altas, como $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no generaron incrementos significativos en el contenido de flavonoides y, en algunos casos, incluso resultaron en menores concentraciones, posiblemente debido al estrés fisiológico causado por intensidades excesivas de luz que provocaron la degeneración de estos compuestos, ya que participan en la fotoprotección (Samuolienė *et al*, 2013). En la variedad Red Rubin, este fenómeno se evidenció a los 15 d, cuando los tratamientos de $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mostraron valores significativamente mayores que los de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

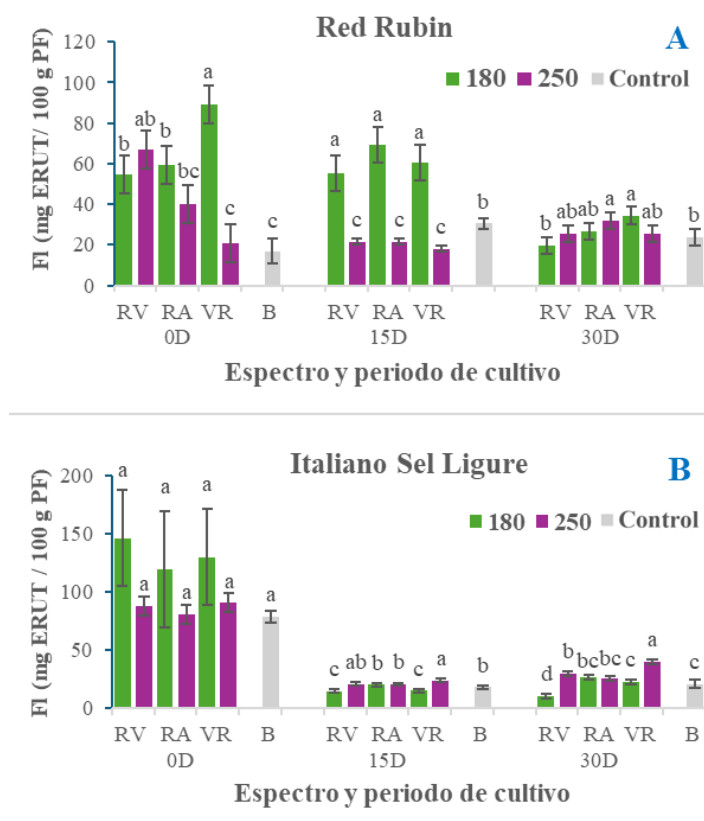


Figura 70: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA, VR y B) en el contenido de flavonoides de albahaca (A y B).

Por otro lado, en la variedad Italiano Sel Ligure, a los 15 y 30 días, se observaron mayores valores de flavonoides bajo una intensidad de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Esto sugiere que la respuesta de los flavonoides ante la intensidad lumínica no solo depende de la cantidad de luz, sino también de las características propias de la variedad de albahaca cultivada. Dichas

diferencias podrían estar asociadas a la capacidad de cada variedad para sintetizar metabolitos secundarios en respuesta a estímulos lumínicos, lo que destaca la importancia de considerar factores genotípicos al optimizar las condiciones de cultivo para maximizar la calidad nutricional de estas plantas (Avendaño 2019).

4.6.4. Antocianinas totales

El contenido de antocianinas totales en la variedad Red Rubin, varió en función del tratamiento y el tiempo de cultivo. A los 0 d no hubo diferencias significativas entre los tratamientos, con valores de entre 30 y 70 mg/100 g PF. Sin embargo, a los 15 d los tratamientos 180RA y el control presentaron los valores más altos de AT con 31.33 y 24.82 mg/100 g PF respectivamente. Posteriormente a los 30 d, aunque los tratamientos presentaron valores similares entre ellos, los valores más bajos se presentaron en los tratamientos 180RV con un valor de 26.39 mg/100 g PF y en el VR180 con un valor de 18.03 mg/100 g PF (Figura 11).

