

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA**

**EVALUACIÓN DEL FOTOPERIODO SOBRE EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE  
LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADA EN SISTEMA HIDROPÓNICO**

**POR:**

**MELVIN ENRIQUE GIRON AGUILAR**

**TESIS**



**CATACAMAS**

**OLANCHO**

**DICIEMBRE, 2024**

**EVALUACIÓN DEL FOTOPERIODO SOBRE EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE  
LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADA EN SISTEMA HIDROPÓNICO**

**POR:**

**MELVIN ENRIQUE GIRON AGUILAR**

**CARLOS ORLANDO INESTROZA LIZARDO, Ph.D.**

**Asesor Principal**

**PROYECTO DE TESIS**

**PRESENTADO A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA COMO  
REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN TECNOLOGÍA ALIMENTARIA**

**CATACAMAS**

**OLANCHO**

**DICIEMBRE, 2024**

## CONTENIDO

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CONTENIDO.....                                                                              | 1  |
| LISTA DE TABLAS .....                                                                       | 3  |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                      | 4  |
| LISTA DE ANEXOS .....                                                                       | 5  |
| RESUMEN.....                                                                                | 6  |
| I. INTRODUCCIÓN .....                                                                       | 7  |
| II. OBJETIVOS.....                                                                          | 8  |
| 2.1. Objetivo General.....                                                                  | 8  |
| 2.2. Objetivos Específicos .....                                                            | 8  |
| III. REVISIÓN DE LITERATURA.....                                                            | 9  |
| 3.1. Desafíos en la gestión de la iluminación y el ambiente en la producción agrícola ..... | 9  |
| 3.2. Tecnologías de producción en ambientes controlados (AAC) .....                         | 10 |
| 3.2. Utilización de la hidroponía para cultivos de lechuga .....                            | 11 |
| 3.2. La Lechuga como cultivo clave en hidroponía .....                                      | 12 |
| 3.3. Composición nutricional y metabolitos secundarios de la lechuga .....                  | 12 |
| 3.4. Impacto de la luz en la calidad nutricional y crecimiento vegetal.....                 | 13 |
| 3.4.1. Fotoperiodo y su influencia en el desarrollo vegetal.....                            | 14 |
| 3.4.2. Intensidad lumínica en el crecimiento vegetal .....                                  | 15 |
| IV. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                              | 17 |
| 4.1 Lugar de Investigación.....                                                             | 17 |
| 4.2 Material biológico.....                                                                 | 17 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Diseño experimental implementado .....                              | 18 |
| 4.3 Metodología de investigación .....                              | 19 |
| 4.3.1 Fase I: Ajuste de condiciones de cultivo .....                | 19 |
| 4.3.2 Fase II: Cultivo y cosecha de las variedades de lechuga ..... | 20 |
| 4.3.3 Fase III: Evaluaciones físicas .....                          | 23 |
| 4.3.4 Fase IV: Evaluaciones químicas.....                           | 25 |
| 4.3.5 Diseño experimental y análisis de datos .....                 | 29 |
| V. Resultados y Discusión .....                                     | 30 |
| 5.1 Evaluaciones físicas de ambas variedades de lechuga.....        | 30 |
| 5.1.1 Contenido de materia seca de Carmoli y Levistro.....          | 30 |
| 5.1.2 Área foliar.....                                              | 32 |
| 5.1.3 Capacidad de Retención de Agua (CRA %).....                   | 34 |
| 5.1.4 Color .....                                                   | 36 |
| 5.2 Evaluaciones químicas de ambas variedades de lechuga .....      | 39 |
| 5.2.1 Capacidad Antioxidante (Método DPPH y FRAP) .....             | 39 |
| 5.2.2 Contenido de flavonoides totales.....                         | 41 |
| VI. CONCLUSIONES .....                                              | 44 |
| VII. RECOMENDACIONES .....                                          | 45 |
| VIII. ....BIBLIOGRAFÍA                                              |    |
| 46                                                                  |    |
| ANEXOS.....                                                         | 54 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Condiciones experimentales de fotoperiodo y variedades de lechuga en sistema hidropónico.....                                                   | 18 |
| <b>Tabla 2.</b> Composición de la solución nutritiva utilizada en el sistema hidropónico.....                                                                   | 22 |
| <b>Tabla 3.</b> Efecto del fotoperiodo sobre el color ( $L^*$ , $C^*$ y hue) en las variedades de lechuga Levistro y Carmoli durante el periodo de cultivo..... | 37 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Variedades de lechuga utilizadas.....                                                                                                                                          | 17 |
| <b>Figura 2.</b> Etapas de la investigación.....                                                                                                                                                | 19 |
| <b>Figura 3.</b> Trasplante de las variedades Carmoli y Levistro a sistema hidropónico. ....                                                                                                    | 21 |
| <b>Figura 4.</b> Verificación del nivel de la solución nutritiva en las bandejas hidropónicas.....                                                                                              | 22 |
| <b>Figura 5.</b> Preparación de muestras para análisis químicos. ....                                                                                                                           | 23 |
| <b>Figura 7.</b> Muestras para análisis de Antioxidantes y Flavonoides. ....                                                                                                                    | 26 |
| <b>Figura 8.</b> Curva de calibración preparada con Trolox. ....                                                                                                                                | 27 |
| <b>Figura 9.</b> Curva de calibración preparada con Rutina. ....                                                                                                                                | 28 |
| <b>Figura 10.</b> Efecto del fotoperiodo sobre el contenido de materia seca (%) en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).....                                                    | 31 |
| <b>Figura 11.</b> Efecto del fotoperiodo sobre el área foliar (cm <sup>2</sup> ) en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).....                                                   | 33 |
| <b>Figura 12.</b> Efecto del fotoperiodo sobre el contenido relativo de agua (CRA %) en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).....                                               | 35 |
| <b>Figura 13.</b> Efecto del fotoperiodo sobre la capacidad antioxidante mediante los métodos DPPH (A y B) y FRAP (C y D) en las variedades de lechuga Carmoli (A y C) y Levistro (B y D). .... | 40 |
| <b>Figura 14.</b> Efecto del fotoperiodo sobre el contenido de flavonoides totales en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).....                                                 | 42 |

## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Anexo 1.</b> Acondicionamiento de condiciones de cultivo. ....                      | 54 |
| <b>Anexo 2.</b> Siembra de ambas variedades de lechuga.....                            | 54 |
| <b>Anexo 3.</b> Medición de altura. ....                                               | 54 |
| <b>Anexo 4.</b> Ajuste de solución nutritiva. ....                                     | 54 |
| <b>Anexo 5.</b> Recorte de hojas para medir CRA. ....                                  | 54 |
| <b>Anexo 6.</b> Coloración de las variedades de lechuga al momento del trasplante..... | 54 |
| <b>Anexo 7.</b> Toma de muestras de las variedades Levistro y Carmoli.....             | 55 |
| <b>Anexo 8.</b> Coloración de las variedades de lechuga a los 30 días. ....            | 55 |
| <b>Anexo 9.</b> Medición del espectro lumínico.....                                    | 55 |

GIRON AGUILAR, M.E. 2024. Evaluación del fotoperiodo sobre el rendimiento y calidad de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivada hidropónicamente. Tesis. Ing. En Tecnología Alimentaria. Catacamas, Olancho, Honduras. Universidad Nacional de Agricultura 57 p.

## RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de diferentes fotoperiodos sobre el rendimiento y calidad de dos variedades de lechuga (Carmoli y Levistro) cultivadas en un sistema hidropónico. Se utilizaron fotoperiodos de 8, 12, 16 y 24 h, para evaluar su efecto sobre parámetros físicos (contenido de materia seca, área foliar, capacidad de retención de agua y color) y químicos (contenido de flavonoides y actividad antioxidante). Estos parámetros fueron evaluados en un ambiente de cultivo controlado, manteniendo temperatura y humedad en valores constantes durante un periodo de 30 días. Los resultados mostraron que fotoperiodos de 24 h favorecieron la acumulación de materia seca, alcanzando 9.2 % en Carmoli y 10.9 % en Levistro; además, mejoró la capacidad de retención de agua, alcanzando 84.4 % en Carmoli y 80.7 % en Levistro. En cuanto al color, fotoperiodos de 8 h favorecieron la uniformidad del color verde en Levistro, mientras que fotoperiodos prolongados beneficiaron la intensidad del color rojo en Carmoli. En relación a parámetros químicos, fotoperiodos de 24 h, presentaron concentraciones más altas de los compuestos evaluados, donde, Carmoli reveló en el contenido de flavonoides concentraciones de 63.5 mg ERUT / 100g PF<sup>-1</sup>, mientras Levistro, una capacidad antioxidante con concentraciones de 100.6 mg ET / 100g PF<sup>-1</sup> al finalizar el periodo de cultivo. Los resultados indican que, la manipulación de fotoperiodos en sistemas hidropónicos influye tanto en rendimientos físicos como en calidad de las lechugas, proporcionando una estrategia efectiva para la utilización de fotoperiodos durante la producción en sistemas de agricultura controlada.

**Palabras Clave:** Hortalizas, compuestos bioactivos, ambientes controlados, luces LED.

## I. INTRODUCCIÓN

En Honduras, al menos 15% de la población sufre de problemas nutricionales debido al bajo contenido de nutrientes en los alimentos que consumen (SAN 2018). Esta situación refleja la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria mediante estrategias que aumenten la disponibilidad de alimentos nutritivos y seguros para la población. Sin embargo, las limitaciones en la producción agrícola, como la baja productividad, agravan esta problemática de forma recurrente. Ante estos desafíos, los sistemas de producción en ambientes controlados se presentan como una solución efectiva, al posibilitar el manejo de factores claves como la iluminación, lo que contribuye a mejorar el desarrollo productivo de los cultivos hortícolas (Ramos y Ramírez 2016).

Los ambientes controlados juegan un papel esencial en cultivos de diversas hortalizas (Partap et al. 2023), en conjunto con la utilización de la hidroponía, se convierten en una alternativa a la agricultura tradicional, con beneficios como ciclos más rápidos y menos riesgos de infecciones o degradación del suelo (Tomasi et al. 2015). En particular, el cultivo hidropónico en hortalizas de hoja como la lechuga, ha demostrado reducir el consumo de agua, necesidad de pesticidas y aumentando rendimientos, al aprovechar recursos y producir en entornos controlados (Barbosa et al. 2015).

A pesar de la utilización de ambientes controlados junto a la aplicación de técnicas hidropónicas para la producción de lechugas, la gestión de la luz sigue siendo un desafío significativo. En este contexto, durante las últimas décadas, se han incrementado los estudios que analizan cómo los fotoperiodos (cantidad de horas luz y oscuridad proporcionada a las plantas en un ciclo de 24 h), influyen en el crecimiento de hortalizas y su contenido nutricional (Avgoustaki et al. 2024). Por esta razón, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto del fotoperiodo sobre el rendimiento y la calidad de dos variedades de lechugas cultivadas en un sistema hidropónico.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1.Objetivo General**

- Evaluar el efecto del fotoperiodo sobre el rendimiento y calidad de dos variedades de lechuga cultivadas mediante un sistema hidropónico.

### **2.2.Objetivos Específicos**

- Estudiar el rendimiento de dos variedades de lechuga cultivadas hidropónicamente bajo diferentes fotoperiodos.
- Determinar el contenido de compuestos bioactivos de dos variedades de lechuga sometidas a diferentes fotoperiodos.
- Analizar la calidad global y el rendimiento de dos variedades de lechuga cultivadas bajo diferentes fotoperiodos, para identificar el tratamiento más eficiente.

### **III. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1. Desafíos en la gestión de la iluminación y el ambiente en la producción agrícola**

La productividad de los cultivos se ve limitada por la escasez de luz durante una serie prolongada de días nublados, especialmente en invierno. En cuanto a la producción de cultivos de invernadero, se puede emplear iluminación de asimilación suplementaria con fuentes de luz artificial, que prolonga el fotoperiodo por día y compensa una cantidad insuficiente de luz para la fotosíntesis durante el día (Matsuda et al. 2014). En un espacio de ambiente controlado, las condiciones fluctúan entre ciclos de luz y oscuridad y los cultivos, a medida que crecen, su impacto en la demanda y el uso de energía se vuelve más prominente (Talbot y Monfet 2024).

Durante la práctica de la agricultura en ambientes controlados (AAC), los cultivos en espacios cerrados y con la ayuda del análisis de datos y el aprendizaje automático, el clima, la iluminación y el riego se pueden controlar, optimizar e incluso automatizar. Este tipo de cultivo de interior es más accesible para los habitantes urbanos y es más respetuoso con el medio ambiente (por ejemplo, menos uso de agua y pérdida de suelo). Aunque la agricultura en ambientes controlados es muy prometedora, hoy en día todavía está en su fase inicial y sólo se aplica a una gama limitada de productos agrícolas (Zhang et al. 2021).

La tecnología agrícola sin suelo se ha planteado como una solución clave para enfrentar la escasez de tierras agrícolas y satisfacer la creciente demanda alimentaria de una población en constante aumento (Goodman y Minner 2019). Estos sistemas también ofrecen beneficios adicionales, como reducciones de pérdidas por plagas y prevención de acumulación de sales en suelos. En particular, los sistemas hidropónicos destacan por su eficiencia energética y

ausencia de residuos sólidos, posicionándolos como una de las tecnologías agrícolas más sostenibles. Diversos estudios han demostrado que la hidroponía permite utilizar de una manera eficiente los nutrientes, aumentar la densidad de siembra y mejorar el rendimiento por unidad de superficie en comparación con los métodos tradicionales de cultivos en suelos (Sardare y Admane 2019).

