

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Producción de Microgreens bajo Diferente Intensidad de Luz y
Densidad de Siembra

Por:

María Esmeralda Hernández Martínez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México.

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Producción de Microgreens bajo Diferente Intensidad de Luz y
Densidad de Siembra

Por:

María Esmeralda Hernández Martínez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

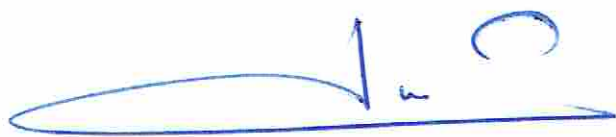
INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Asesora principal interno



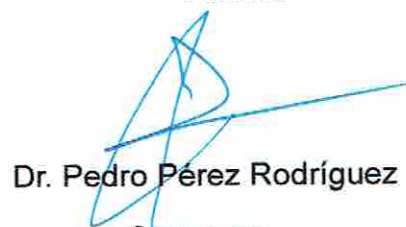
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Asesor



M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos

Coasesor



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Coasesor

Saltillo, Coahuila, México.

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Producción de Microgreens bajo Diferente Intensidad de Luz y
Densidad de Siembra

Por:

María Esmeralda Hernández Martínez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el jurado examinador:


Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Asesor principal interno



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Asesor


M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos

Coasesor


Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Coasesor




M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo Coahuila, México.

Junio de 2026

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización medio público o privado.


Maria Esmeralda Hernández Martínez
Autor principal

DEDICATORIA

A mi amado esposo, Enrique Ibarra Villanueva, por apoyarme incondicionalmente durante toda la carrera, impulsándome a seguir mis sueños y cumplir mis metas, brindándome lo más valioso, su amor, tiempo y comprensión en este trayecto. Gracias por ser mi gran compañero de vida, que hizo más a meno este andar. Gracias por ayudarme a creer en mí y ver mi potencial, gracias por siempre acompañarme a regar las plantas, a cuidar los cultivos, por desvelarte conmigo hasta finalizar cada proyecto, por mis desayunos, por todas esas fotos y videos que quedarán llenos de recuerdos en mi *alma mater*. Gracias por ser un gran esposo.

A mis padres, Sofía Martínez Trejo y Adrián Hernández Galán, por ser parte fundamental de mi desarrollo, tanto personal como académico, por siempre estar conmigo y para mí en cada etapa de mi vida. Gracias por su amor infinito, por la educación que me otorgaron, sus consejos, regaños y su sabiduría, que sin todo ello no sería la persona que soy ahora.

A mis hermanos, Adrián, Ariadna, Ventura, Beto y Flor, por amarme, cuidarme y protegerme desde siempre. Por ser mis guías, mis confidentes, mis mejores amigos, los que siempre me han consentido, los que estarán a mi lado en cualquier circunstancia, sin importar el tiempo, la edad o la distancia.

A mis bellos sobrinos, quienes me motivan a ser mejor persona cada día y ser un ejemplo que seguir, de que nunca es tarde para lograr tus objetivos.

A mis amigas norteñas, Blanca Ibarra Villanueva, por su gran amistad desde mi primer día como foránea, por ser una excelente cuñada y una bonita compañera de carrera. A mis amigas más pequeñas que quiero tanto, Natalia Orozco Ordieréz, porque siempre estuvo ahí para compartir su conocimiento, su amistad y cariño, a Dominique Cevedo Chavarría, esa amistad que atesoraré y llevaré conmigo a todos lados.

A mis mejores amigas y confidentes, Valeria Ferreira y Ada González, por siempre acompañarme a la distancia, motivándome, escuchándome, compartiendo cada logro y etapa de la vida.

A mis suegros, Francis Villanueva y Enrique Ibarra Reyes, por adoptarme en su familia, por apoyarme en cada logro, motivarme y ser un refugio para mí.

Y por supuesto, dedico este logro a mi gran apoyo emocional, Norris, Guantes y Nina, mis queridos y fieles compañeros peludos. Por todas esas desveladas a mi lado, por esperarme en casa día tras día, felices al verme llegar, alegrándome, haciendo más divertida y entretenida la vida lejos de mi pueblo.

AGRADECIMIENTOS

A mi *alma mater*, La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por todo el conocimiento que me otorgó en estos años de carrera, dándome todas las herramientas necesarias para crecer profesional y personalmente. Agradezco infinitamente ser parte de esta gran institución que alberga grandes cosas, sobre todo, increíbles Ingenieros y Doctores, que nos regalan de su sabiduría y se vuelven una pieza importante en nuestras vidas, a través de los años.

A la Dra. Daniela Alvarado Camarillo, mi asesora principal de Tesis y una gran maestra, por todo su apoyo y confianza que depositó en mí para lograr este increíble proyecto. Gracias por compartir su conocimiento, dentro y fuera del salón de clases. Gracias por ser una gran mentora e impulsarme a crear e indagar en nuevas cosas, por ampliar mis horizontes y hacerme valorar aún más mi carrera. Gracias por ser una excelente maestra y por poner en alto el Departamento de Ciencias del Suelo, por amar lo que hace, porque alguien que ama su trabajo, lo hace bien.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, mi asesor externo de Tesis, gracias por toda su ayuda en el transcurso del proyecto, por su tiempo brindado para guiarme en cada fase de desarrollo, por siempre estar presente en cada detalle de la tesis, gracias por obsequiarme de su sabiduría, por compartir la felicidad en los logros obtenidos. Gracias por ser un gran maestro, de los mejores que tiene la institución, ese maestro que te inspira a llegar lejos, que te motiva a ser grande y del que tuve el privilegio de haber sido su alumna un semestre.

A Karma Verde Fresh, por su ayuda que han dado para poder llevar a cabo estos proyectos de agricultura vertical en ambientes controlados.

Agradezco a algunos de mis maestros que fueron parte de mi crecimiento académico y que aprecio mucho.

A mis compañeros Tesistas, que siempre estuvieron ahí, dispuestos a ayudar con los trabajos y las actividades.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	6
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE CUADROS.....	11
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
OBJETIVO GENERAL.....	17
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
HIPOTESIS.....	17
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
2.1. Microgreens.....	18
2.2. Valor nutrimental.....	18
2.3. Producción de microgreens... ..	19
2.4. Manejo de postcosecha de microgreens.....	19
2.5. Brócoli.....	19
2.5.1. Características del brócoli.....	19
2.5.2. Microgreens de brócoli y su importancia.....	20
2.6. Arúgula.....	20
2.6.1. Características de la arúgula.....	20
2.6.2. Microgreens de arúgula y su importancia.....	21
2.7. Amaranto.....	21
2.7.1. Características del amaranto.....	21
2.7.2. Microgreens de amaranto y su importancia.....	22
2.8. Alfalfa.....	22
2.8.1. Características de la Alfalfa.....	22

2.9.	Cultivo en ambiente controlado.....	22
2.10.	Agricultura vertical de Interior (AVI).....	23
2.10.1.	Ventajas y desventajas de la Agricultura vertical de Interior.....	23
2.11.	Lámparas LED en la agricultura vertical.....	23
2.11.1.	Ventajas y desventajas del uso de luces LED.....	24
2.12.	La importancia de la intensidad de radiación.....	25
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1.	Sitio de estudio.....	26
3.2.	Materiales vegetativos y de siembra.....	26
3.3.	Sistema de cultivo vertical.....	27
3.4.	Tratamientos de densidad de siembra y lámparas LED.....	27
3.5.	Control de riego.....	29
3.6.	Cosecha y variables de respuesta.....	29
3.7.	Diseño experimental y análisis de datos.....	31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1.	Amaranto.....	32
4.2.	Arúgula... ..	35
4.3.	Brócoli.....	38
4.4.	Alfalfa.....	42
4.5.	Respuestas generales.....	45
4.6.	CONCLUSIONES... ..	47
5.	LITERATURA CITADA.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Método de siembra por charola que se utilizó en el experimento.....	26
Figura 2.	Esquema del sistema de cultivo vertical.....	27
Figura 3.	Método de medición para la cosecha por tratamiento.....	30
Figura 4.	Fotografía de producción de microgreens de amaranto.....	32
Figura 5.	Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de amaranto. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p<0.05$	33
Figura 6.	Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de amaranto. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p<0.05$	34
Figura 7.	Fotografía de producción de microgreens de arúgula.....	35
Figura 8.	Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LEDs y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de arúgula. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p<0.05$	36
Figura 9.	Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de arúgula. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p<0.05$	37
Figura 10.	Fotografía de producción de microgreens de brócoli.....	39
Figura 11.	Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de brócoli. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p<0.05$	39
Figura 12.	Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de brócoli. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p<0.05$	40
Figura 13.	Fotografía de producción de microgreens de alfalfa.....	42
Figura 14.	Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas leds y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de alfalfa. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p<0.05$	43

Figura 15. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de alfalfa. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$44

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos de densidad de siembra y número de lámparas LED aplicados en el estudio para alfalfa y arúgula.....	28
Cuadro 2. Tratamientos de densidad de siembra y número de lámparas LED aplicados en el estudio para amaranto y brócoli.....	28
Cuadro 3. Luz diaria integrada (DLI) por número de lámparas.....	29

RESUMEN

Los microgreens son plantas jóvenes y tiernas, compuestas de tallos, cotiledones y hojas pequeñas; su producción es de 7 a 21 días a partir de la aparición de sus primeras hojas verdaderas. Contienen un gran aporte nutricional como vitaminas, minerales y antioxidantes, pueden ser hortalizas, hierbas comestibles, cereales y plantas silvestre. Además, su producción en ambientes controlados es amigable con el medio ambiente y el uso de luz LED puede optimizar su producción en cualquier ciudad, durante todo el año.

El objetivo de este estudio fue evaluar la producción de cuatro especies de microgreens, brócoli (*Brassica oleracea*), alfalfa (*Medicago sativa*), amaranto (*Amaranthus*) y arúgula (*Eruca vesicaria subsp. sativa*), bajo diferente intensidad de luz y densidad de siembra. Para ello se emplearon 2, 4 y 6 lámparas LED con un periodo de 8 horas luz por día, con una densidad de siembra de 130, 260 y 400 g/m² para arúgula y alfalfa; mientras que las densidades fueron de 260, 400 y 500 g/m² para brócoli y amaranto. El estudio constó de 9 tratamientos por cada especie y cada tratamiento constó de 4 repeticiones. Los resultados mostraron que la intensidad de luz LED interactuó con las densidades de siembra en cada especie, la mayor producción de microgreens de amaranto se obtiene cuando se emplean 6 LED y dosis de siembra de 260 y 400 g/m²; mientras que para los microgreens de arúgula, a mayor intensidad de luz LED si se favoreció el peso fresco, pero no la altura, donde la menor intensidad de luz fue la óptima para mejores resultados. Los resultados sugieren que la mejor producción de microgreens de alfalfa se obtiene de un balance entre densidad de siembra y número de lámparas LED, para maximizar un rendimiento óptimo en peso fresco y altura y para tener mejor rendimiento en peso fresco y mayor altura de brócoli se recomienda emplear 2 lámparas LED con una dosis de siembra de 500 g/m².

ABSTRACT

Microgreens are young and tender plants composed of stems, cotyledons, and small leaves. Their production cycle ranges from 7 to 21 days from the emergence of their first true leaves. They provide a high nutritional content of vitamins, minerals, and antioxidants, and can include vegetables, edible herbs, cereals, and wild plants. Furthermore, their production in controlled environments is environmentally friendly, and the use of LED lighting can optimize their yield in any city throughout the year.

The objective of this study was to evaluate the production of four microgreen species: broccoli (*Brassica oleracea*), alfalfa (*Medicago sativa*), amaranth (*Amaranthus*), and arugula (*Eruca vesicaria* subsp. *sativa*) under different light intensities and sowing densities. For this purpose, 2, 4, and 6 LED lamps were used with a photoperiod of 8 hours of light for day, and sowing densities of 130, 260, and 400 g/m² for arugula and alfalfa; while 260, 400, and 500 g/m² were used for broccoli and amaranth. The study consisted of 9 treatments per species, with 4 replications for treatment.

The results showed that LED light intensity interacted with sowing densities in each species. The highest yield of amaranth microgreens was obtained when 6 LEDs and sowing densities of 260 and 400 g/m² were used. For arugula microgreens, higher LED light intensity favored fresh weight but not height, where the lowest light intensity was optimal for better results. The results also suggest that the best production of alfalfa microgreens is achieved through a balance between sowing density and number of LED lamps to maximize optimal yield in both fresh weight and height. To achieve better fresh weight yield and greater height in broccoli, it is recommended to use 2 LED lamps with a sowing density of 500 g/m².