En general la variedad Red Rubin mostró un alto contenido de antocianinas cuando se aplicó un espectro con mayor proporción de rojo y azul y menor valor cuando se aplicaron tratamientos con mayor proporción de verde, esto posiblemente se debió a que la luz verde inhibió la acumulación de antocianinas inducida por la luz azul (Zhang *et al*, 2012). En un estudio en plantas de *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*) cultivadas bajo longitudes de onda rojas, azules y verdes suplementarias se observó que contenían visiblemente menos antocianinas que las que solo estaban bajo longitudes de onda rojas y azules lo que indica que a medida que se aumenta el componente de luz verde, la cantidad de antocianinas disminuye (Zhang *et al*, 2011). Sin embargo, a los 30 d cuando se combinó una intensidad de 250, con espectros que incluyeron de verde las concentraciones no presentaron valores menores en comparación a los demás tratamientos.

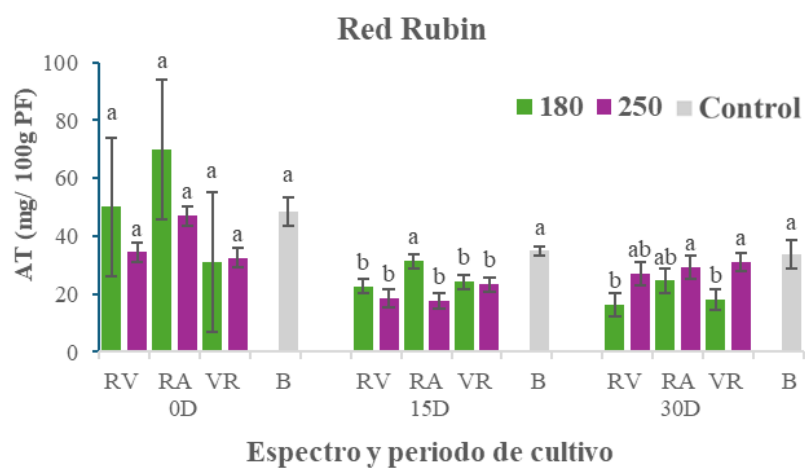


Figura 77: Efecto de la intensidad (180 y 250) y el espectro (RV, RA y VR) en el contenido de antocianinas de albahaca (A y B).

VI. CONCLUSIONES

Los factores lumínicos, tuvieron un efecto significativo en el rendimiento de ambas variedades de albahaca. La intensidad baja ($180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) favoreció la acumulación de biomasa en las primeras etapas del desarrollo, mientras que la intensidad alta ($250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) impulsó el rendimiento en etapas posteriores. Además, los espectros con alta proporción de luz roja estimularon la elongación del tallo e intensidades bajas estimularon la expansión foliar, especialmente en Red Rubin. En contraste, la inclusión de verde mostró efectos negativos sobre la altura al contrarrestar la influencia de la longitud de onda azul. Los compuestos bioactivos respondieron de formas distintas a las condiciones lumínicas. La actividad antioxidante por el método FRAP fue mayor con intensidad baja mientras que por DPPH fue mayor con intensidad alta. Los polifenoles aumentaron con intensidad alta, y los flavonoides alcanzaron valores máximos con intensidad baja. Las antocianinas también se vieron favorecidas por espectros predominantes en rojo y azul, pero disminuyeron en presencia de verde. Los resultados sugieren que el tratamiento lumínico más adecuado para maximizar el rendimiento y la calidad de la albahaca es combinar una intensidad de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con espectros rojo y azul. Sin embargo, en las etapas iniciales del cultivo, intensidades más bajas ($180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) pueden ser una alternativa eficiente para reducir el consumo energético sin comprometer significativamente el rendimiento y la calidad.

VII. RECOMENDACIONES

Implementar intensidades de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con espectros con mayor proporción de rojo y azul durante la etapa de máximo desarrollo vegetativo para maximizar la biomasa y los compuestos bioactivos y utilizar intensidades menores ($180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) al inicio para reducir costos energéticos sin comprometer el rendimiento y la calidad.