### **3.2.Tecnologías de producción en ambientes controlados (AAC)**

La Agricultura de Ambiente Controlado se considera una estrategia eficaz para enfrentar el cambiante panorama agrícola. Además de permitir una producción de alimentos más localizada en los centros urbanos, la AAC ofrece beneficios como bioseguridad, mitigación de plagas y sequías y producción de cultivos durante todo el año. Esto se traduce en una reducción de los costos de transporte asociados con la agricultura tradicional (Engler y Krarti 2021). Asimismo, la AAC podría facilitar la recuperación de tierras para los ecosistemas naturales que anteriormente se habían perdido por la agricultura y generar nuevos puestos de trabajo en las áreas urbanas, donde se está concentrando la mayoría de la población (Muller et al. 2017).

Estos ecosistemas de ambiente controlado son cámaras especialmente diseñadas donde se cultivan plantas agrícolas y hortícolas en condiciones controladas. Utilizan técnicas como hidroponía, aeroponía y acuaponía y se basa en sustratos naturales para crear medios de cultivo y soluciones nutritivas. Estos sustratos naturales contienen propiedades físicas y químicas adecuadas para el desarrollo de las plantas. Además, el uso de sustratos naturales permite el cultivo sin suelo y favorece el crecimiento de semillas monocotiledóneas y dicotiledóneas en condiciones climáticas estables (Sharma et al. 2024).

### **3.2.Utilización de la hidroponía para cultivos de lechuga**

Las prácticas agrícolas intensivas, que incluyen el uso de cultivos de alto rendimiento, fertilizantes y pesticidas, han incrementado la productividad agrícola, pero también, han generado efectos adversos significativos, como contaminación de suelos, degradaciones de ecosistemas y la intensificación del cambio climático mediante las emisiones de gases de efecto invernadero generadas (Nemali 2022). Dado que el suelo cumple principalmente la función de soporte para las raíces, mientras que los nutrientes esenciales provienen de los fertilizantes, los sistemas hidropónicos han surgido como una alternativa, reemplazando el suelo por sustratos inorgánicos o soluciones nutritivas para un manejo más eficiente de los recursos (Ezzahoui et al. 2021).

Es por ello que la producción hidropónica ha permitido mayores rendimientos y un uso reducido de agua, siendo ideal en zonas áridas, aunque su alto consumo energético limita su sostenibilidad sin acceso a fuentes renovables; sin embargo, se presenta como una alternativa eficiente para maximizar recursos y aumentar la productividad en espacios reducidos (Barbosa et al. 2015). En ese sentido, los cultivos hidropónicos son un sistema de producción en el que las plantas se desarrollan en un sustrato inerte o sin sustrato, utilizando soluciones acuosas o ambientes controlados con humedad, en lugar de tierra (Ezzahoui et al. 2021).

Este tipo de cultivo tiene la peculiaridad de contar con diversas técnicas hidropónicas, demostrando el sistema de raíz flotante ser el más eficaz para cultivar hortalizas de hoja, como lechuga, albahaca, rúcula y rábano (Ciriello et al. 2021). Esto debido a que, implica en suspender las plantas en agua rica en nutrientes, lo que permite que sus raíces estén expuestas directamente a la solución nutritiva y puedan adquirir los nutrientes necesarios para su crecimiento (Chawla 2023). La aplicación de esta técnica, en combinación con un estrés inducido de manera controlada, podría disminuir los niveles de compuestos antinutricionales, como los nitratos, y, a su vez, estimular la biosíntesis de metabolitos secundarios, tales como carotenoides, flavonoides, fenoles y vitamina C, compuestos de interés creciente para los consumidores debido a sus propiedades antioxidantes (Moreno et al. 2020).

### **3.2.La Lechuga como cultivo clave en hidroponía**

La lechuga, una hortaliza de hoja con importancia económica y nutricional, cultivada principalmente en regiones templadas y subtropicales. Su desarrollo depende de factores ambientales como la luz, la temperatura, el ciclo fenológico, las prácticas agronómicas, el uso de fertilizantes y las condiciones postcosecha (Mou 2009). Siendo su eficiencia fotosintética y metabólica dependiente principalmente de factores como la luz y la temperatura (Lara et al. 2020)

Su corto ciclo de cultivo permite una sucesión rápida de siembras y múltiples cosechas anuales, aprovechando el uso del espacio y recursos en sistemas de producción(Paterlini et al. 2004). Esta hortaliza presenta una notable diversidad en cuanto a colores, tamaños y formas, permitiendo su clasificación en distintos tipos que agrupan variedades con características morfológicas similares. Aunque la lechuga es una hortaliza con un alto contenido de agua (aproximadamente 95%), su perfil nutricional varía según el tipo, y puede ser comparable al de otros vegetales considerados más nutritivos. Además, al consumirse generalmente en estado crudo, conserva una mayor cantidad de nutrientes en comparación con otras verduras que requieren procesamiento, lo que refuerza su valor en la dieta. (Kim et al. 2016)

### **3.3.Composición nutricional y metabolitos secundarios de la lechuga**

La calidad de la lechuga, fundamental para su valor nutricional, basándose en una serie de características relevantes para la salud humana, como hortaliza fresca y altamente perecedera, es susceptible a pérdidas en su contenido nutricional durante las etapas previas a su consumo (Chiesa 2010). Dado que el agua constituye su principal componente, su reducción no solo

afecta el peso, sino que también impacta en su frescura y turgencia, disminuyendo su atractivo visual y su valor como fuente de nutrientes en la dieta diaria (Kim et al. 2016). El consumo de lechuga aporta beneficios para la salud humana debido a la presencia de compuestos bioactivos presentes en esta hortaliza (Mampholo et al. 2016).

La lechuga es una fuente rica en vitaminas, minerales y compuestos bioactivos, como polifenoles, carotenoides y clorofila, que aportan beneficios a la salud, siendo su perfil fitoquímico variable considerablemente entre sus distintos tipos (Llorach et al. 2008). Debido a su contenido de compuestos fitoquímicos, la lechuga presenta potencial en la prevención del cáncer. Donde según su tipo de aplicación, como ser la lechuga biofortificadas con yodo, promueve la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en células cancerosas, induciendo efectos anticancerígenos mediante la activación de la muerte celular en dichas células (Sularz et al. 2021).