1. INTRODUCCIÓN

Se espera que para el año 2050 la población mundial haya superado los 9,700 millones de personas (United Nations, 2022). Por este motivo, la ONU (2022) propone duplicar el rendimiento de los cultivos, utilizando prácticas agrícolas resilientes, con mínima alteración de los ecosistemas y que también sean fuertes frente al cambio climático, como sequías, inundaciones y otros desastres.

En un contexto global donde la inseguridad alimentaria sigue siendo una preocupación urgente, los microgreens representan una posible solución gracias a su capacidad de producir alimentos altamente nutritivos en un corto período de tiempo y con recursos mínimos (Giordano et al., 2023); Los microgreens, microverdes o microhortalizas son brotes inmaduros, producidos a partir de semillas de vegetales y hierbas, con sus dos cotiledones completamente desarrollados y un par rudimentario de primeras hojas (Xiao et al., 2012), los microgreens comenzaron a aparecer en los menús de chefs en San Francisco, California, a principios de los años 80 (USDA, 2014).

Existe una amplia variedad de cultivos que se puede producir como microgreens, entre ellos hortalizas, cereales y hierbas (Kyriacou et al., 2016). También pueden utilizarse hierbas autóctonas y plantas silvestres comestibles las que constituyen un vasto depósito para la selección de material genético para la producción de microgreens (Kyriacou et al., 2016).

Las microgreens pueden contribuir, directa o indirectamente, a preservar y valorizar la biodiversidad, mejorar la sostenibilidad del medio ambiente, y aumentar la seguridad alimentaria y nutricional, según Di Goia y Santamaría (2015) y Romero Rodríguez y Tafur Ruge (2018). El aporte nutricional a la población, si se difunde el consumo de brotes y microgreens, puede llegar a ser muy significativo en países en vías de desarrollo, como Argentina, en donde la deficiencia nutricional de hierro es elevada, a pesar que presenta uno de los más altos consumos de carne, especialmente rojas, en el mundo (50 kg/hab/año); y se ha observado resultados de insuficiente ingesta de hierro, como causa principal de anemia según el Ministerio de Salud de la Nación (MSN, 2016, pág.77), según Martínez (2019).

Los microgreens, desempeñan un papel importante en la salud humana, ya que participan en la eliminación de los radicales libres y, en consecuencia, pueden prevenir el riesgo de padecer cáncer y enfermedades cardiovasculares (Gengatharan et al., 2015). Los brotes y los microgreens son alimentos que contienen grandes cantidades de enzimas, clorofila, aminoácidos, minerales, vitaminas y oligoelementos (Martín, 2017). Este alto valor nutricional puede ayudar a combatir la desnutrición y mejorar la salud en comunidades vulnerables (Bouranis et al., 2023). Lester et al. (2010) han demostrado que las hojas jóvenes de espinaca generalmente presentan niveles más altos en el contenido de vitamina C, B9 y K1 y carotenoides (luteína, violaxantina, zeaxantina y β caroteno) en comparación con las hojas maduras.

Así mismo, la familia Brassicaceae se ha vuelto una opción de interés para el cultivo de microgreens, como el berro (*Nasturtium officinale*), que posee características que benefician la salud, ya que es fuente de vitaminas B6 y C, carotenos y manganeso junto con fibra, hierro, cobre y calcio, así como de vitaminas E, B1 y B2. El sabor del berro es picante y fresco, similar al rábano o la mostaza, debido a la presencia de compuestos sulfurosos (Saavedra et al., 2015). Las brassicaceae, dado su variado contenido de metabolitos secundarios, como polifenoles, aportan la capacidad antioxidante de dichas plantas (Ramírez et al., 2020).

Los microgreens, además de su aporte nutricional, contribuyen a la sostenibilidad agroalimentaria por su diversidad genética y su potencial en la generación de alimentos funcionales e innovadores con alto valor agregado (Castagnino et al., 2020). La producción de microgreens en cuartos de cultivo representan una alternativa armoniosa con el medio ambiente para generar alimentos en las ciudades (Zhang et al., 2021), como lo es la Agricultura vertical. La agricultura vertical, puede definirse como un sistema de producción agrícola que utiliza capas verticalmente apiladas o estructuras integradas verticalmente para maximizar la superficie de cultivo por unidad de área horizontal, permitiendo una producción intensiva en ambientes controlados (Kalantari et al., 2017). Esta tecnología permite

controlar variables como la luz, la temperatura, la humedad relativa, entre otros factores productivos (Zobayed et al., 2005).

La luz es uno de los parámetros de mayor importancia en la producción de microgreens, ya que la fotosíntesis y la fotomorfogénesis dependen, en gran medida, de la intensidad, duración y calidad (longitud de onda) de la luz incidente (Alrifai et al., 2019; Casierra-Posada y Peña-Olmos, 2015).

En la última década, uno de los mayores desarrollos de iluminación artificial en horticultura fueron las luces LED (Morrow, 2008), por las ventajas que este sistema de iluminación ofrece como son el control de la composición espectral, su tamaño pequeño, producción de altos niveles de luz con un índice de radiación calorífica bajo y una larga vida útil que les permite mantenerse trabajando por años sin necesidad de reemplazo (Bourget, 2008; Xu et al., 2012; Gupta y Jatothu, 2013). La luz LED, también influyen en la acumulación de compuestos químicos, especialmente en condiciones de crecimiento controlado (Kyriacou et al., 2016).

Diversos estudios han explorado la regulación del espectro de luz en la producción de microvegetales de especies de las familias Brassicaceae, Lamiaceae, Apiaceae, Boraginaceae y Chenopodiaceae, todas con alto valor nutricional, reportan que la luz puede modificar el crecimiento de las plántulas e incrementar el contenido de compuestos bioactivos, aunque se han limitado al efecto de luz monocromática, azul, roja y roja-azul (Toscano et al., 2021). La exposición a la luz regula el tiempo de madurez del cultivo y reduce el tiempo a la cosecha, lo que genera menores costos de producción y mayor eficiencia biológica (Montoya et al., 2018).

El presente estudio se plantea evaluar el efecto de la intensidad de la luz aplicada mediante diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en el rendimiento y producción de microgreens de alfalfa (*Medicago sativa*), amaranto (*Amaranthus* sp.), brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) y arúgula (*Eruca sativa*).

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la intensidad de luz y la dosis de siembra en cuatro especies de microgreens: alfalfa, amaranto, brócoli y arúgula en un sistema de agricultura vertical.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Determinar el efecto de la intensidad de luz mediante el número de lámparas LED que deben colocarse en los niveles de cultivo sobre la producción y calidad de microgreens.

Definir el efecto de la densidad de siembra sobre la producción y calidad de microgreens.

HIPÓTESIS

La interacción entre la intensidad de la luz y la densidad de siembra afectan la calidad y producción de microgreens en condiciones de agricultura vertical.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Microgreens

Las llamadas microgreens, son plantas jóvenes y tiernas, compuestas de tallos, cotiledones y hojas pequeñas, de diverso tipo de hortalizas y hierbas comestibles, que se pueden producir en un período de tiempo muy breve (Castagnino y Marina, 2020). Los microgreens se cosechan después del desarrollo de las hojas de cotiledón u hojas de semillas, lo cual ocurre generalmente entre 10 y 14 días después de la siembra (Tan et al., 2020; Mir et al., 2017).

2.2. Valor nutrimental

A pesar de que a menudo se utilizan principalmente para cumplir con una decoración estética de los platos, los microgreens tienen también un excelente perfil nutricional y son una de las novedades más interesantes en el mercado de frutas y hortalizas frescas, hasta el punto de ser consideradas verdaderos “alimentos funcionales” o “súper alimentos” (Treadwell et al., 2010). Un estudio reciente, realizado por un grupo de investigadores del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) y de la Universidad de Maryland (USA), que analiza el contenido de vitaminas (vit. C, Vit. E y vit. K) y carotenoides (β - caroteno, luteína y zeaxantina) de 25 especies de microgreens, ha evidenciado que, en comparación con las hortalizas convencionales, cosechadas en el punto de madurez comercial, las microgreens tienen un contenido de compuestos antioxidantes de hasta incluso 12 veces mayor (Xiao et al., 2012). Por lo tanto, es importante el consumo diario de hortalizas, que contienen sustancias antioxidantes capaces de contribuir a la resistencia de las paredes de los vasos sanguíneos, los huesos, tendones y dientes (Ames et al., 1993). Los carotenoides constituyen una de las principales clases de fitoquímicos, su consumo es necesario porque actúa como precursores de la vitamina A, y también ejercen una importante actividad antioxidante (Paradiso et al., 2020).

2.3. Producción de microgreens

La producción de microgreens ha tomado relevancia en los últimos tiempos (Resh et al., 2013). En México, la Asociación Nacional de Restaurantes colocó a los microgreens en el 5to lugar de tendencias de alimentos en 2009 (Gusto Buen Vivir, 2012). La oferta y la demanda de microgreens están influenciadas por las tendencias gastronómicas emergentes y la selección de especies se basa en la interacción del productor con los chefs y en la familiarización del consumidor con sus atributos sensoriales particulares (Koppertcress, 2016). Además, estudios recientes han demostrado que el mercado de los microgreens está en una tendencia ascendente continua en Europa y a nivel mundial, y que el modo de producción más utilizado ha sido bajo ambiente controlado (Paraschivu et al., 2021).

2.4. Manejo de postcosecha de microgreens

Los microgreens siguen un patrón de estrés inducido como consecuencia del corte al momento de la cosecha, favorecido por inadecuadas condiciones de almacenamiento y embalaje a temperaturas incorrectas que favorecen la deshidratación y la pérdida de calidad, limitando su vida útil (Hodges y Toivonen, 2008; Kou et al., 2014). Por ende, mantener siempre la cadena de frío en un rango de temperatura correcto es imperativo, ya que el mal uso de temperatura acelera la senescencia (Kou et al., 2014).

2.5. Brócoli

2.5.1 Características del brócoli

El brócoli es un cultivo anual que pertenece a la familia Brassicaceae y es pariente de las coles de Bruselas, la col, la coliflor y la col rizada (Ilahy et al., 2020). El brócoli es originario del Mediterráneo y Asia Menor, su nombre proviene del italiano “broco” que significa brote, dando alusión a la parte comestible de la planta; pertenece a la familia de las crucíferas, siendo de la especie *Brassica oleracea* L. (Epigmenio, 2013). Se ha reportado, que el consumo de brócoli y germinados de semillas de brócoli, puede influir en la reducción del riesgo a contraer cáncer de pulmón, ovarios, mama, próstata, vejiga, y páncreas, puede contribuir de igual manera a disminuir la

posibilidad de desarrollar diabetes, enfermedades cardiovasculares, y enfermedades respiratorias, así como puede reforzar el sistema inmunológico y ayudar a reparar algunas lesiones cerebrales (Shapiro et al., 2001).

2.5.2. Microgreens de brócoli y su importancia

Entre los microgreens más populares destacan las brassicáceas, como el brócoli (Ebert, 2022; Xiao et al., 2019). Son muy valorados por sus beneficios para la salud, ya que son ricos en vitaminas, oligoelementos, aminoácidos, antioxidantes, proteínas, etc. (Fahey et al., 1997, Finley et al., 2001, Han et al., 2006). Los microgreens de brócoli contienen aproximadamente 50 veces más sulfurofán en peso que los brócolis maduros (Mewis et al., 2012). El sulforafano es considerado un compuesto prometedor debido a que se ha encontrado que contiene propiedades que previenen, retrasan o revierten el desarrollo de lesiones preneoplásicas y mejoran las tasas de supervivencia, actuando sobre células cancerosas como un agente terapéutico (Conzatti et al., 2015). La forma más común de cultivar el brócoli es mediante campo abierto, pero debido a las propiedades nutrimentales, ha tomado relevancia la producción de estos mediante sistemas de control ambiental (Martínez, 2004; Zhang et al., 2020; Wojciechowska et al., 2020).

2.6. Arúgula

2.6.1. Características de la arúgula

La arúgula, también conocida como rúcula, es una verdura tipo hoja que ha aumentado en producción en Brasil (Menegaes et al, 2015).

Se ha utilizado desde tiempo atrás como ingrediente en la cocina de varios países como Italia, Marruecos, Portugal y Turquía, hacia la década de los 90 se inició el cultivo de arúgula a gran escala tanto al aire libre como en invernaderos desde Estados Unidos de Norte América hasta Sudamérica, se consume como ensalada, es apreciada por su característico aroma y sabor picante (Jasper et al., 2020).

La arúgula se ha vuelto un producto esencial en mercados agrícolas, y su cultivo se beneficia de prácticas agrícolas sostenibles que mejoran la calidad y responden a la demanda de alimentos orgánicos (Pérez, 2022).