Establecer condiciones lumínicas que permitan optimizar el contenido de los diferentes compuestos bioactivos de acuerdo con los objetivos del cultivo. Para aumentar la concentración de polifenoles y antocianinas, aplicar intensidades altas y aplicar intensidades bajas para favorecer la acumulación de flavonoides.

Implementar sistemas de iluminación flexibles que permitan la alternancia entre intensidades bajas y altas dependiendo de la etapa fenológica del cultivo. Específicamente, se recomienda el uso de espectros predominantes en rojo y azul durante las fases de mayor crecimiento vegetativo, combinados con intensidades más bajas en etapas iniciales, con el fin de optimizar el consumo energético y mantener un equilibrio adecuado entre rendimiento y calidad.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Adasme, E; Dias, R; Escalona, V. 2023. The Effect of Light Intensity and Photoperiod on the Yield and Antioxidant Activity of Beet Microgreens Produced in an Indoor System. *Horticulturae*. Vol 9. DOI: <http://doi.org/10.3390/horticulturae9040493>

Aldarkazali, M; Rihan, H; Carne, D; Fuller, M. 2019. El crecimiento y desarrollo de la albahaca dulce (*Ocimum basilicum*) y la albahaca arbustiva (*Ocimum minimum*) cultivadas bajo tres regímenes de luz en un ambiente controlado. *Agronomía*. 9(11):743. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9110743>.

Appolloni, E; Pennisi, G; Zauli, I; Carotti, L; Paucek, I; Quaini, S., . . . Gianquinto, G. 2021. Beyond vegetables: effects of indoor LED light on specialized metabolite biosynthesis in medicinal and aromatic plants, edible flowers, and microgreens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(2): 472-487.

Avendaño, V. 2019. Influencia de la intensidad y calidad de luz en el crecimiento y propiedades antioxidantes en cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo sistema fábrica de plantas. Tesis Ph.D. Nuevo León, México. UANL. 105 p.

Avgoustaki D. 2019. Optimización del fotoperiodo y evaluación de la calidad de plantas de albahaca cultivadas en un sistema de cultivo interior a pequeña escala para la reducción de la demanda energética. *Energías*. 12(20):3980. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12203980>.

Azcón, J; Talón, M. 2013. *Fundamentos de fisiología vegetal* (Segunda ed.). Barcelona: McGraw-Hill.

Benzie, I; Strain, J; 1996. La capacidad reductora férrica del plasma (FRAP) como estructura del dosel en el trigo (*Triticum aestivum* L.) y la avena silvestre (*Avena fatua* L.) expuestas a una radiación ultravioleta B mejorada. *Función. Eco 2* : 319-330.

Biesiadan, A; Kus, A. 2010. El efecto de la fertilización nitrogenada y el riego sobre el rendimiento y estado nutricional de la albahaca dulce (*Ocimum basilicum* L.). *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, 9(2): 3-12.

Bufalo, J; Cantrell, T; Astatkie, V; Zheljazkov, A; Gawde; Boaro C. 2015. Efectos de la fertilización orgánica versus la convencional en el crecimiento de la albahaca dulce (*Ocimum basilicum* L.) en un sistema e invernadero. *Cultivos y productos industriales*, 74: 249–254.

Bradford, M; 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem*. 72: 248 - 254. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).

Bugbee, B. 2016. Hacia una calidad espectral óptima para el crecimiento y desarrollo de las plantas: la importancia de la captura de radiación. *Acta Horticulturae*, 1134: 1-12. Disponible en: [doi:10.17660/actahortic.2016.1134.1](https://doi.org/10.17660/actahortic.2016.1134.1)

Chutimanukul, P; Piew-ondee, P; Dangsamer, T; Thongtip, A; Janta, S; Wanichananan, P; Thepsilvisut, O; Ehara, H; Chutimanukul, P. 2024. Efectos de los espectros de luz sobre el crecimiento, las respuestas fisiológicas y la capacidad antioxidante en cinco variedades de rábano en un sistema de cultivo vertical de interior. *Horticultura* 4(10): 1059. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101059>

Ciriello, M; Kyriacou, M; De Pascale, S; Rouphael, Y. 2022. An appraisal of critical factors configuring the composition of basil in minerals, bioactive secondary metabolites, micronutrients and volatile aromatic compounds. *Journal of Food Composition and Analysis*. 111: 0889-1575. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104582>.