La calidad nutricional varía entre las diferentes variedades de lechuga, especialmente entre sus tipos (verde y roja) (Shi et al. 2022). Donde, comparativamente, investigaciones señalan que, la lechuga roja contiene mayores concentraciones de compuestos fenólicos en comparación con la lechuga verde, convirtiéndola en una fuente importante de antioxidantes en la dieta diaria (Wilson et al. 2004). Las propiedades saludables se deben a su alto contenido de compuestos antioxidantes, especialmente vitamina C y polifenoles, además de su aporte de fibra (Materska et al. 2019) Los antioxidantes naturales aislados y caracterizados a partir de fuentes vegetales como la lechuga han adquirido una importancia notable, impulsados por el creciente interés en una alimentación saludable y restricciones asociadas al uso de antioxidantes sintéticos debido a posibles efectos adversos (Rouphael et al. 2012).

### **3.4. Impacto de la luz en la calidad nutricional y crecimiento vegetal**

Los factores ambientales alteran el metabolismo de las plantas, donde las condiciones de luz, la calidad de la luz, el fotoperiodo y la intensidad de la luz aumentan el contenido de

antioxidantes en la hoja de lechuga. De igual manera, la pigmentación de los cuerpos de los frutos y las plantas está influenciada por la calidad de la luz (Endo et al. 2022). Debido a que las plantas requieren luz no solo para la fotosíntesis, sino también para la regulación y dirección del crecimiento y desarrollo, así como para la síntesis de compuestos químicos (Folta y Childers 2008).

La luz juega un papel crucial en el desarrollo y la tasa de crecimiento de las plantas, ya que contribuye significativamente a la activación del proceso fotosintético. Específicamente, la fotosíntesis, que es el proceso fundamental que alimenta el crecimiento y desarrollo vegetativo de las plantas. Las plantas importan a través de los estomas dióxido de carbono atmosférico y agua de sus raíces, y con la activación de la radiación lumínica, lo convierten en oxígeno e hidratos de carbono que proporcionan la energía necesaria para su crecimiento y mantenimiento (Avgoustaki et al. 2024).

#### **3.4.1. Fotoperiodo y su influencia en el desarrollo vegetal**

El fotoperiodo es un factor importante que sirve como un factor regulador clave en la alteración día-noche que influye en la expresión de genes relacionados con la fotosíntesis. Esto, a su vez, afecta la capacidad fotosintética de las plantas y altera el crecimiento y desarrollo de las plantas (Guo et al. 2023). Además de afectar al crecimiento vegetativo y reproductivo de las plantas, los niveles de algunos metabolitos secundarios también parecen verse afectados por el fotoperiodo. Estos niveles de metabolitos secundarios generalmente tienden a aumentar con el aumento del fotoperiodo, a menos que se inhiba el crecimiento de la planta (Hata et al. 2012).

Por otro lado, los fotoperiodos excesivamente largos, como la iluminación continua (IC) para crear un fotoperiodo de 24 h., causan trastornos fisiológicos visibles similares a la clorosis moteada, denominados lesiones inducidas por IC, sin embargo, el crecimiento y los rendimientos de las plantas bajo IC son menores que los de un fotoperiodo de 14 h, asociado

con la ocurrencia de lesiones (Matsuda et al. 2014). Algunas plantas responden al fotoperiodo con alteraciones en la latencia y/o iniciación de yemas y/o tubérculos, elongación y formación de tallos. Durante la germinación, las plantas crecen en condiciones de fotoperiodo largo hasta que sus raíces se activan y comienzan a absorber nutrientes y agua del sustrato (Avgoustaki et al. 2024).

En la búsqueda del efecto de los fotoperiodos en ciertas variedades, se encontró que un fotoperiodo de 14 h y 12 h tuvieron un impacto positivo en el crecimiento de las plantas de *Valerianella locusta*. Específicamente, el fotoperiodo de 14 h resultó en una mejor producción de biomasa fresca y seca, así como en un mayor desarrollo de la superficie foliar y contenido de clorofila en comparación con el fotoperiodo de 12 h (Avgoustaki et al. 2024). Por otro lado, en cultivos de lechuga, se observa que un fotoperíodo de 24 h favorece el crecimiento, aumentando la masa fresca, el número de hojas y la concentración de clorofila. Sin embargo, los efectos variaron según la interacción con otros factores, sugiriendo que fotoperíodos excesivamente largos no siempre son los más adecuados para un crecimiento óptimo (Kelly et al. 2020).

### **3.4.2. Intensidad lumínica en el crecimiento vegetal**

La intensidad de luz afecta procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento de las plantas y las reacciones fotoquímicas que convierten CO<sub>2</sub> en carbohidratos. Además, se considera clave en la regulación de la biosíntesis en las plantas, siendo factor dominante en la productividad de las plantas y eficiencia en el uso de la luz, que se define como la relación entre energía química del peso seco acumulado del brote de la planta y energía luminosa acumulada recibida por el dosel de las plantas (Ahmed et al. 2020). Sin embargo, demasiada luz puede alterar los procesos fisiológicos de las plantas, incluido daño a los fotorreceptores. En particular, la intensidad de la luz provoca una degradación significativa de la cadena de transporte de fotoelectrones y aumenta la producción de especies reactivas de oxígeno que pueden dañar el aparato fotosintético (Sukhova et al. 2020).

La cantidad luz que reciben las plantas desempeña un papel crucial en su fisiología, bioquímica y morfología, influyendo en la formación de hojas, crecimiento y otros procesos vitales (Avgoustaki et al. 2024). A medida que la intensidad de luz aumenta, la tasa de fotosíntesis también se incrementa hasta igualarse con el CO<sub>2</sub> liberado por la respiración mitocondrial, alcanzando el Punto de Compensación a la Luz (PCL), donde este varía según el tipo de planta, teniendo comúnmente un PCL entre 1 y 20  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Las plantas pueden mantener intensidades desde 20-50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en especies de baja luz, y hasta 1,000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para cultivos de alto rendimiento (Mejía de Tafur et al. 2014).

En comparación de dos intensidades de luz 40 y 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , a una intensidad de 40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , las hojas mostraron un adelgazamiento en el grosor, mientras que a 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , se promovió un desarrollo anatómico más robusto y bien definido (Zheng y Van Labeke 2018). Por otro lado, la implementación de distintas intensidades hacia cultivares de remolacha, se determinó que la intensidad lumínica óptima para mejorar el rendimiento se situó entre 120 y 160  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , demostrando un aumento significativo en el rendimiento comparado con la intensidad más alta de 220  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Hernández-Adasme et al. 2023).

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Lugar de Investigación

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

### 4.2 Material biológico

Se utilizaron semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) de las variedades verde “Levistro” Lollo Bionda y rojo “Carmoli” Lollo Rosso (Rijk Zwaan Zaadteelt und Zaadhandel BV, De Lier, Países Bajos). La germinación se realizó en un sustrato compuesto por perlita y turba (Kekkilä, DSM 2W, Finlandia) en una proporción 1:1 (CE: 0.3 dS m<sup>-1</sup>) a una temperatura de 24±2 °C durante un periodo de 15 días previos al trasplante a un sistema hidropónico.