2.6.2. Microgreens de arúgula y su importancia

Este vegetal, perteneciente a la familia de las brassicáceas, es conocido por su sabor distintivo y su alto contenido de vitaminas A, C y K, así como minerales esenciales (Bell et al., 2014). La arúgula es potencialmente saludable por su contenido en fitoquímicos como los glucosinolatos y compuestos fenólicos que actúan como poderosos antioxidantes y antitumorales; además, contiene fibra, proteínas, calcio, hierro, magnesio, vitaminas A, C y K, carotenoides y flavonoides (Ku et al., 2016). Hay poca información sobre la producción de microgreens de arúgula.

2.7. Amaranto

2.7.1. Características del amaranto

El amaranto taxonómicamente pertenece a la división Angiospermae, clase Dicotyledonae, serie Centrospermae, familia Amaranthaceae, género *Amaranthus* (Tapia, 1997), es considerado un cultivo ancestral originario de América cuya data se remonta a más de siete mil años (Stetter y Schmid, 2017). Evidencias arqueológicas indican que México es uno de los centros de origen y domesticación del amaranto (Sauer, 1950). Martínez - López et al. (2020), argumentan que la introducción de este grano a la dieta puede ayudar a promover la salud y prevenir enfermedades, dado que contiene lisina y compuestos bioactivos. Orona - Tamayo et al. (2019) establecen que el amaranto, además de otras semillas son considerados los “súper alimentos del futuro”.

2.7.2 Microgreens de amaranto y su importancia

En términos de producción de hojas de amaranto y frente al estrés hídrico, una alternativa, sería su obtención bajo microgreens que ocuparían muy poca agua. Esta forma de producción corresponde a plantas en estado juvenil cosechadas con su primer par de hojas verdaderas donde el principal atractivo del amaranto son los colores rojo brillantes presentes en hojas y/o tallos, los que atraen a consumidores como cualidad principal (Meas et al., 2020; Ahmad et al., 2016; Ebert et al., 2015).

El amaranto es una fuente importante de proteína, calcio, hierro, aminoácidos (como lisina y niacina) y vitaminas (B y E) (Mapes-Sánchez, 2015); según Ebert et al. (2015), el contenido de vitamina C, junto con otros antioxidantes en microgreens de amaranto es significativamente mayor en los brotes respecto a la planta completamente desarrollada, ya que sus proteínas de reserva son apropiadas para el consumo humano ya que el balance aminoacídico se acerca al óptimo sugerido por la Organización de Alimentos y Agricultura, FAO (FAO/WHO, 1973).

2.8. Alfalfa

2.8.1 Características de la Alfalfa

La alfalfa, cuyo nombre científico es *Medicago sativa*, es una planta forrajera perteneciente a la familia de las leguminosas (Fabaceae) más antigua e importante a nivel mundial (Basigalup, 2007); es un cultivo que tiene un elevado consumo de calcio y magnesio (Juncafresca, 1983). Esta especie fue introducida a América del Sur en el siglo XVI, por los portugueses, y en el año 1870 fue introducida a Perú, México y Estados Unidos, por los españoles (Muslera y Ratera, 1991).

2.9. Cultivo en ambiente controlado

La producción de microgreens en entornos controlados minimiza el uso de pesticidas y optimiza el uso del agua, haciendo que esta práctica sea ambientalmente sostenible ((Kyriacou et al., 2016; Ebert, 2022; Xiao et al., 2014). En general, el sistema de producción implica el uso de un sustrato dispuesto en bandejas, que se colocan sobre bancadas en un ambiente protegido, siendo el riego realizado solo con agua o con solución nutritiva (Kyriacou et al., 2016; Dias et al., 2023).

2.10. Agricultura vertical de Interior (AVI)

La agricultura vertical, puede definirse como un sistema de producción agrícola que utiliza capas verticalmente apiladas o estructuras integradas verticalmente para maximizar la superficie de cultivo por unidad de área horizontal, permitiendo una producción intensiva en ambientes controlados (Kalantari et al., 2017), permite

producir alimentos en espacios reducidos, con mayores rendimientos, menor uso de agua (Avgoustaki et al., 2021).

Este sistema se basa en cámaras de crecimiento equipadas con luz artificial y condiciones ambientales controladas, lo que ofrece la posibilidad de cultivar todo el año hortalizas de alta calidad y enriquecidas en fitoquímicos (Kalantari et al., 2017; Kyriacou et al., 2016; Ebert, 2022).

2.10.1. Ventajas y desventajas de la Agricultura vertical de Interior

La AVI, se presenta como una contribución innovadora y eficiente a la mitigación de las dificultades que plantean la creciente demanda global de alimentos, la escasez de tierras cultivables y agua, y el cambio climático (Kabir et al., 2023). Además, como se usan múltiples estantes de cultivo, se facilita la producción masiva de vegetales en un espacio pequeño (Chiba. 2016).

No obstante, a pesar de las ventajas que ofrece este sistema de cultivo, el uso de la AVI sigue planteando algunas dificultades técnicas y prácticas que afectan seriamente a la rentabilidad y escalabilidad de los negocios, como la elevada inversión inicial, los altos costes del personal cualificado, la limitación de productos cultivables, la escasa aceptación por parte de los consumidores y, sobre todo, el alto coste de la energía en un alto número de países (Kabir et al., 2023; Kumar et al., 2023; Lubna et al., 2022).

2.11. Lámparas LED en la agricultura vertical

Con el tiempo se han diseñado diferentes fuentes de iluminación para los cultivos indoor, entre las que cabe destacar las luces LED, por su eficiencia energética, larga vida operacional, baja emisión de calor y la posibilidad de manipular con gran precisión la intensidad y espectro lumínico (Shibaeva et al., 2022).

La intensidad luminosa optima favorece la fotosíntesis y la acumulación de materia seca, por el contrario, el exceso puede limitarlas (Hu et al., 2007). La luz LED (Light Emitting Diode), tiene la capacidad de proporcionar altas intensidades de luz con bajo calor radiante hacia las plantas y con cualidades espectrales ajustables que permiten la excitación selectiva de fotopigmentos (Flores et al., 2020). Se ha

corroborado que los espectros de luz roja y azul representan los rangos lumínicos más propicios para la fotosíntesis en plantas (Dou et al., 2017). Estudios previos han demostrado que la luz azul (425-490 nm) y la luz roja (610-700 nm) son longitudes de onda que estimulan la fotosíntesis (Liu et al., 2021), por ejemplo, Nájera et al. (2024), encontraron que, entre dos espectros lumínicos distintos, cultivar microgreens bajo una mayor proporción de luz roja favorecen un mayor rendimiento y contenido de materia seca.

Existen tres parámetros de luz de crecimiento comúnmente usados: calidad, cantidad y duración. Todos estos parámetros tienen diferentes efectos sobre el desarrollo de las plantas (Singh et al., 2014).

Además, las respuestas de crecimiento y concentración de compuestos funcionales varían dependiendo del espectro, la intensidad, la especie y la variedad (Brazaitytė et al., 2015; Vaštakaitė et al., 2015).

2.11.1. Ventajas y desventajas del uso de luces LED

Una de las principales ventajas de los LED es la posibilidad de utilizar longitudes de onda de luz específicas para influir en la morfología de las plantas y los contenidos fitoquímicos (Tamulaitis et al., 2005). Las luces LED, no solo maximiza el crecimiento en altura y la retención de agua, sino que también promueve la producción de clorofila, esencial para un desarrollo saludable de la planta ((Hogewoning et al., 2010; Bantis et al., 2018).

El diodo emisor de luz o LED puede emitir cualquier tipo de color, produce muy poco calor debido a una alta eficiencia tiene una vida útil muy larga y resultan muy económicas desde el punto de vista energético (Singh et al., 2014; Bantis et al., 2018). Sin embargo, existe poca información respecto a desventajas del uso de luces LED en la producción de microgreens en agricultura vertical de interior.

2.12. La importancia de la intensidad de radiación

La radiación lumínica es absorbida por las plantas y utilizada para iniciar el proceso de fotosíntesis (Franklin et al., 2005). Por otro lado, al ser absorbida es censada por las plantas modificando su desarrollo, a través de la discriminación de la calidad e

intensidad radiactiva a la cual son expuestas. De esta forma las plantas perciben información sobre el largo del día (estacionalidad y ciclo circadiano) y dirección de la radiación, permitiendo respuestas de desarrollo como la germinación, formación de hojas y reproducción. Además, al censar la radiación lumínica son también capaces de estimular procesos adaptativos en entornos adversos como radiación alta, competencia, depredación, sequía, salinidad, calor o frío (D'Amico-Damião y Carvalho, 2018; Mawphlang y Kharsgiing, 2017; De Wit et al., 2016; Ballaré, 2014).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Sitio de estudio

La investigación se realizó dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en el Laboratorio de Agricultura Vertical De Ambientes Controlado, del Departamento De Ciencias del Suelo, con dirección en Calzada Antonio Narro #1923, Buenavista, CP 25315, Saltillo, Coahuila, México.

3.2. Materiales vegetativos y de siembra

Se utilizó semillas sin tratamiento de pesticidas de cuatro especies de microgreens: brócoli (*Brassica oleracea*) variedad Waltham 29, alfalfa (*Medicago sativa*) variedad San Miguelito, amaranto (*Amaranthus*) variedad común y arúgula (*Eruca vesicaria subsp. sativa*) variedad wild rocket. Para la siembra se utilizaron charolas planas base germinación para semilleros 1020, con las siguientes dimensiones: 28.5 cm de ancho, 55 cm de largo y 6 cm de profundidad. Cada charola se dividió en dos partes usando la mitad de una charola por tratamiento (Figura 1). Como medio de cultivo se usó bioStrate, un sustrato especial diseñado para la producción de microgreens, el cual retiene agua y ayuda a un mejor desarrollo de raíces. Se cortó el rollo de bioStrate del tamaño de la mitad de la charola y se humedeció totalmente de manera uniforme con agua purificada y se colocó dentro de la charola. Se pesó las densidades de semilla que correspondía a cada tratamiento, una vez que se tuvo los gramos deseados, se procedió a sembrar y se acomodó de manera uniforme la semilla sobre el bioStrate.

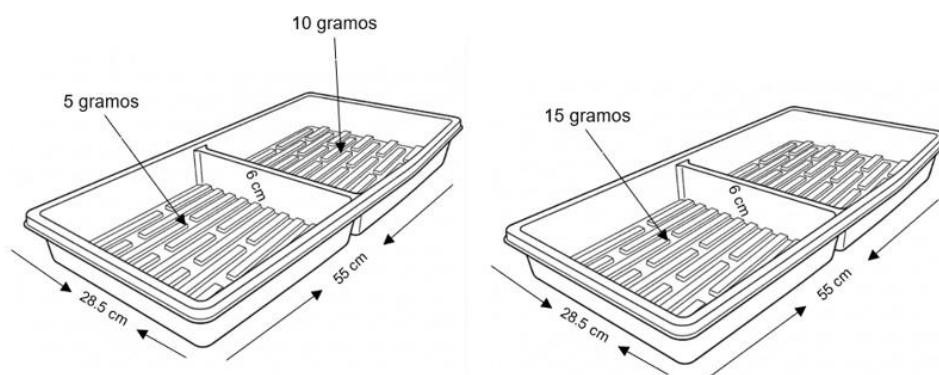


Figura 1. Método de siembra por charola que se utilizó en el experimento.

3.3. Sistema de cultivo vertical

El rack que se empleó para el experimento contenía las siguientes dimensiones: 1.72 m de largo, .80 m de ancho y 2.45 m de alto. El Rack cuenta con 3 niveles, en cada nivel se utilizó diferente cantidad de lámparas LED, en el nivel 1: 2 lámparas, nivel 2: 4 lámparas y nivel 3: 6 lámparas (Figura 2).

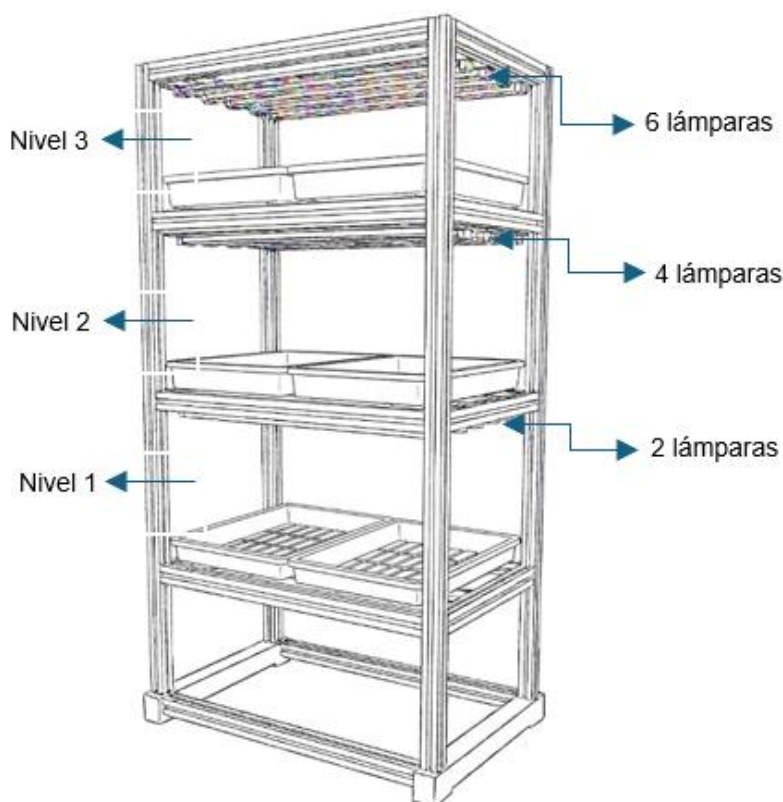


Figura 2: Esquema del sistema de cultivo vertical.