Ciriello, M; Formisano, L; Soteriou, G; Kyratzis, A; De Pascale, S; Kyriacou, M; Rouphael, Y. 2022. Differential Response to NaCl Osmotic Stress in Sequentially Harvested Hydroponic Red and Green Basil and the Role of Calcium. *Frontiers in Plant Science*. 13: 1664-462. DOI=10.3389/fpls.2022.799213

Ciriello, M; Formisano, L; El-Nakhel, C; Kyriacou, M; Soteriou, G; Pizzolongo, F; Romano, R; De Pascale, S; Rouphael, Y. 2021. La interacción del genotipo y las cosechas sucesivas afecta los ácidos fenólicos y el perfil aromático de la albahaca genovesa para la producción de salsa pesto. *Alimentos*.10(2):278. Disponible en: [10.3390/foods10020278](https://doi.org/10.3390/foods10020278)

Cisternas, C; Farías, C; Morales, G; Muñoz, L; Valenzuela, R. 2022. Albahaca: Composición química y sus beneficios en salud. Revista chilena de nutrición 49(4): 502-512. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182022000500502>.

Del Carpio, C; Serrano, C; Giusti, M. 2009. Caracterización de las antocianinas de los frutos de Berberis boliviana Lechler. Revista de la Sociedad Química del Perú , 75 (1), 76-86.

Delian, E; Chira, A; Badulescu, L. y Chira, L. 2015. Insights into microgreens physiology. Horticulture, 58: 2285-5653.

Domingo, E. 2008. Crecimiento y desarrollo de los cultivos. Apuntes de fitotecnia. 4-5 pag. Disponible en: https://georgiusm.com/wp-content/uploads/2020/04/tema-13.-crecimiento_y_desarrollo_de_los_cultivos.pdf

Dou, H; Niu, G; Gu, M; y Masabni, J. 2020. Morphological and Physiological Responses in Basil and Brassica Species to Different Proportions of Red, Blue, and Green Wavelengths in Indoor Vertical Farming. Journal of the American Society for Horticultural Science J. 145(4): 267-278. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS04927-20>

Eghbal, E; Aliniaieifard, S; Mehrjerdi, M; Abdi, S; Hassani, S; Rassaie, T; y Gruda, N. 2024. Growth, phytochemical, and phytohormonal responses of basil to different light durations and intensities under constant daily light integral. BMC Plant Biology. 24: 935. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05637-w>

Elvir, A; Rodríguez, A; Andrade, A; Osorto, A; Velásquez, A; Inestroza, A; . . . Reyes Artica, Z. 2022. Consumo de Alimentos y Situación Alimentaria Nutricional de Hogares en Honduras: Estudio Multicéntrico en Adultos. Tesis Lic. Tegucigalpa, Honduras, UNAH. 1174 p.

Fayezizadeh, M; Ansari, N; Sourestani, M; y Hasanuzzaman, M. 2024. Variations in Photoperiods and Their Impact on Yield, Photosynthesis and Secondary Metabolite Production in Basil Microgreens. Disponible en: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4018465/v1>.

Frazier, I. 2017. High-rise greens: growing crops in the city, without soil or natural light. The New Yorker, 170109: 52-59. Disponible en: <https://www.newyorker.com/magazine/2017/01/09/the-vertical-farm>

Fernandes, F; Pereira, E; Ciric, A; Sokovic, M; Calhelha, R; Barros, L; Ferreira, C. 2019. Ocimumbasilicum var. purpurascens leaves (red rubin basil): a source of bioactive compounds and natural pigments for the food industry. Food and funct. 10(6):3161-3171 DOI: <https://doi.org/10.1039/C9FO00578A>

Gallo, N. 2020. Luz led y su relación con la producción de metabolitos de interés y biomasa de brócoli en un sistema plant factory. Tesis Mag. Sc. Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León. 11 p.