**Figura 1.** Variedades de lechuga utilizadas.

## Diseño experimental implementado

Para llevar a cabo esta investigación, se consideró el fotoperiodo (8, 12, 16 y 24 h) como objetivo de interés, el cual fue aplicado a las variedades de lechuga Levistro y Carmoli. En cada una de las combinaciones se empleó el mismo espectro de luz blanca (400-700 nm) con una intensidad de  $250 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD, valor obtenido utilizando un espectrorradiómetro (UPRtek, MK350D, Taiwán) situado a 10 cm de altura desde la base de cada bandeja. Dicha combinación, generó un total de 8 tratamientos (Tabla 1), por cada tratamiento se realizaron 3 repeticiones, siendo la repetición o unidad experimental una bandeja hidropónica con 14 plantas.

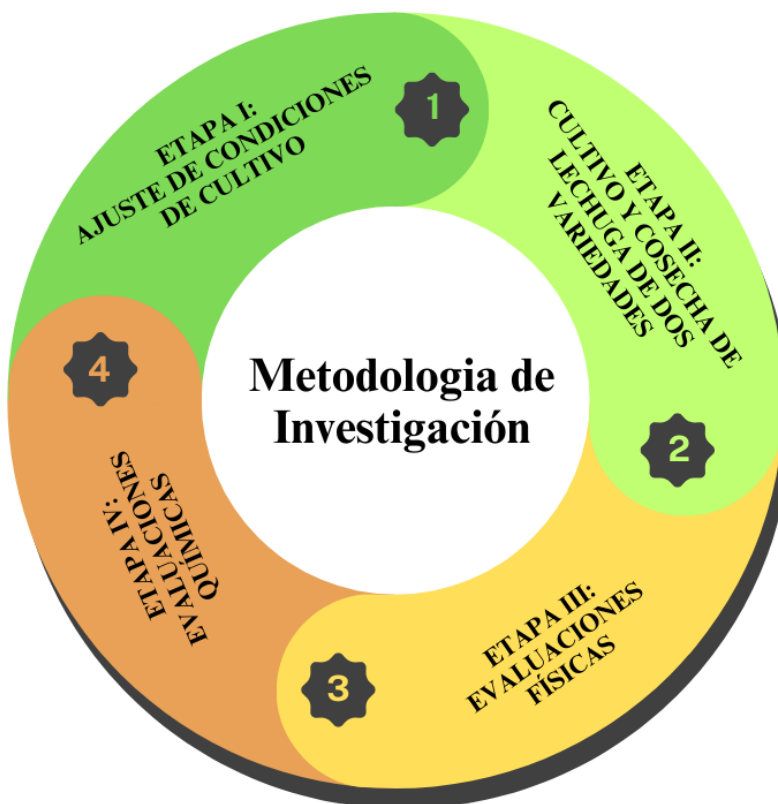
**Tabla 1.** Condiciones experimentales de fotoperiodo y variedades de lechuga en sistema hidropónico.

| Variedad                | Fotoperiodo (h) | Nombre del tratamiento |
|-------------------------|-----------------|------------------------|
| Levistro (Lollo Bionda) | 8               | L8                     |
|                         | 12              | L12                    |
|                         | 16              | L16                    |
|                         | 24              | L24                    |
| Carmoli (Lollo Rosso)   | 8               | C8                     |
|                         | 12              | C12                    |
|                         | 16              | C16                    |
|                         | 24              | C24                    |

Durante el periodo de cultivo, la exposición total a la luz aplicadas a las lechugas fue de 240 horas para el fotoperiodo 8 h, 360 horas para 12 h, 480 horas para 16 h y 720 horas para 24 h, sumando un total de 1,800 horas luz. Este procedimiento se implementó en ambas variedades, resultando un total de 3,600 horas luz aplicadas durante el periodo de cultivo.

### 4.3 Metodología de investigación

La investigación constó de cuatro etapas (Figura 2), las cuales se describen de forma individual.



**Figura 2.** Etapas de la investigación

#### 4.3.1 Fase I: Ajuste de condiciones de cultivo

El experimento se realizó en el interior de una cámara de refrigeración adaptada a que, con dimensiones de 350 x 260 x 280 cm, diseñada para controlar tanto la temperatura como la humedad relativa (HR). Se instalaron tres estanterías metálicas de 170 x 180 x 45 cm, cada una dividida en tres niveles. En cada nivel se colocaron bandejas hidropónicas de 45 x 30 x

0,5 cm, dispuestas en tres repeticiones por tratamiento y distribuidas aleatoriamente bajo lámparas LED de crecimiento (barra de luz LED de cultivo de 200W, Crown team industrial limited, Hong Kong) (Anexo 1).

Se utilizó el mismo espectro de luz blanca junto con una misma intensidad de luz en los diferentes tratamientos, las lámparas se programaron para encenderse automáticamente en los siguientes fotoperiodos: de 8:00 am a 4:00 pm (8 h.), de 8:00 am a 8:00 pm (12 h.), de 8:00 am a 12:00 am (16 h.) y de 8:00 am a 8:00 am (24 h.). El sistema de iluminación estuvo conectado a un temporizador analógico enchufable (T-101, Completel, China) durante el periodo de cultivo de 30 días, incluyendo 15 días previos al trasplante de las variedades. Se mantuvieron temperaturas promedio de  $24 \pm 2$  °C y humedad relativa de  $77 \pm 3$  %, condiciones monitoreadas con dataloggers (Elitech, RC-51, Reino Unido). Antes del montaje, todos los elementos fueron desinfectados.

#### **4.3.2 Fase II: Cultivo y cosecha de las variedades de lechuga**

En esta etapa se desarrolló el manejo de las plantas desde la siembra hasta la cosecha, asegurando condiciones adecuadas para el desarrollo de ambas variedades. El proceso incluyó el establecimiento inicial de las plántulas, seguido de su trasplante a bandejas hidropónicas, para sus respectivas evaluaciones. Los cultivos se monitorearon regularmente para ajustar las condiciones requeridas para asegurar un desarrollo adecuado hasta el momento de la cosecha.

##### **a. Establecimiento y manejo del cultivo de ambas variedades de lechuga**

En bandejas alveoladas rígidas de 162 cavidades, se sembraron 57 semillas de lechuga por cada tratamiento, obteniendo un total de 192 plantas por variedad, en donde se tomó a evaluar 14 plantas por unidad experimental o repetición, utilizando como sustrato una mezcla de

turba y perlita en proporción 1:1 previamente hidratada (Kekkilä, DSM 2 W, Finlandia) (CE: 0,3 dS m<sup>-1</sup>) (Anexo 2). Las bandejas se regaron a cada 4 días con agua potable mediante aspersión, garantizando la humedad adecuada para el desarrollo del cultivo. Una vez que las plántulas alcanzaron la cuarta hoja verdadera, se trasplantaron a un sistema hidropónico en bandejas plásticas con una placa acrílica perforada, con capacidad para 14 plantas por unidad experimental (42 plántulas por nivel o tratamiento) (Figura 3).