3.4. Tratamientos de densidad de siembra y lámparas LED

Por especie se establecieron nueve tratamientos con tres diferentes densidades de siembra. Para arúgula y alfalfa las densidades de semilla fueron: 130, 260 y 400 g/m² (Cuadro 1), equivalentes a los 5, 10 y 15 g por charola indicados en la Figura 1, mientras que, para amaranto y brócoli, las densidades fueron: 260, 400 y 500 g/m² (Cuadro 2), equivalentes a 10, 15 y 20 g por charola. Una vez sembrado se cubrieron las charolas con bolsas negras de polietileno de alta densidad (HDPE) y se colocaron en el rack, para llevar a cabo la germinación en completa oscuridad.

La etapa de oscuridad en brócoli y amaranto fue de 6 días, mientras que en alfalfa y arúgula de 4 días y se manejó adecuadamente la humedad para ambos casos. En arúgula y alfalfa, a los 4 días después de la siembra se les retiró el plástico negro que cubría a los tratamientos y se colocaron en los niveles del rack. En amaranto y brócoli, a los 6 días después de la siembra se les retiró el plástico que cubría a los nueve tratamientos por especie y se acomodaron en los niveles del rack. Las respectivas charolas conteniendo los tratamientos de densidad de siembra se colocaron en un rack de tres niveles; en cada nivel se colocaron 2, 4 y 6 lámparas LED (Cuadro 1 y 2).

Cuadro 1. Tratamientos de densidad de siembra y número de lámparas LED aplicados en el estudio para alfalfa y arúgula.

Tratamientos	Densidades de siembra (g/m ²)	Número de lámparas	Nivel en el rack
1	130	2	1
2	260	2	
3	400	2	
4	130	4	2
5	260	4	
6	400	4	
7	130	6	3
8	260	6	
9	400	6	

Cuadro 2. Tratamientos de densidad de siembra y número de lámparas LED aplicados en el estudio para amaranto y brócoli

Tratamientos	Densidades de siembra (g/ m ²)	Número de lámparas	Nivel en el rack
1	260	2	1
2	400	2	
3	500	2	
4	260	4	2
5	400	4	
6	500	4	
7	260	6	3
8	400	6	
9	500	6	

Todos los tratamientos de las cuatro especies de semilla de microgreens se sometieron al mismo número de horas luz por día. Las lámparas led se encendían automáticamente con un temporizador Digital 8 Eventos Programable 15ª 1875w, el cual estaba programado para encenderse a las 8:00 de la mañana y apagarse a las 4:00 de la tarde, con un total de 8 horas de luz. Los tres tratamientos de lámparas LED rindieron diferente radiación fotosintéticamente activa e integral de luz diaria, la cual se indica en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Luz diaria integrada (DLI) por número de lámparas.

Nivel	Número de lámparas	DLI mol/hora	8 horas de luz (mol/m2/día)
1	2	0.292	2.360
2	4	0.591	4.728
3	6	0.887	7.096

3.5. Control de riego

Para las 4 especies de microgreens se empleó el mismo manejo de humedad durante el experimento. Para el riego se utilizó un fumigador aspersor manual, modelo Fdo-2 de 2 litros 10235 blanco, de la marca Truper, ya que cuenta con una boquilla regulable (jet-cono) de latón resistente a la corrosión, con presión máxima de 36bar, la cual se manejó adecuadamente la aspersión y se roció con la gota más pequeña para no dañar las plantas. También se regó por abajo, tomando de una esquina el bioStrate y se humedeció homogéneamente las raíces y se evitó el exceso de agua para no darle paso al crecimiento de hongos. Los primeros días de crecimiento el riego fue menor, se regó dos veces al día, un riego por la mañana y el otro por la tarde. Cuando la planta tuvo un mayor tamaño y requirió más humedad, se regó 3 veces al día, en la mañana, tarde y noche. La cantidad dependió de la humedad que contenía el bioStrate.

3.6. Cosecha y variables de respuesta

Para las 4 especies de microgreens fue el mismo manejo durante la cosecha y se llevó a cabo cuando apareció la primera hoja verdadera. En cada especie varía el número de días:

- En la Arúgula su cosecha fue a los 8 días, a partir del día que se expuso a la luz LED.
- En la Alfalfa su cosecha fue a los 10 días, a partir del día que se expuso a la luz LED.
- En el Amaranto su cosecha fue a los 12 días, a partir del día que se expuso a la luz LED.
- En el Brócoli su cosecha fue a los 12 días, a partir del día que se expuso a la luz LED.

Para tener una cosecha segura se requirió de los siguientes elementos: guantes de látex ambiderm plus, bata, tijeras, regla y cubrebocas. Cada tratamiento por especie se humedeció homogéneamente y se dividió en 4 partes iguales y se cortó con las tijeras el bioStrate, dando un total de 4 repeticiones por tratamiento (Figura 3).

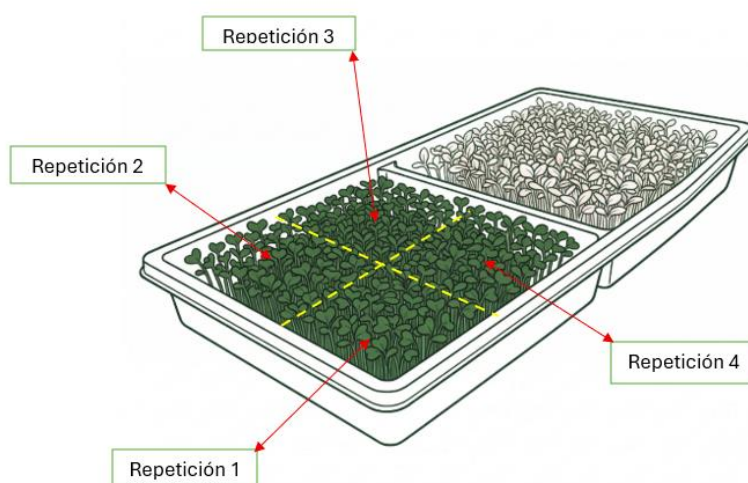


Figura 3. Método de medición para la cosecha por tratamiento.

De cada repetición se tomaron medidas y se obtuvo la altura de la planta, se midió los 4 lados para obtener un promedio; después de ello, cada repetición se pesó 2 veces, con una báscula digital MH, modelo 005. El primer peso se obtuvo con el bioStrate y el segundo sin el bioStrate, para ello, con las tijeras se cortó la planta muy cerca de la raíz y se obtuvo la masa total de microgreens. Después de que se obtuvo el peso fresco de los tratamientos de cada especie, se empacaron en bolsas

tipo ziploc, se etiqueto cada una y se colocaron en el congelador para muestras futuras.

3.7 Diseño experimental y análisis de datos

El estudio se planteó en un diseño factorial en bloques al azar para cada especie, en el cual el factor A correspondió a el número de lámparas LED, con tres niveles: 2, 4 y 6 lámparas, y el factor B a la densidad de siembra, con tres niveles cada uno, resultando nueve tratamientos.

Cada tratamiento constó de 4 repeticiones. Los datos obtenidos se analizaron con un análisis de varianza con SAS y en caso de significancia estadística se sometieron a una prueba de medias de Tukey con $p < 0.05$.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Amaranto

En los microgreens de amaranto (Figura 4), el rendimiento en peso fresco se muestra en la Figura 5. Los resultados indican que la mayor producción se presentó cuando el amaranto se sembró a una densidad de 260 y 400 g/m² y con la intensidad de luz producida por 6 lámparas LED por nivel, disminuyéndose significativamente cuando la densidad de siembra fue de 500 g/m².



Figura 4. Fotografía de producción de microgreens de amaranto.

Cuando se emplearon 2 lámparas LED también se obtuvo un alto rendimiento en peso fresco, aunque esto solamente cuando el amaranto se sembró con la dosis más baja de 260 g/m².

El empleo de 4 lámparas LED para producir microgreens de amaranto no dio buenos resultados ya que independientemente de la dosis de siembra se obtuvieron bajos rendimientos.

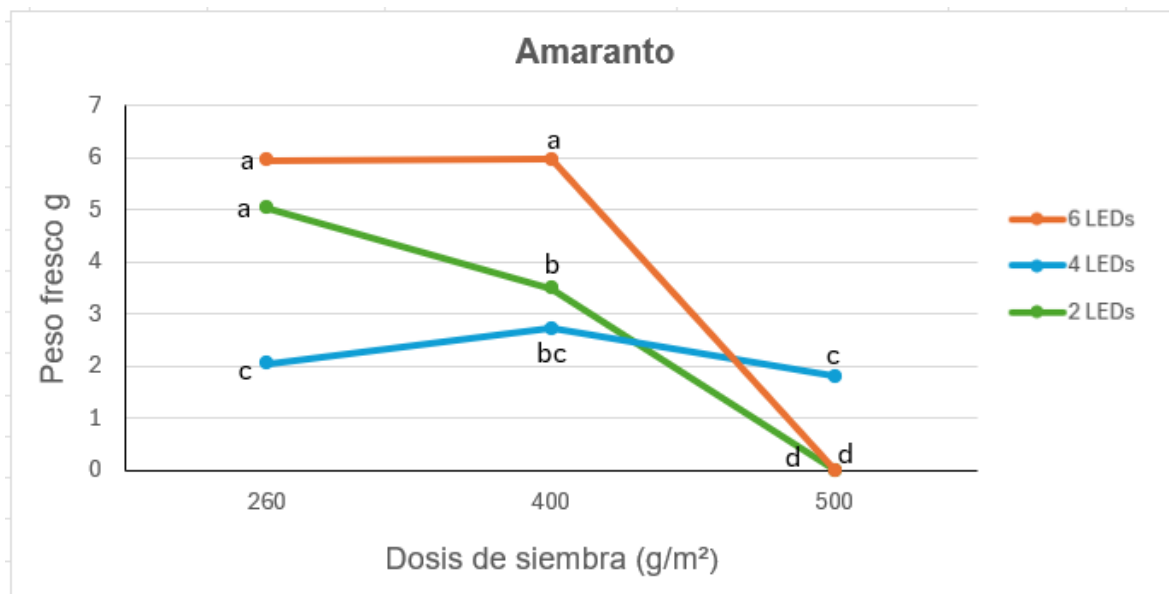


Figura 5. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de amaranto. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

El crecimiento en altura del amaranto se muestra en la Figura 6. Los resultados indican que la mayor altura se presentó cuando el amaranto se sembró a una densidad de 400 g/m² y con la intensidad de luz producida por 4 lámparas LED por nivel, disminuyendo su crecimiento aproximadamente un 33% cuando se sembró con una densidad de 260 g/m² y un 55% cuando se sembró con una densidad de 500 g/m². Cuando se emplearon 2 lámparas LED, con una densidad de siembra de 400 g/m², el crecimiento en altura de microgreens de amaranto también fue favorable, y cuando se sembró con una densidad de 260 g/m² la altura disminuyó aproximadamente en 0.38 mm, aunque, cuando se sembró con una densidad de 500 g/m², los resultados disminuyeron significativamente al igual que cuando se emplearon 6 lámparas LED con una densidad de 500 g/m². El empleo de 6 lámparas LED, tuvo el menor crecimiento en altura. Cuando se sembró con una densidad de 260 g/m² se obtuvo una altura, similar cuando se emplearon 2 y 4 lámparas LED, con las mismas densidades.