Gerovac, J; Craver, J; Boldt, J; y Lopez, R. 2016. Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of Brassica microgreens. HortScience, 51(5): 497-503.

Harakotr, B; Srijunteuk, S; Rithichai, P; Tabunhan, S. 2019. Effects of Light-Emitting Diode Light Irradiance Levels on Yield, Antioxidants and Antioxidant Capacities of Indigenous Vegetable Microgreens. *Science & Technology Asia*, 24(3): 59-66.

Hasan, M; Bashir, T; Ghosh, R; Lee, S; Bae H. 2017. Una visión general de los efectos de los LED en la producción de compuestos bioactivos y la calidad de los cultivos. *Moléculas*. 22(9):1420. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22091420>.

Heath, R; Packer, L. 1968. Fotoperoxidación en cloroplastos aislados: I. Cinética y estequiometría de la peroxidación de ácidos grasos. *Arco. Bioquímica. Biofísica*. 125: 189–198. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).

Hend, S. 2018. The Response of Red Rubin Basil Plant to Organic Fertilizer and Humic Acid versus Chemical Fertilizers. *Middle East Journal of Agriculture*. 07(03): 740-751
Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/327427313>

Hoagland, D; Arnon, D. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural. Experimental Station Bulletin*. 1950: 347

ISTA. 2016. International Rules for Seed Testing. 2310-3655. Disponible en: <https://www.seedtest.org/en/international-rules-for-seed-testing-rubric-3.html>

Jackson, S. 2009. Plant responses to photoperiod. *New Phytologist*, 181(3): 517-531. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02681.x>

Karan, D; Lukic, M; Djordjevic, V; Parunovic, N; Milijasevic, J; Jovanovic, J; Nikolic, A. 2019. The influence of the basil on colour, odour and taste of frankfurters. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 333(1): 012069.

Kopsell, D; Sams, C; Barickman, T; y Morrow, R. 2014. Sprouting broccoli accumulate higher concentrations of nutritionally important metabolites under narrow-band light-emitting diode lighting. Journal of the American Society for Horticultural Science, 139(4): 469-477.

Lanoue, J; St. Louis, S; Pequeña, C. y Hao, X. 2022. Continuous lighting can improve yield and reduce energy costs while increasing or maintaining nutritional contents of microgreens. Frontiers in Plant Science, 13, 983222. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.983222/full>

Lara, O, *et al.* 2021. "Efecto de un filtro fotoselectivo sobre el rendimiento y la calidad poscosecha de hojas tiernas de espinaca 'Viroflay' (*Spinacia oleracea* L.) cultivadas en un sistema hidropónico". Scientia Horticulturae 277: 109804.

Larsen, D; Woltering, E; Nicole, C; Marcelis, F. 2020. Response of Basil Growth and Morphology to Light Intensity and Spectrum in a Vertical Farm. Front. Plant Sci. 11, 597906. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597906>.

Lima, G; Brasil, O; Oliveira, A. 1999. Poliaminas e atividade da peroxidase em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Cultivado sob estresse salino. Sci. Agric. 56: 21–26. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000100004>

Liu, K; Gao, M; Jiang, H; Ou, S; Li, X; He, R; Li, Y; Liu, H. 2022 Light Intensity and Photoperiod Affect Growth and Nutritional Quality of Brassica Microgreens. *Molecules*, 27(3): 883. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27030883>.

Lobiuc, A; Vasilache, V; Oroian, M; Stoleru, T; Burducea, M; Pintilie, O; Zamfirache, M. 2017. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. Microgreens. *Molecules*, 22(12).

López, J. 2023. La influencia de la luz en el crecimiento del cultivo (en línea). México. Consultado 5 may. 2023. Disponible en: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/>.