**Figura 3.** Trasplante de las variedades Carmoli y Levistro a sistema hidropónico.

Durante el trasplante, se tomaron muestras de seis plantas por repetición: tres destinadas a evaluaciones físicas y tres a evaluaciones químicas. Al momento de la extracción, las plantas se limpiaron para eliminar el sustrato de las raíces, registrando el peso total (g) de cada planta, utilizando una balanza (Eurotech, XY-3002C, Italia). Se verificó semanalmente, el nivel de solución nutritiva para garantizar que las raíces permanecieran sumergidas y correctamente oxigenadas a través de un sistema de mangueras conectadas a un compresor de aire (Figura 4), suministrando cuatro litros de solución por bandeja.



**Figura 4.** Verificación del nivel de la solución nutritiva en las bandejas hidropónicas.

La solución nutritiva está basada en la formulación propuesta por Hernández-Adasme (2023) (Tabla 2), en donde, al inicio del periodo de cultivo se ajustó el pH a 100 L de dicha solución preparada, aplicando una mezcla ácida (compuesta por 95 %  $H_2O$ , 3.8 %  $HNO_3$  y 2 %  $H_3PO_4$ ) hasta alcanzar un rango de pH entre 5.5 y 6.8, utilizando un medidor de pH (HANNA, HI2020, Italia). Adicionalmente, se midió el oxígeno disuelto con un medidor portátil específico (HANNA, HI946, Italia). Las mediciones de la conductividad eléctrica se realizaron mediante un medidor portátil de conductividad (HANNA, HI99300, Italia) (Anexo 4).

**Tabla 2.** Composición de la solución nutritiva utilizada en el sistema hidropónico.

| Fertilizante              | Concentración (g 100 L <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------|----------------------------------------|
| 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                                    |

### **b. Cosecha de las variedades de lechuga**

La cosecha se realizó a los 0, 15 y 30 días después del trasplante, en donde, día cero corresponde al trasplante, a partir del cual se comenzaron a extraer seis plantas al azar por bandeja, cortando sus raíces con tijeras de acero inoxidable esterilizadas (con solución de etanol al 70%). Siendo, las tres plantas destinadas a evaluaciones químicas, congeladas utilizando nitrógeno líquido y trituradas con un mortero hasta obtener un polvo fino (Figura 5), el cual se guardó en tubos Falcon rotulados y almacenados a -80 °C en un congelador de ultra baja temperatura (SANYO, MDF-U33V, Japón) hasta el día del análisis.



**Figura 5.** Preparación de muestras para análisis químicos.

### **4.3.3 Fase III: Evaluaciones físicas**

Las evaluaciones físicas que se llevaron a cabo se describieron como, contenido de materia seca, área foliar, contenido relativo de agua y color de las hojas, los cuales son indicadores importantes tanto del rendimiento como de la calidad de las lechugas. A continuación, se describen los procedimientos empleados para cada una de estas evaluaciones.

#### **a. Contenido de materia seca en lechuga**

Por cada repetición se evaluaron 3 plantas para obtener el contenido de materia seca de las lechugas cosechadas (parte aérea y raíz por separado), que fueron secadas en una estufa (LabTech, LFO-250F, Corea) a 60 °C hasta que la masa de la muestra fue constante. Posteriormente, se pesaron utilizando una balanza (Kern, CMN3000-1, Alemania), y el resultado se presentó como porcentaje de materia seca en gramos por 100 gramos de materia fresca.

$$\text{Porcentaje de materia seca} = (\text{PF} - \text{PS}) * 100$$

Ecuación 1

Donde:

PF= Peso fresco (g) correspondiente a la parte aérea de la planta

PS= Peso seco (g) correspondiente a la parte aérea de la planta

#### **b. Área foliar**

Para medir el área foliar, se utilizó un medidor de área foliar (CI-202 Portable Laser Leaf Area Meter, CID Bio-Science, U.S.A.). Tres de cada seis plantas fueron seleccionadas al azar de cada repetición. Las mediciones se realizaron en cada hoja de las tres plantas seleccionadas el día de la cosecha, y luego se marcó con precisión cada cotiledón para registrar su área en cm<sup>2</sup>. Los valores de área obtenidos se promediaron en cada repetición para proporcionar una medida representativa del tamaño de los cotiledones en cada tratamiento experimental. Este proceso se repitió para las tres plantas seleccionadas en cada repetición

#### **d. Contenido relativo de agua (CRA)**

Se evaluó el contenido de agua del tejido en relación con su turgencia. Se recortaron tres círculos de hojas por repetición (Anexo 5), los cuales fueron pesados en una balanza analítica (RADWAG, AS220.R2, Reino Unido) para obtener su peso fresco (PF) y luego colocados en placas Petri con papel absorbente y agua destilada. Las muestras se mantuvieron refrigeradas a 4 °C durante 24 h. y se pesaron nuevamente para obtener el peso turgente (PT). Posteriormente, la placa Petri se colocó en un horno a 80°C durante 48 h. y se pesó para obtener su peso seco (PS). El CRA (%) foliar fue calculado utilizando la ecuación 1 (Argente et al. 2006).

$$\text{CRA} = ((\text{PF} - \text{PS}) / (\text{PT} - \text{PS})) * 100\%$$

Ecuación 2

Donde:

CRA= Contenido relativo de agua

PF= Peso Fresco (g)

PS= Peso Seco (g)

PT= Peso Turgente (g)

#### **e. Evaluación del color en Levistro y Carmoli**

Se seleccionaron seis hojas externas al azar por planta de cada repetición para obtener los parámetros de color. La medición se tomó en la parte derecha del haz de la hoja evitando la nervadura central, para realizar esta medición se utilizó un colorímetro compacto triestímulo (modelo: Minolta Chroma Meter, CM-2500d, Japón) para obtener los valores de luminosidad (L\*), croma (C\*) y ángulo de tono (hue) de las hojas (Figura 6).

#### **4.3.4 Fase IV: Evaluaciones químicas**

Para la evaluación de la actividad antioxidante mediante los métodos FRAP y DPPH y la medición de flavonoides, se prepararon las muestras diluyendo 200 mg de materia seca en 10 mL de metanol al 70 % (Figura 7). Las muestras fueron mezcladas en un Vortex (SCILOGEX MX-S, U.S.A.) durante 1 minuto y luego se pasaron por una centrifuga (Z326-K, HERMLE, Alemania) durante 15 minutos a 4 °C utilizando 6,000 rpm. Posteriormente, las muestras se filtraron para obtener el extracto utilizado en las evaluaciones.