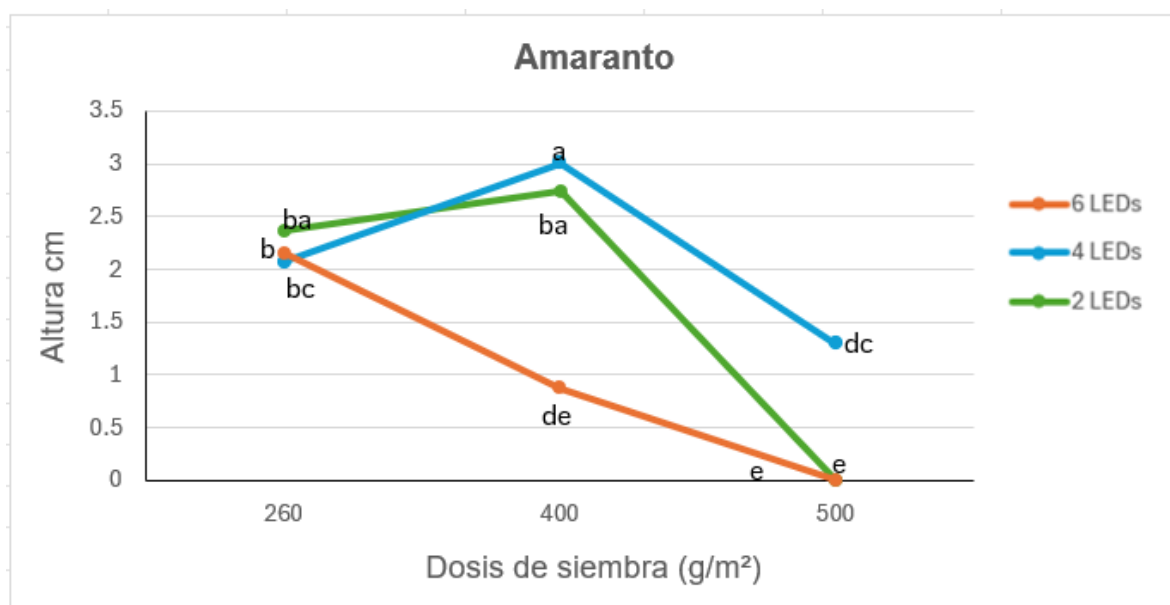


Figura 6. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de amaranto. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

Los resultados sugieren que, con una alta densidad de siembra, 500 g/m², se obtiene una gran cantidad de plántulas, sin embargo, esto fue contraproducente ya que incluso con 6 lámparas no se logró satisfacer las necesidades de luz de estas plántulas debido a la alta competencia por el espacio. De acuerdo con Postma et al. (2020), la biomasa total por unidad de superficie está fuertemente determinada por la densidad de plantas, mientras que Huber et al. (2020) señalan que las plantas creciendo a altas densidades compiten por luz, así como por otros recursos primarios como el agua y los nutrientes. En el presente estudio, se considera que el principal factor de competencia entre las plántulas de amaranto fue por la luz ya que en esta etapa de desarrollo y por las condiciones de manejo no se aportan nutrientes mientras que se mantiene el abastecimiento de agua uniforme todo el tiempo.

Los resultados sugieren que en amaranto la mayor producción de microgreens de amaranto se obtiene cuando se emplean 6 LED y dosis de siembra de 260 y 400 g/m². Gomes et al. (2025), sugieren que la densidad de siembra tiene un efecto

significativo en el rendimiento de biomasa fresca de microgreens de amaranto, siendo las densidades intermedias las que optimizaron la producción sin comprometer la calidad morfológica, lo cual coincide con los resultados observados en el presente estudio, pero en nuestro caso esa respuesta depende de la intensidad de luz.

4.2. Arúgula

En los microgreens de arúgula (Figura 7), el rendimiento en peso fresco en arúgula se muestra en la Figura 8. Los resultados indican que la mayor producción se presentó cuando la arúgula se sembró a una densidad de 400 g/m² y con la intensidad de luz producida por 6 y 2 lámparas LED por nivel, similar a lo observado con amaranto (Figura 4). Sin embargo, el peso fresco disminuyó significativamente cuando la densidad de siembra fue de 130 y 260 g/m². Cuando se emplearon 4 lámparas LED también se obtuvo un aumento en el rendimiento en peso fresco de arúgula con densidad de 400 g/m² y disminuyó cuando se sembró a 260 g/m², mientras que la menor producción fue cuando se sembró a 130 g/m².



Figura 7. Fotografía de producción de microgreens de arúgula.

El empleo de 4 lámparas LED para producir microgreens de arúgula también dio buenos resultados con la dosis de siembra de 400 g/m², pero disminuyó en un 55% aproximadamente con las densidades de 130 y 260 g/m² (Figura 6).

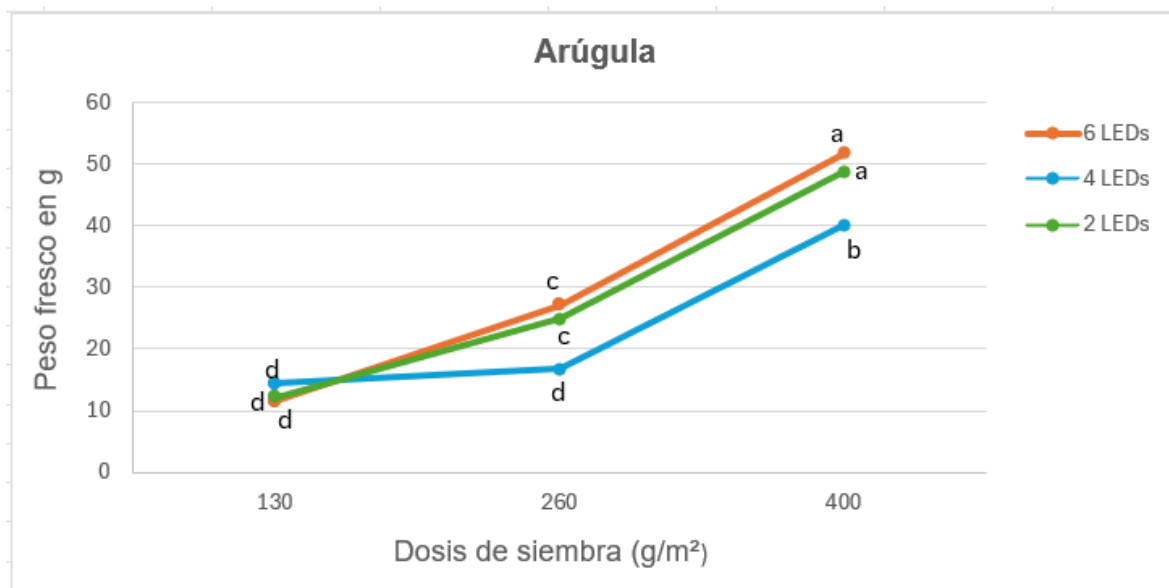


Figura 8. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de arúgula. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

El crecimiento en altura se muestra en la Figura 9. Los resultados indican que la mayor altura se presentó cuando la arúgula se sembró a una densidad de 400 g/m². y con la intensidad de luz producida por 2 lámparas LED por nivel y cuando se sembró con una densidad de 260 g/m², la altura tuvo una disminución no significativa; en contraste, con una dosis de siembra de 130 g/m², la altura fue afectada significativamente. Cuando se emplearon 6 lámparas LED, el comportamiento del crecimiento en altura fue de tendencia similar al obtenido con 2 lámparas LED, pero con menor altura, disminuyendo significativamente cuando se sembró a una densidad de 130 g/m², siendo este el menor rendimiento en altura de microgreens de arúgula. Con el empleo de 4 lámparas LED, el crecimiento en altura tuvo un crecimiento variable, teniendo mejor resultado con una densidad de

siembra de 400 y 130 g/m², disminuyendo la altura cuando se sembró a una densidad de 260 g/m².

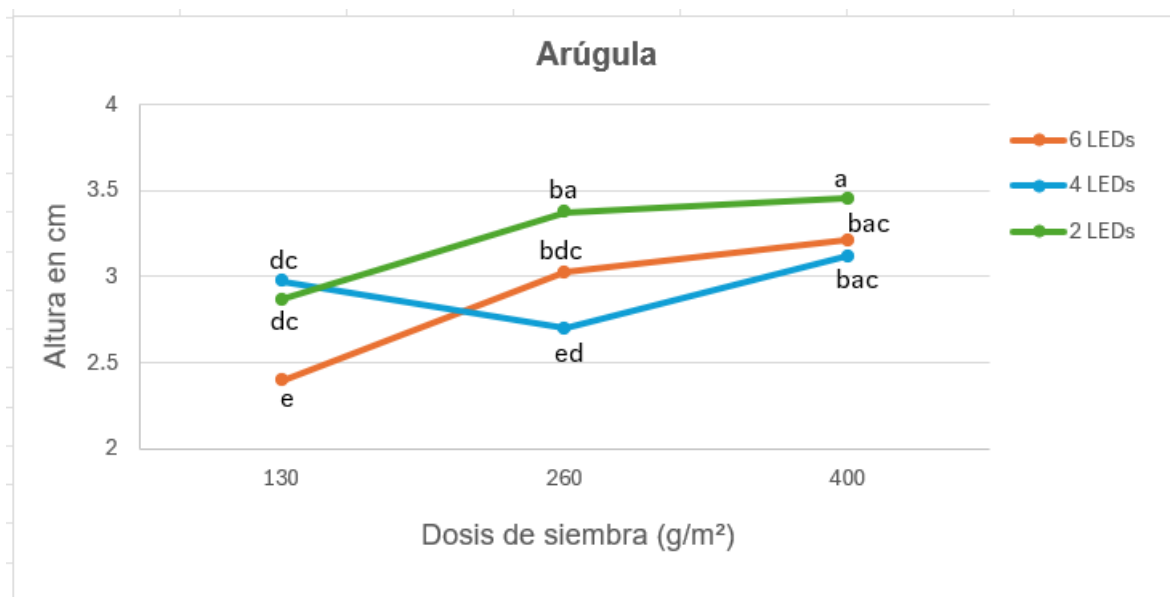


Figura 9. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de arúgula. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

Los resultados sugieren que la dosis de siembra interactuó con el número de lámparas LED utilizadas, ya que con una alta densidad de siembra se obtuvo una mayor biomasa y altura de microgreens de arúgula, en el caso de la biomasa con 2 y 6 lámparas, mientras que la altura con solo 2 lámparas, de tal forma que para arúgula se recomienda utilizar solo 2 lámparas LED en combinación con una dosis de siembra de 400 g/m² para obtener la mayor biomasa y altura de microgreens. Estos resultados contrastan con los observados en amaranto, ya que esta especie se recomiendan también 2 lámparas LED, pero con una dosis de siembra de 260 g/m². Los resultados del presente estudio concuerdan con los reportados por Kong et al. (2023), quienes sugieren que todos los rasgos relevantes para el tamaño de la planta se vieron afectados por el tratamiento de luz. En un estudio realizado por Vatistas et al. (2026) muestran que, para la arúgula, bajo el fotoperiodo de 8 horas,

los espectros UV y verde se asociaron con la mayor elongación del brote, con longitudes medias de 31.5 mm y 31.4 mm, respectivamente, el cual se asemeja a los datos del presente estudio ya que se manejaron las mismas horas luz y se obtienen longitudes similares. Sin embargo, otros autores, como Pennisi et al. (2020), en estudios con el cultivo de rúcula en ambientes controlados, recomiendan parámetros como un fotoperiodo de 16 horas y un DLI de $14 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Rezai et al. (2018) también concuerdan que una intensidad luminosa adecuada favorece la fotosíntesis en las hojas de arúgula, lo que resulta en una mayor acumulación de compuestos fotosintéticos. En los parámetros evaluados en este estudio muestra que, para los microgreens de arúgula, a mayor intensidad de luz LED si se favoreció el peso fresco, pero no la altura, donde la menor intensidad de luz fue la óptima para mejores resultados.

4.3. Brócoli

En los microgreens de brocolí (Figura 10), el rendimiento en peso fresco en brócoli se muestra en la Figura 11. Los resultados indican que la producción de biomasa se incrementó al ir aumentando de densidad de siembra, obteniéndose el mayor rendimiento cuando el brócoli se sembró a una densidad de 500 g/m^2 y con la intensidad de luz producida por 2 lámparas LED por nivel. Cuando se emplearon 4 lámparas LED también tuvo buen resultado con la densidad de 500 g/m^2 y disminuyó la producción con las densidades 260 y 400 g/m^2 . El empleo de 6 lámparas LED dio buenos resultados de rendimiento en peso fresco, pero solo con dosis de siembra de 400 y 500 g, pero sin superar al obtenido con 2 y 4 LED al manejarse con 6 lámparas.

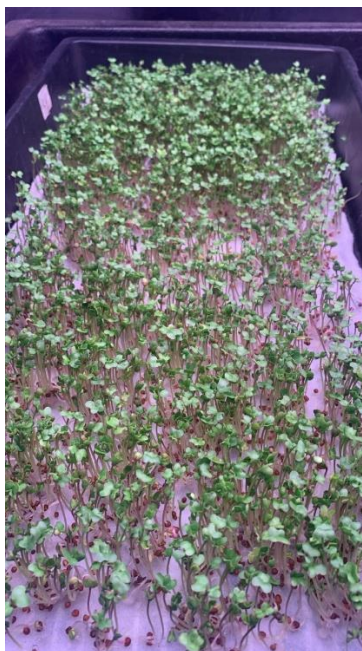


Figura 10. Fotografía de producción de microgreens de brócoli.