Maggio, A; Roscigno, G; Bruno, M; De Falco, E; Senatore, F. 2016. Essential-Oil Variability in a Collection of *Ocimum basilicum* L. (Basil) Cultivars. *Chem. Biodiversity*. 13(10):1357–1368. DOI:10.1002/cbdv.201600069.

Martínez, J; Monte, E; Ruiz, F. 2002. Fitocromos y desarrollo vegetal, pigmentos vegetales que controlan el desarrollo e informan a las plantas de los cambios. *Investigación y Ciencia*, 305: 20-9.

Massa, G; Graham, T; Haire, T; Flemming II, C; Newsham, G; Wheeler, R. 2015. Light-emitting Diode Light Transmission through Leaf Tissue of Seven Different Crops. *Hort Science*, 50(3): 501-506.

Mir, S; Shah, M; Mir, M. 2017. Microgreens: Producción, vida útil y componentes bioactivos. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12): 2730-2736.

Moradi, M; Abedi, B; Arouiee, H; Aliniaiefard, S; y Ghasemi, K. 2023. Efecto de diferentes espectros de luz sobre el rendimiento fotosintético, los indicadores de crecimiento y el contenido de aceite esencial de *Salvia officinalis* L. *Revista de Ciencias Hortícolas*, 37(3): 821-841. DOI: 10.22067/jhs.2023.78806.1211

Nicolás, E; Torrecillas, A; Amico, J; Alarcón, J. 2005. Sap flow, gas exchange, and hydraulic conductance of young apricot trees growing under a shading net and different water supplies, *Journal of Plant Physiology*. 162(4): 439-447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.05.014>.

Paniagua, G; Hernández, C; Rico, F; Domínguez, F; Martínez, E; y Martínez, C. 2015. Efecto de la luz led de alta intensidad sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.). *Polibotánica*, (40):199-212.

Pennisi, G; Pistillo, A; Orsini, F; Cellini, A; Spinelli, F; Nicola, S; Fernandez, J; Crepaldi, A; Gianquinto, G; Marcelis, L. 2020. 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). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>.

Pérez, D; Morales, D. 2022. Granjas verticales como modelo de negocios verdes y sostenibles. *Revista De Investigación*, 14(1): 29-45.

Pulvirenti, L; Ferreri, T; Strano, T; Infantino, S; Caruso, C; Morrone, R; D'Antona, N; Siracusa, L; Barbera, A; y Napoli, E. 2024. Effect of Photoperiod on Phytochemical Profiles of Non-Volatile Specialized Metabolites and Vocs in Four Varieties of *Ocimum Basilicum* L. Grown in an Experimental Hydroponic Climate Chamber. SSRN. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5007733>

Rivas, D. 2023. Calidad nutricional y nutraceutica de los microgreens en función de luz led suplementaria. Tesis Doctoral. Chapingo, Estado de México, Universidad Autónoma Chapingo. 2 p.

Samuolienė, G; Brazaityte, J; Jankauskiene, A; Virsile, R; Sirtautas, A; Novikovas, S; Sakalauskien, J; Sakalauskait, y P. Duchovskis. 2013. LED irradiance level affects growth and nutritional quality of Brassica microgreens. Central European Journal of Biology 1241-1249 p.

Sharma, P; Jha, A; Dubey, R; y Pessarakli, M. 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. Journal of Botany. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2012/217037>.

Shibaeva, T; Mamaev, A; Sherudilo, E; & Titov, A. (2022). The role of photosynthetic daily light integral in plant response to extended photoperiods. Russian Journal of Plant Physiology, 67(1), 7.

Singh, D; Ravindran, N; Job, N; Valappil, R; Bhagavatula, L; & Datta, S. (2023). Plant Transcription Factors. DOI:10.1016/B978-0-323-90613-5.00013-3.

Singleton, V; Rossi, J. 1965. Colorimetría de fenólicos totales con reactivos de ácido fosfomolibdico-fosfotungstico. *Revista americana de Enología y Viticultura*, 16 (3): 144-158.