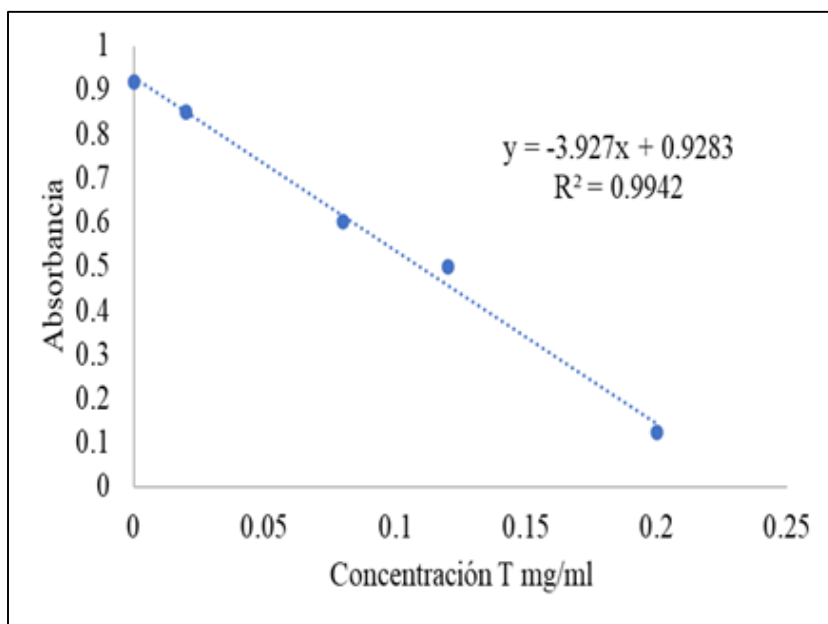
**Figura 6.** Muestras para análisis de Antioxidantes y Flavonoides.

#### **a. Capacidad Antioxidante (método FRAP)**

La capacidad antioxidante mediante el método FRAP fue evaluada preparando el reactivo FRAP, al que se añadieron a la solución acuosa 300 mmol L<sup>-1</sup> de tampón acetato (pH 3,6), 20 mmol L<sup>-1</sup> de cloruro férrico hexahidrato y 2,4,6-Tris(2-piridil)-s en una proporción 10:1:1. Esta mezcla se calentó en un baño termostático a 40°C durante 10 minutos. Luego, se añadieron 20 µL del extracto de materia vegetal y 600 µL de reactivo FRAP en un tubo Eppendorf de 2 mL. Después de 30 minutos, se transfirieron 200 µL de la solución a una placa de 96 compartimientos, y se midieron en un espectrofotómetro de microplacas (ASYS UVM340, Biochrom Ltd., Cambridge, Reino Unido) cada 30 minutos durante 3 horas.

### c. Capacidad Antioxidante (método DPPH)

En la medición de la capacidad antioxidante mediante el método DPPH, se utilizó un tubo Eppendorf de 2 mL en el que se añadieron 250  $\mu$ L de extracto (obtenido a partir de 200 mg de materia seca vegetal en 10 mL de metanol al 70%) y 1 mL de reactivo DPPH a 0.4 mM. La mezcla se dejó reaccionar durante 20 minutos, luego se tomaron 200  $\mu$ L de la solución y se midió la absorbancia a 517 nm utilizando un espectrofotómetro de microplacas (ASYS UVM340, Biochrom Ltd., Cambridge, Reino Unido), repitiendo la toma de muestra a las 2 h posterior a la primera toma de muestra. La capacidad antioxidante para ambos métodos fue calculada utilizando una curva de calibración preparada con Trolox (antioxidante estándar utilizado comúnmente para medir la capacidad antioxidante) (Figura 8), en donde, la capacidad antioxidante se expresa en miligramos equivalentes de Trolox por cada 100 gramos de peso fresco (mgET/100g PF-1).

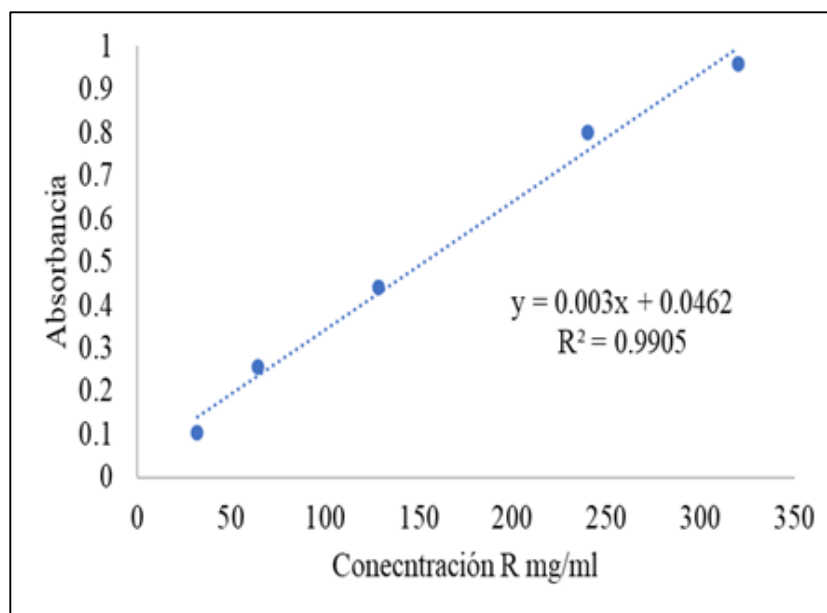


**Figura 7.** Curva de calibración preparada con Trolox.

#### d. Contenido de flavonoides totales

Primero, se preparó una solución de nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ ) al 5%, disolviendo 2.5 g de  $\text{NaNO}_2$  en un matraz de 50 mL con agua destilada. También se preparó una solución de cloruro de aluminio hexahidratado ( $\text{AlCl}_3$ ) al 10%, disolviendo 5 g de  $\text{AlCl}_3$  en un matraz de 50 mL con agua destilada. Además, se preparó una solución de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 1M, disolviendo 4 g de  $\text{NaOH}$  en un matraz de 100 mL con agua destilada.

Para la reacción, en un tubo Eppendorf de 2 mL se añadieron 100  $\mu\text{L}$  del extracto de la muestra, a los cuales se agregaron 100  $\mu\text{L}$  de  $\text{NaNO}_2$  al 5%. La mezcla se dejó reaccionar durante 5 minutos, luego se añadieron 100  $\mu\text{L}$  de  $\text{AlCl}_3$  al 10% y se dejó reaccionar 6 minutos. Posteriormente, se agregaron 670  $\mu\text{L}$  de  $\text{NaOH}$  1M, y se transfirieron 200  $\mu\text{L}$  de esta solución a una placa para medir la absorbancia a 512 nm utilizando un espectrofotómetro de microplacas (ASYS UVM340, Biochrom Ltd., Cambridge, Reino Unido). El contenido de flavonoides totales fue calculado utilizando una curva de calibración preparada con Rutina (Figura 9), en donde, los flavonoides se expresan en miligramos equivalentes de Rutina por cada 100 gramos de peso fresco (mg ERUT/100g PF-1).