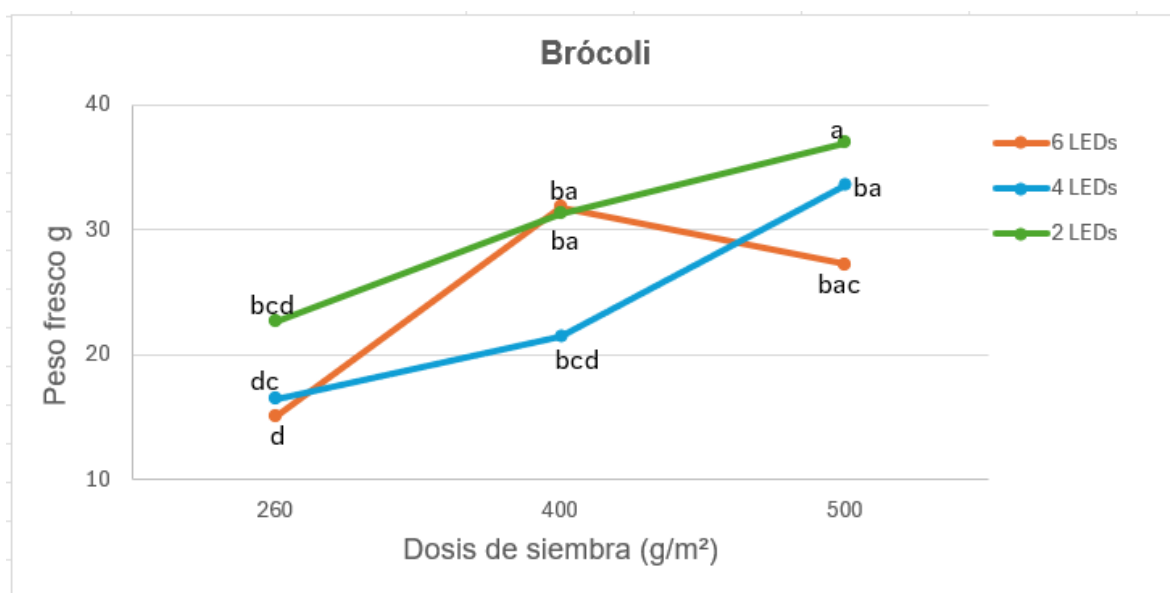


Figura 11. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de brócoli. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

El crecimiento en altura se muestra en la Figura 12. Los resultados indican que la mayor altura se presentó cuando el brócoli se sembró a una densidad de 500 y 260 g/m² con la intensidad de luz producida por 2 lámparas LED por nivel; cuando se sembró con una densidad de 400 g/m², la altura fue menor, aproximadamente 1 cm de diferencia. Con el empleo de 6 lámparas LED, la mayor altura se obtuvo con la densidad de 400 y 260 g/m², disminuyendo significativamente cuando se sembró con una densidad de 500 g/m², siendo el resultado menos favorable en cuanto a la altura de microgreens de brócoli. Cuando se utilizaron 4 lámparas LED, el comportamiento de la altura fue similar teniendo solo unos milímetros de diferencia entre las tres densidades de siembra, obteniendo alturas no tan buenos resultados.

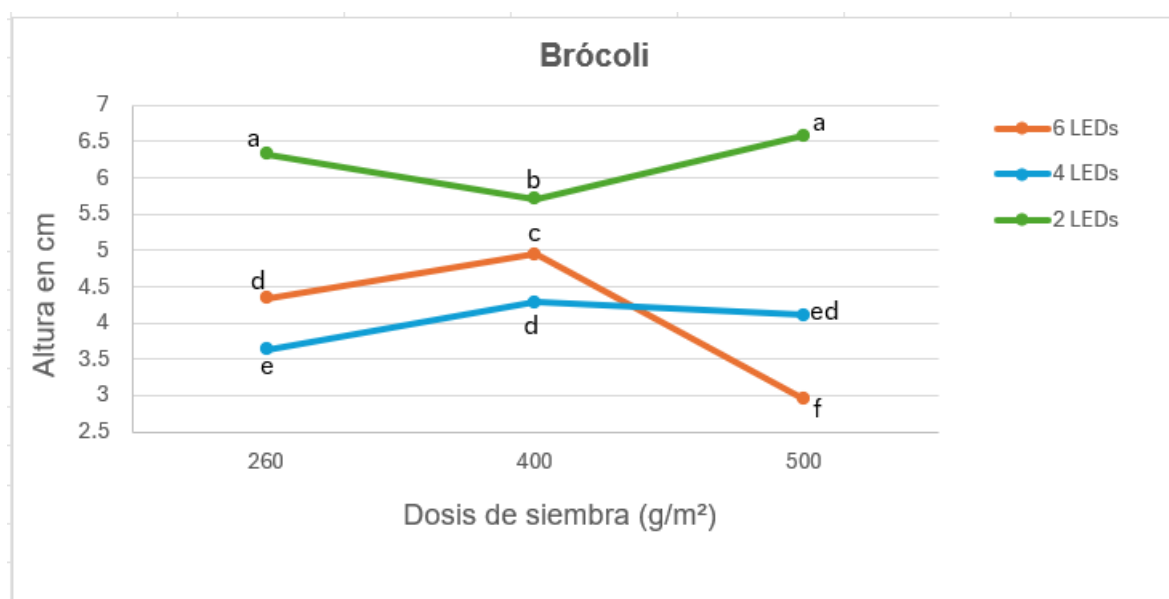


Figura 12. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de brócoli. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

Los resultados sugieren que las dosis de siembra interactúan con el número de LED empleadas, ya que a medida que aumenta la densidad de siembra, incrementa el peso fresco, cuando se emplean 2 y 4 lámparas LED, mientras que la altura dependió más del número de lámparas ya que esta es mayor cuando se emplean 2 lámparas LED. En este estudio sugiere que para tener mejor rendimiento en peso

fresco y mayor altura, se recomienda emplear 2 lámparas LED con una dosis de siembra de 500 g/m², lo cual es comparable a lo observado con amaranto ya que en ese caso el mejor rendimiento y altura de los microgreens se observaron también con 2 lámparas LED y utilizando la dosis de siembra alta (Figura 5y 6). Nuestros resultados coinciden con lo reportado por Kyriacou et al. (2016) y Gerovac et al. (2016), quienes destacan que tanto la densidad de siembra como la calidad/intensidad de la luz LED son factores determinantes en la productividad y calidad nutricional de los microgreens de Brassicaceae. Kyriacou et al. (2016) también señalan que al aumentar la densidad de siembra se incrementa el peso fresco total, debido a la mayor cantidad de plántulas por unidad de superficie. Sin embargo, esta estrategia genera competencia por luz, agua y nutrientes, lo que reduce el peso fresco individual y puede afectar la uniformidad del cultivo. Zhang et al. (2020), demostraron que la luz roja promovió mayor elongación y biomasa en microgreens de brócoli, mientras que la luz azul redujo la altura, pero mejoró la acumulación de compuestos bioactivos; de igual forma, Demir et al. (2023) confirmaron que la luz roja y blanca favorecen el peso fresco y seco, mostrando que estos espectros son más eficientes para maximizar rendimiento comercial. Ambos estudios sugieren que elegir la luz adecuada para la producción de microgreens es fundamental dependiendo el objetivo deseado. Además, Di Gioia et al. (2017) señalan que la densidad de siembra regula tanto el rendimiento como la calidad morfológica y nutricional de los microgreens, destacando que densidades moderadas permiten un equilibrio entre biomasa y calidad funcional, también destacan el potencial de los microgreens como estrategia sostenible y de alto valor agregado, con ciclos cortos y bajo consumo de recursos, especialmente en sistemas urbanos o verticales.

4.4. Alfalfa

En los microgreens de alfalfa (Figura 13), el rendimiento en peso fresco en alfalfa se muestra en la Figura 14. Los resultados indican que la mayor producción se presentó cuando la alfalfa se sembró a una densidad de 200 a 400 g/m² y con la intensidad de luz producida por 4 lámparas LED, disminuyendo significativamente cuando se sembró a una dosis de 500 g/m². El empleo de 6 lámparas LED tuvo rendimiento similar entre las tres densidades de siembra. El menor rendimiento se obtuvo con el empleo de 2 lámparas LED, disminuyendo la producción significativamente cuando se sembró la densidad de 500 g/m².



Figura 13. Fotografía de producción de microgreens de alfalfa.

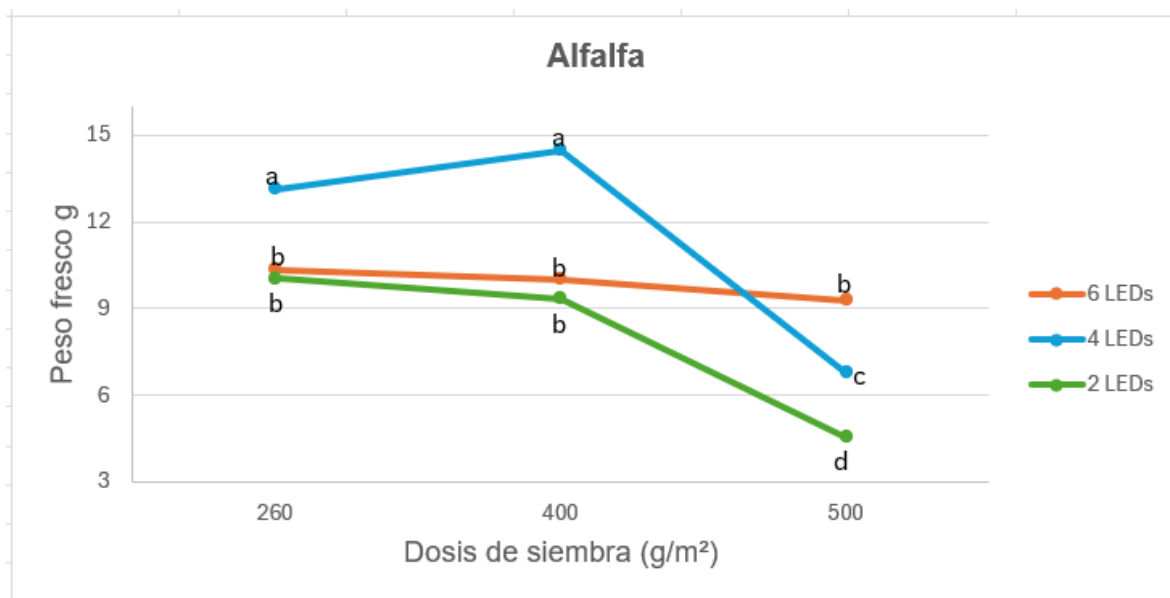


Figura 14. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en el peso fresco de microgreens de alfalfa. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

El crecimiento en altura se muestra en la Figura 15. Los resultados indican que la mayor altura se presentó cuando el brócoli se sembró a una densidad de 260 g/m² con la intensidad de luz producida por 4 lámparas LED por nivel, disminuyendo cuando se sembró con una densidad de 400 y 500 g/m². El empleo de 2 lámparas LED, con la dosis de siembra de 400 g/m², tuvo una diferencia mínima en altura en comparación a la altura mayor. Con el empleo de 6 lámparas LED, el crecimiento en altura fue similar entre las tres densidades de siembra (260, 400 y 500 g/m²). Con el empleo de 2 lámparas LED, cuando se sembró una densidad de 400 g/m² la altura fue la más próxima a la mayor altura que se obtuvo en microgreens de alfalfa, disminuyendo significativamente con las dosis de siembra de 260 y 500 g/m², siendo el resultado menos favorable de la altura.