Sipos, L; Balázs, L; Székely, G; Jung, A; Sárosi, S; Radácsi, P; & Csambalik, L. 2021. Optimization of basil (*Ocimum basilicum* L.) production in LED light environments a review. *Scientia Horticulturae*, 289: 110486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110486>.

Sutulienė, R; Laužikė, K; Pukas, T; Samuolienė G. 2022. Efecto de la intensidad de la luz sobre el crecimiento y la actividad antioxidante de la albahaca dulce y la lechuga. *Plantas*. DOI: 11(13):1709. <https://doi.org/10.3390/plants11131709>.

Thomas, B y Awadh, D. 2020. La calidad de la luz y el fotoperiodo influyen en el crecimiento de los cultivos, la productividad y la calidad de los productos en la producción hidropónica de hortalizas. *Acta Hortic.* 1273: 271-280
DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1273.36>.

Truffault, V; Fry, S; Stevens, R; & Gautier, H. 2016. Ascorbate degradation in tomato leads to accumulation of oxalate, threonate and oxalyl threonate. *The Plant Journal*, 89(5): 996-1008.

Vrkić, R; Šić, J; Dujmovic, M; y Benko, B. 2024. Can LED Lighting Be a Sustainable Solution for Producing Nutritionally Valuable Microgreens? *Horticulturae*, 10(3): 249. DOI:10.3390/horticulturae10030249.

Xiao, Z; Lester, G; Eunhee, P; Saftner, R; Lu, Y; y Wang, Q. 2015. Evaluation and correlation of sensory attributes and chemical compositions of emerging fresh produce: Microgreens. *Postharvest Biology and Technology*, 110: 140-148.

Zhang, J; Liu, J; Yang, C; Du, S; Yang, W. 2016. Photosynthetic performance of soybean plants to water deficit under high and low light intensity. *South African journal of botany*. 105:279–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.04.011>.

IX. ANEXOS

Anexo 2: Condiciones de crecimiento y lámparas utilizadas en el estudio.



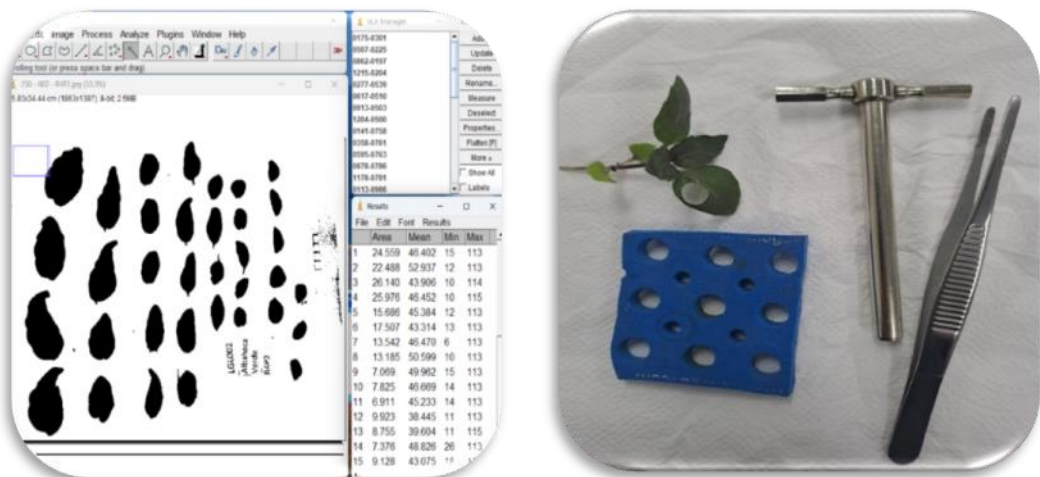
Anexo 5: Unidad experimental, bandeja hidropónica con 14 plantas.



Anexo 8: Extracción de muestras para evaluaciones químicas.



Anexo 11: Determinación de área foliar (Izquierda) y corte realizado para medir CRA (derecha).



Anexo 14: Curvas de calibración realizadas con Trolox (1), Ácido gálico (2) y Rutina (3).