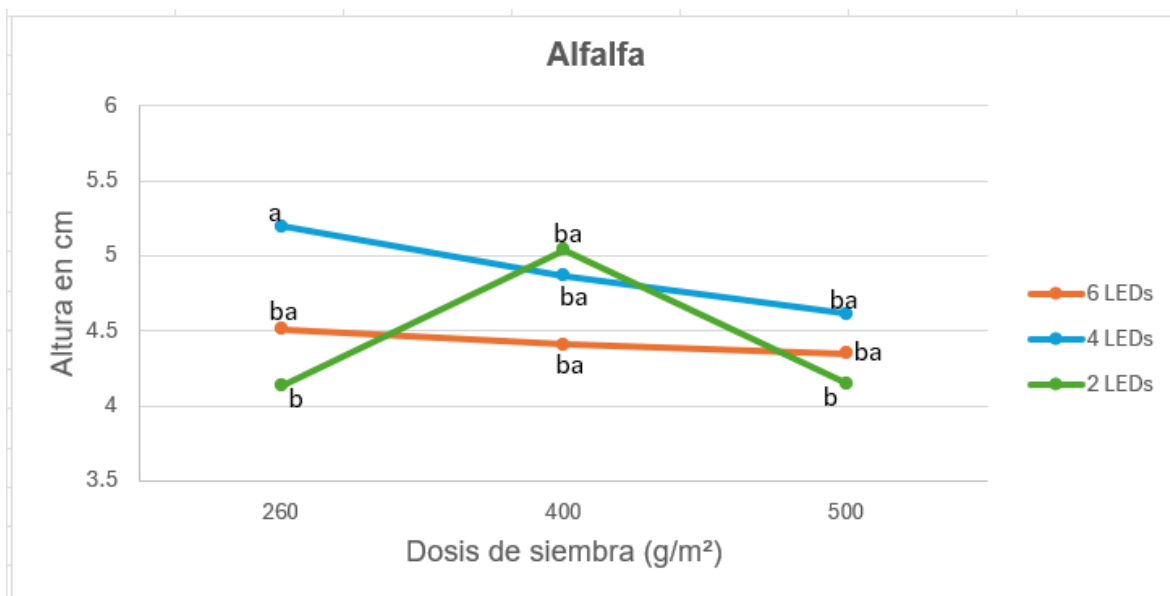


Figura 15. Efecto de la interacción entre la intensidad de la radiación obtenida mediante el uso de diferente número de lámparas LED y la dosis de siembra en la altura de microgreens de alfalfa. Promedios con diferente letra indica diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

Los resultados sugieren que la intensidad de luz empleada interactúa con las dosis de siembra, siendo 260 y 400 g/m² la dosis de siembra óptimo para el aumento en el peso fresco mientras que para la altura 260 g/m², con el empleo de 4 lámparas LED para ambos factores, lo que indica que a mayor densidad de siembra el rendimiento disminuye en relación a todas las especies evaluadas en el presente estudio, los resultados indican que alfalfa fue la que mayor intensidad de iluminación requiere para obtener una mayor producción, ya que, en brócoli, amaranto y arúgula, con 2 lámparas LED fue suficiente. Sin embargo, en cuanto a la dosis de siembra optima esta fue de 260 g/m², por lo que es similar a la observada en brócoli.

Este estudio muestra que, la mejor producción de microgreens de alfalfa se obtiene de un balance entre densidad de siembra y número de lámparas LED. Moderar las densidades e intensidades de luz LED, maximizan un rendimiento optimo en peso fresco y altura, mientras que densidades excesivas o luz insuficiente o muy alta, reducen el rendimiento. Esto se asemeja a los resultados obtenidos de un estudio realizado por Alrifai et al. (2019), quienes encontraron que intensidades moderadas

de LED favorecen elongación y biomasa, mientras que intensidades bajas limitan crecimiento. Existe poca información sobre producción de microgreens de alfalfa en ambientes controlados, bajo luz LED, aunque los resultados obtenidos tienen similitudes con la producción de otras especies, tal es el caso de Kyriacou et al. (2016), quienes señalaron que densidades moderadas equilibran rendimiento y calidad nutricional en microgreens de brócoli, rúcula y otras especies. Lanoue et al. (2022), confirma que la luz LED no solo incrementa biomasa, sino que también puede mejorar calidad funcional, como el contenido nutricional, lo cual es relevante para alfalfa como microgreens; por su alto contenido de vitaminas, minerales y compuestos bioactivos (Galieni et al., 2020). Esto también coincide con Dubey et al. (2026), en su estudio sobre rúcula y berro, la densidad moderada optimizó biomasa y redujo riesgos microbiológicos, mientras que la luz blanca suplementada con UV-A incrementó carotenoides. Esto sugiere que la densidad intermedia favorece tanto rendimiento como calidad funcional. Lanoue et al. (2022), aseguran que la iluminación LED mejoró rendimiento y mantuvo o aumentó el contenido nutricional en microgreens.

RESPUESTAS GENERALES

En la producción de microgreens se pretende un beneficio económico mediante un balance entre la producción de biomasa de las especies cultivadas y el costo que implica la iluminación artificial y el costo de la semilla. En este balance participan respuestas de las plantas a él espectro luminoso así como a la duración del día, mientras que la densidad de siembra implica el número de plantas que se estarán desarrollando en un espacio determinado. La competencia entre las plantas por luz implica que estas van a tener que evitar el sombreado producido por una intensidad de luz definida por el número de lámparas y la densidad de población de plantas que van a competir por ella. Según Franklin (2008), la evitación de sombra es una estrategia adaptativa clave que permite a las plantas competir por la luz en ambientes densos. El mecanismo central es la percepción de una disminución en la proporción de luz roja/rojo lejano, detectada por los fitocromos, que actúa como regulador principal de la elongación en condiciones de baja en relación entre luz

roja (R, ~660 nm) y luz rojo-lejana (FR, ~730 nm) en el espectro lumínico que perciben las plantas.

Cuando las plantas perciben sombra, se desencadena el llamado síndrome de evitación de sombra, caracterizado por elongación rápida de tallos y pecíolos, y la hiponastia foliar (orientación hacia arriba de las hojas), reducción del área foliar y aceleración de la floración (Smith & Whitelam, 1997; Franklin & Whitelam, 2005). Asimismo, se ha demostrado que la sombra interactúa con señales de auxinas, etileno y temperatura, lo que convierte a la evitación de sombra en un fenómeno multifactorial (Pierik & de Wit, 2014). De igual forma, un estudio realizado por Han et al. (2024), destaca que las plantas no responden a la sombra de manera aislada, sino que integran señales lumínicas con otros factores ambientales como temperatura, salinidad, sequía y ataques de patógenos. Fernández-Milmanda & Ballaré (2021) mostraron que la sombra también afecta la defensa: bajo baja R:FR, las plantas priorizan elongación sobre resistencia. R:FR es la proporción de luz roja a rojo-lejana que las plantas usan como señal para detectar sombra y competencia.

El espectro LED rojo/rojo-lejano (R:FR) regula elongación y biomasa, como lo describieron Franklin & Whitelam (2005); del mismo modo, Franklin (2008) advierte que un exceso de elongación reduce calidad, lo que obliga a balancear densidad de siembra y espectro LED. Los estudios realizados por Urbonavičiūtė et al. (2008) sugieren que la capacidad de tallos y pecíolos para elongarse en respuesta a señales de proximidad de vegetación puede conferir una alta aptitud relativa en comunidades densas de plantas (Schmitt et al., 2003). Las diferencias en el espectro lumínico conducen a diferentes respuestas morfogénicas y fotosintéticas en cada especie vegetal (Urbonavičiūtė et al., 2008).

4.6. CONCLUSIONES

Para obtener la mayor producción de biomasa y altura en microgreens en arúgula, se recomiendan utilizar 2 lámparas LED y una dosis de siembra de 400 g/m². En el caso de amaranto, la recomendación es utilizar solamente 2 lámparas LED mientras que la densidad de siembra debe ser de 260 g/m²; similarmente, en brócoli, también se recomiendan solo 2 lámparas LED, pero en contraste, requiere una alta densidad de siembra pues el mayor rendimiento y altura de microgreens se obtuvo con 500 g/m². Alfalfa es la especie que mayor iluminación requiere ya que la mayor producción se obtiene con 4 lámparas LED, aunque su densidad de siembra es baja, pues el mayor rendimiento y altura se obtiene con 260 g/m².

5. LITERATURA CITADA

- Ames, B. N., Shigenaga, M. K., & Hagen, T. M. (1993). Oxidants, antioxidants, and the degenerative diseases of aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(17), 7915–7922.
- Ahmad, P., Wani, M. R., & Azooz, M. M. (2016). Role of microgreens in nutrition and stress tolerance: A review. *Plant Physiology Reports / Journal sources on microgreens physiology*.
- Avgoustaki, Despina D., & Xydis, George A. (2021). How energy innovation in indoor vertical farming can improve food security and sustainability. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 651–666.
- Alrifai, O., Hao, X., & Marcone, M. F. (2019). Effect of different light intensities on agronomic traits of microgreens. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1500.
- Bantis, Fotis, Smirnakou, S., Ouzounis, T., Koukounaras, A., & Radoglou, K. (2018). Current status and recent achievements in LED lighting for horticulture. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 59, 553–563.
- Basigalup, Diego H. (2007). El cultivo de la alfalfa en la Argentina. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria).
- Ballaré, Carlos L. (2014). Light regulation of plant defense. *Annual Review of Plant Biology*, 65, 335–363.
- Bell, L., & Wagstaff, C. (2014). Glucosinolates, myrosinase hydrolysis products, and flavonols found in rocket (*Eruca sativa* and *Diplotaxis tenuifolia*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(20), 4481–4492.
- Bourget, C. M. (2008). An introduction to light-emitting diodes. *HortScience*, 43(7), 1944–1946.
- Bouranis, D., El-Nakhel, C., Kyriacou, M. C., Colla, G., & Roupael, Y. (2023). Microgreens as sustainable nutrient-rich foods to address malnutrition and health invulnerable communities. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1156789.
- Brazaitytė, Asta, Viršilė, A., Sakalauskienė, S., et al. (2015). The effect of different LED lighting spectra on growth and phytochemical composition of microgreens. *Scientia Horticulturae*, 193, 283–290.
- Casierra-Posada, F., & Peña-Olmos, J. E. (2015). Crecimiento y desarrollo de plantas bajo diferentes condiciones de luz: revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(1), 125–135.

Castagnino, A., Marina, J., y Benvenuti, S. (2020). Microgreens and sprouts, two innovative functional foods for a healthy diet in Km 0 Microgreens y brotes, dos alimentos funcionales innovadores para una nutrición saludable, en el Km 0. *Revista de Horticultura*, 39(100), 38-50.

Conzatti, M. A., Basso, C., & Capelli, E. (2015). Sulforaphane and cancer prevention: Current evidence and mechanisms of action. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2015, 1–9.

Chiba, K. (2016). Vertical farming systems and multi-layer crop production. Documento técnico o capítulo sobre agricultura vertical.

De Wit, Maarten, Galvão, V. C., & Fankhauser, C. (2016). Light-mediated hormonal regulation of plant development. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 513–537.

Demir, K., Sarıkamış, G., y Seyrek, G. Ç. (2023). Effect of LED lights on the growth, nutritional quality and glucosinolate content of broccoli, cabbage and radish microgreens. *Food Chemistry*, 401, 134088.

D'Amico-Damião, V., & Carvalho, R. F. (2018). Photoreceptors and plant adaptation to environmental stresses. *Brazilian Journal of Botany / Plant physiology literature*.

Dias, G. M., Zistl, G., & Valdovinos, M. (2023). Microgreens production systems and sustainability: A review. *Horticulturae / Agronomy-related journals (MDPI)*.

Di Gioia, G., Renna, M., & Santamaria, P. (2017). Microgreens: Novel fresh and functional food to explore all the value of biodiversity. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 44.

Dou, Huimin, Niu, G., & Guo, D. (2017). Effects of red and blue light on plant growth and photosynthesis. *Horticulture Research / Plant Physiology-related journals*.

Dubey, S., Harbourne, N., Reilly, A., Hurley, D., & Elliott-Kingston, C. (2026). Microgreens: Optimising Seed Density and Exploring the Influence of White Light and White Light Supplemented with UV-A Radiation. *Plants*, 15(4), 635.

Ebert, Andreas W. (2022). Microgreens A popular functional food. *Scientia Horticulturae*, 291, 110–111.

Ebert, Andreas W. (2015). Sprouts and microgreens Novel food sources for healthy diets. *Horticulture / Acta Horticulturae and related publications*.

Epigmenio, Carlos A. (2013). *El cultivo del brócoli (Brassica oleracea L.)*. Manual técnico de horticultura.

Fahey, Jed W., Zhang, Y., & Talalay, P. (1997). Broccoli sprouts: An exceptionally rich source of inducers of enzymes that protect against chemical carcinogens. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(19), 10367–10372.

FAO/WHO (1973). Energy and protein requirements. FAO/WHO Expert Consultation Report

Finley, John W., Kong, A.-N. T., Hintze, K. J., Jeffery, E. H., Ji, L., & Lei, X. G. (2001). Antioxidants in foods and health effects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(5), 2662–2668.

Fernández-Milmanda, G. L., & Ballaré, C. L. (2021). Shade avoidance, jasmonate, and plant–insect interactions: a tale of hormonal crosstalk. *Trends in Plant Science*, 26(11), 1076–1086.

Franklin, K. A. (2008). Shade avoidance. *New Phytologist*, 179(4), 930–944.

Franklin, K. A. (2005). Light and plant development: Photoreceptors and signaling pathways. *Plant Physiology / Photobiology literature*.

Gengatharan, A., Dykes, G. A., & Choo, W. S. (2015). Nutritional and bioactive components of microgreens: A review. *Journal of Food Science*, 80(5), R1030–R1041.

Giordano, M., El-Nakhel, C., Caruso, G., Cozzolino, E., & Colla, G. (2023). Microgreens: Functional food to tackle global food insecurity. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1123456.

Gupta, S. D., & Jatothu, B. (2013). Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis. *Plant Biotechnology Reports*, 7(3), 211–220.

Gusto Buen Vivir. (2012, 10 de octubre). Todo lo que necesitas saber de microgreens.

Han, Jiyeon, & Row, K. H. (2006). *Bioactive compounds in Brassica vegetables*. *Food Chemistry*, 95(3), 351–357.

Hodges, Donald M., & Toivonen, Peter M. A. (2008). Metabolism and storage quality of fresh-cut vegetables and fruits. In O. Lamikanra (Ed.), *Fresh-cut fruits and vegetables: Science, technology, and market* (pp. 1–22).

Hogewoning, S. W., et al. (2010). Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under LED lighting. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3107–3117.

Ilahy, Riadh, Tlili, I., Piro, G., Hdider, C., & Lenucci, M. S. (2020). Bioactive compounds in Brassica vegetables and their health benefits. *Food Chemistry*, 318, 126521.

Jasper et al. (2020): sí corresponde a literatura reciente sobre producción de arúgula, pero la cita debe verificarse porque existen varias versiones similares.

Juncafresca, M. (1983). Nutrición mineral de la alfalfa. Publicación técnica agronómica

Galieni, Angelica, Falcinelli, Beatrice, Stagnari, Fabio, Datti, Alessandro, & Benincasa, Paolo (2020). Sprouts and microgreens: Trends, opportunities, and horizons for novel research. *Agronomy*, 10(9), 1424.

Kabir, M. H., Ra, S. H., & Kim, W. H. (2023). Vertical farming as a sustainable solution to global food security challenges: A review. *Sustainability*, 15, 1–22.

Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2017). Opportunities and challenges of vertical farming in Malaysia. *Journal of Agricultural Engineering*, 48(2), 47–56.

Kalantari, Farshid, Tahir, O. M., & Joni, R. A. (2017). A review of vertical farming technology: A guide for implementation of building integrated agriculture in cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 88–100.

Kou, L., Yang, T., Luo, Y., Liu, X., Huang, L., y Codling, E. (2014). La aplicación de calcio antes de la cosecha aumenta la biomasa y retrasa la senescencia de los microbrotes del brócoli. *Biología y tecnología poscosecha*, 87, 70-78.

Kong, Y., Masabni, J., & Niu, G. (2023). Efecto de la variación de temperatura y los LEDs azules y rojos sobre la elongación de la rúcula y los microverdes mostaza. *Horticulturae*, 9(5), 608.

Koppert Cress. (2016). *Cresspedia: The encyclopedia of cresses and microgreens*. Koppert Cress

Kumar, S., Singh, R., & Patel, A. (2023). Challenges and opportunities in vertical farming systems: Economic and technical perspectives. *Agricultural Systems / Sustainability journals*.

Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Pannico, A., Graziani, G., Soteriou, G. A., Giordano, M., Ritieni, A., De Pascale, S., & Rouphael, Y. (2016). Microgreens as

a novel functional food: Nutritional aspects and applications. *Frontiers in Plant Science*, 7, 907.

Kyriacou, M. C., Rouphael, Y., Di Gioia, G., Kyratzis, A., Serio, D., Renna, M., De Pascale, S., & Santamaria, P. (2016). Microgreens as a novel functional food: Nutritional aspects and production technology. *Frontiers in Plant Science*, 7, 926.

Kyriacou, Marios C., Rouphael, Y., Kyriacou, M. C., & otros autores. (2016). *Microgreens: A new trend in horticulture and functional food*. *Scientia Horticulturae*, 216, 126–138.

Kou, Yubo, Lu, C., & Yang, H. (2014). Postharvest biology and technology of fresh-cut vegetables: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 98, 1-10.

Ku, K. M., Jeffery, E. H., Kang, Y. H., & Juvik, J. A. (2016). Profiles of glucosinolates, their hydrolysis products, and quinone reductase inducing activity from arugula (*Eruca sativa* Mill.) accessions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(34), 6524–6532.

Lanoue, J., St. Louis, S., Little, C., & 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.

Lester, G. E., Makus, D. J., & Hodges, D. M. (2010). Relationship between fresh-market spinach leaves and nutrient composition: Vitamin C, folate, vitamin K1, and carotenoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(9), 5301–5307.

Liu, Jun, & van Iersel, M. W. (2021). Photosynthetic physiology of blue, green, and red light: Light intensity effects and underlying mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 12, 619987.

Lubna, N., Ahmed, S., & Khan, M. (2022). Economic and environmental constraints of indoor vertical farming. *Journal of Cleaner Production / Sustainability-related journals*.

Martín, J. (2017). Brotes y microgreens: alimentos funcionales para la salud humana. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 21(4), 233–240.

Martínez, L. (2019). Anemia ferropénica: causas, diagnóstico y estrategias de prevención en población vulnerable. *Revista de Salud Pública*, 21(3), 45 - 58. Universidad Nacional de Colombia.

Martínez, J. A. (2004). Producción de brócoli en sistemas convencionales y protegidos. *Manual técnico agrícola*.

Martínez-López, M., Pérez, G., & otros autores. (2020). Amaranth grain: nutritional value and health benefits. *Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 1–12.

Mapes-Sánchez, J. (2015). El amaranto: historia, nutrición y uso alimentario. Documento académico o capítulo sobre *Amaranthus*.

Mawphlang, O. I., & Kharshiing, E. V. (2017). Photoreceptors and plant responses to light. *Plant Signaling & Behavior*, 12(3), e1346790.

Mewis, Isabell, Schreiner, M., Nguyen, C., Krumbein, A., & Ulrich, D. (2012). Accumulation of health-promoting compounds in broccoli microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(28), 6805–6813.

Meas, D., Heuvelink, E., & otros autores. (2020). Microgreens as an alternative production system under stress conditions. *Scientia Horticulturae / HortScience* (artículos sobre producción de microgreens).

Ministerio de Salud de la Nación. (2016). Guía de práctica clínica para la prevención, diagnóstico y tratamiento de la anemia por deficiencia de hierro en mujeres en edad fértil y embarazadas. Buenos Aires: Ministerio de Salud de la Nación.

Mir, Shabir Ahmad, Shah, M. A., Mir, M. M., & Dar, B. N. (2017). Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2730–2736.

Menegaes, J. F., Souza, R. J., & Almeida, A. C. (2015). Produção de rúcula (*Eruca sativa*) no Brasil: aspectos agrônômicos e de mercado. *Revista Brasileira de Horticultura*, 33(1), 45–52.

Montoya, A. P., Forero, A. F., & Cárdenas-Hernández, J. F. (2018). Efecto de la calidad de luz sobre el crecimiento y productividad de cultivos hortícolas en ambientes protegidos. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 495–505.

Morrow, R. C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43(7), 1947–1950.

Muslera, E., & Ratera, C. (1991). Praderas y forrajes: Producción y aprovechamiento. Ediciones Mundi-Prensa.

Nájera, Cinthia, Ros, M., Moreno, D. A., & Hernández-Lara, A. (2024). Combined effect of an agroindustrial compost and light spectra composition on yield and phytochemical profile in mizuna and pak choi microgreens. *Heliyon*, 10(4), e26390.

- Orona-Tamayo, D., Paredes-López, O., & Valverde, M. E. (2019). Amaranth as a functional food and future superfood. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(3), 1–10.
- Paradiso, V. M., Castellino, M., Renna, M., Santamaria, P., & Caponio, F. (2020). Setup of an Extraction Method for the Analysis of Carotenoids in Microgreens. *Foods*, 9(4), 459.
- Paraschivu, M., Cotuna, O., Sărățeanu, V., Durău, C. C., & Păunescu, R. A. (2021). Microgreens – Current status, global market trends and forward statements. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 21(3), 633–640.
- Pierik, R., & de Wit, M. (2014). Shade avoidance: phytochrome signalling and beyond. *Current Opinion in Plant Biology*, 20, 1–7.
- Pérez, L. A. (2022). Producción sostenible de hortalizas de hoja: el caso de la arúgula. Documento técnico o artículo académico.
- Ramírez, D. A., Morales, J., & Pérez, L. (2020). Secondary metabolites in *Brassicaceae*: *Polyphenols* and their antioxidant capacity. *Journal of Plant Biochemistry and Physiology*, 8(2), 45–53.
- Romero Rodríguez, J. M., & Tafur Ruge, A. (2018). Microgreens: Una alternativa sostenible para la seguridad alimentaria y nutricional. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 112–120.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7.^a ed.). Hydroponic Food Production
- Saavedra, M. J., Fernandes, C., & Carvalho, A. (2015). Nutritional and phytochemical characterization of watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.) and its potential health benefits. *Food Chemistry*, 183, 56–64.
- Sauer, Jonathan D. (1950). The grain amaranths: A survey of their history and classification. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 37(1), 1–51.
- Shapiro, T. A., Fahey, J. W., Wade, K. L., Stephenson, K. K., & Talalay, P. (2001). Chemoprotective glucosinolates and isothiocyanates of broccoli sprouts. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 10(5), 501–508.

- Schmitt, J., McCormac, A. C., & Smith, H. (2003). A test of the adaptive plasticity hypothesis by phytochrome-mediated shade-avoidance responses in *Arabidopsis thaliana*. *Oecologia*, 136(4), 606–617.
- Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., & Bernhard, J. (2015). LEDs for energy-efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 220–231.
- Smith, H., & Whitelam, G. C. (1997). The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, Cell & Environment*, 20(6), 840–844.
- Stetter, Markus G., & Schmid, K. J. (2017). Analysis of population structure and genetic diversity in *Amaranthus* species reveals centers of domestication. *Molecular Ecology*, 26(1), 123–135.
- Tan, Liang, Nettleton, D., & otros autores. (2020). Microgreens as a functional food: Production, nutritional value, and growing practices. *Horticulturae*, 6(4), 1 - 18.
- Tamulaitis, Gediminas, Duchovskis, P., Bliznikas, Z., et al. (2005). High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(17), 3180–3185.
- Tapia, Mario E. (1997). Cultivos andinos subutilizados y su valor nutritivo. FAO.
- Toscano, S., Ferrante, A., Romano, D., & Tribulato, A. (2021). Growth, physiological response and quality traits of microgreens grown under different light spectra. *Agronomy*, 11(10), 2093.
- Treadwell, D. D., Hochmuth, R., Landrum, L., & Laughlin, W. (2010). Microgreens: A new specialty crop. *EDIS*, 2010(3), HS1164. University of Florida IFAS Extension.
- United Nations. (2022). Transforming food systems for sustainable development. New York: United Nations.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2014). Microgreens: Novel, fresh, and functional food. *Agricultural Research Magazine*, 62(5), 16–17. Washington, DC: USDA.
- Urbonavičiūtė, A., Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Duchovskis, P., & Žukauskas, A. (2008). The effect of different light quality on morphogenesis and photosynthesis of cucumber. *Biologija*, 54(3), 145–148.

Vaštakaitė, Violeta, et al. (2015). Light-emitting diode illumination effects on growth and phytochemical composition of microgreens. *Scientia Horticulturae*, 194, 88–94.

Wojciechowska, Roksana, Dzieciol, M., & Zawadzka, M. (2020). Controlled environment production of Brassica vegetables. *Horticultural Science*, 47(2), 89–97.

Xiao, Z., Lester, G. E., Luo, Y., & Wang, Q. (2012). Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(31), 7644–7651.

Xiao, Zhenlei, & Lester, G. E. (2016–2020). Microgreens production in controlled environments and phytochemical enrichment. *Postharvest Biology and Technology / Scientia Horticulturae*.

Xu, H. L., Xu, Q., Li, F., Feng, Y., Qin, F., & Fang, W. (2012). Applications of xerophytophysiology in plant production under artificial lighting. *Acta Horticulturae*, 956, 59–66.

Zobayed, S. M. A., Afreen, F., & Kozai, T. (2005). Necessity and production of medicinal plants under controlled environments. *Environmental Control in Biology*, 43(4), 243–252.

Zhang, T., Shi, Y., Piao, F., & Sun, Z. (2020). Effects of different LED light spectra on the growth and nutritional quality of broccoli microgreens. *Scientia Horticulturae*, 264, 109187.

Zhang, Y., Xiao, Z., & Lester, G. E. (2020). Effect of controlled environment on broccoli growth and phytochemicals. *Postharvest Biology and Technology*, 159, 111–120.

Zhang, X., Li, Y., Sun, J., & Wang, Q. (2021). Indoor vertical farming of microgreens: Sustainable production for urban food security. *Sustainability*, 13(4), 2156.