**Figura 8.** Curva de calibración preparada con Rutina.

#### **4.3.5 Diseño experimental y análisis de datos**

Se aplicó un diseño completamente aleatorizado con cuatro tratamientos de fotoperiodo (8, 12, 16 y 24 h), aplicado a las variedades Carmoli y Levistro. Para el análisis de los datos se utilizó un modelo lineal general y mixto, al encontrarse diferencias significativas, se aplicó una prueba de comparación múltiple LSD (Least Significant Difference) para identificar los tratamientos estadísticamente diferentes. Cada tratamiento fue replicado tres veces para evitar sesgos, en donde se utilizó un nivel de significancia del 5%, y los análisis se realizaron en el software InfoStat.

## **V. Resultados y Discusión**

A continuación, se presentan los resultados de los análisis físicos y químicos realizados a las variedades de lechuga Carmoli y Levistro, demostrando el efecto del fotoperiodo sobre el rendimiento y calidad, dentro de las evaluaciones no se realizó el análisis estadístico entre los días del periodo de cultivo, si no, entre los tratamientos por cada día del periodo de evaluaciones.

### **5.1 Evaluaciones físicas de ambas variedades de lechuga**

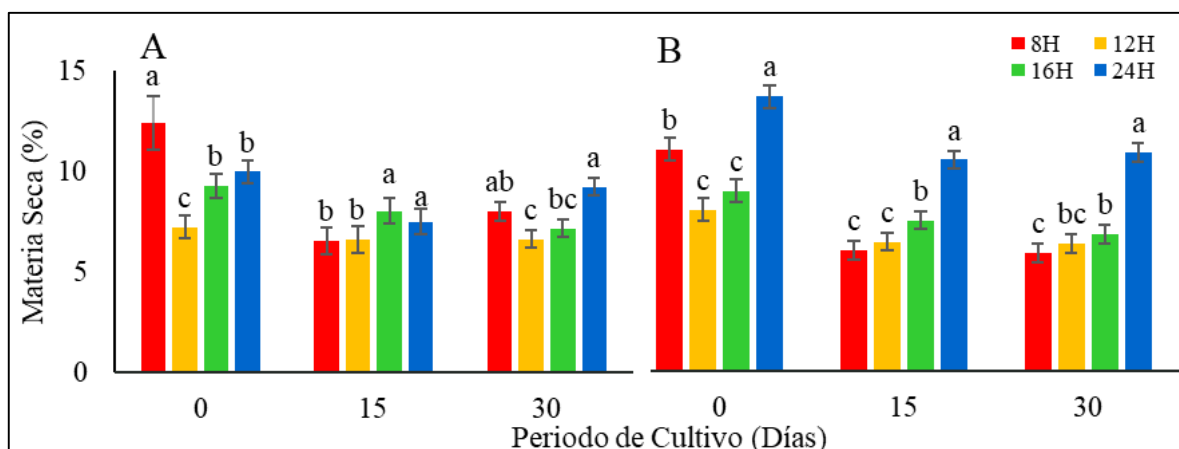
Mediante las evaluaciones físicas, se logró analizar los efectos de diferentes fotoperiodos sobre características como el porcentaje de materia seca, área foliar, el contenido relativo de agua y el color de las hojas de lechuga. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada parámetro físico, acompañados de un análisis comparativo basado en estudios previos.

#### **5.1.1 Contenido de materia seca de Carmoli y Levistro**

En la Figura 10, se presenta el contenido de materia seca (%) para ambas variedades de lechuga a lo largo del período de cultivo. En la variedad Carmoli, durante el periodo inicial (día 0), el fotoperiodo de 8 h presentó el valor mayor (12.4 %), a pesar de esto, el fotoperiodo de 24 h favoreció al contenido de materia seca al día 30 (9.22 %), destacándose como el tratamiento más efectivo en la etapa final del cultivo; sugiriendo una respuesta positiva a condiciones de luz más cortas en fases tempranas del cultivo, fotoperiodos intermedios (12

y 16 h) por su parte, se mantuvieron con menores concentraciones a lo largo del periodo de cultivo, finalizándolo sin mostrar diferencias significativas, manteniéndose en rangos intermedios (6.63 % y 7.16 % al día 30).

En cuanto a la variedad Levistro, se observaron diferencias en los fotoperiodos prolongados, siendo 24 h el fotoperiodo que ocasionó el mayor contenido de materia seca a lo largo del periodo de cultivo (10.92, 8.41 y 8.71 %, en día 0, 15 y 30). En conjunto, ambas variedades alcanzaron mayor contenido de materia seca con fotoperiodos de 24 h., indicando que periodos prolongados de luz podrían mejorar esta variable, aunque Carmoli también responde de manera positiva a fotoperiodos cortos durante el cultivo.



**Figura 9.** Efecto del fotoperiodo sobre el contenido de materia seca (%) en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).

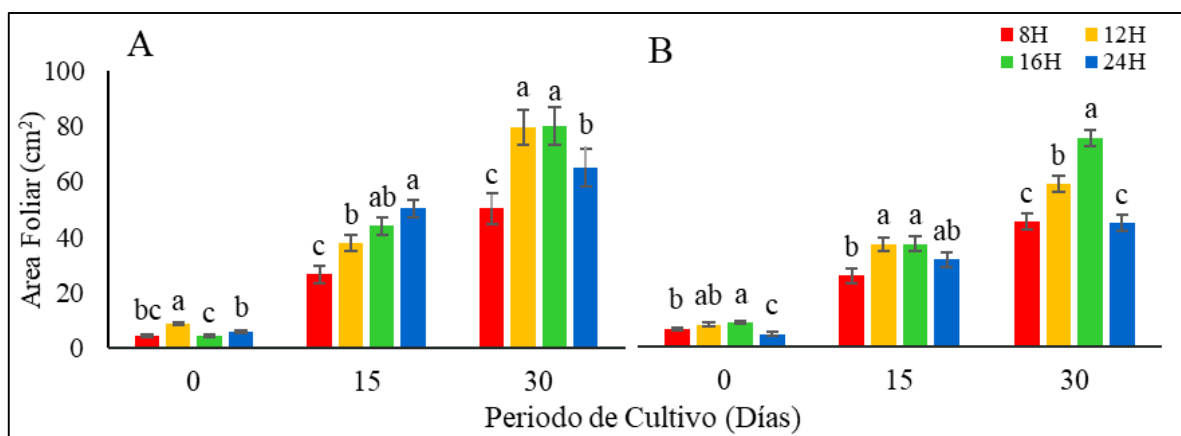
Estudios recientes, encontraron que la exposición prolongada a fotoperiodos largos ( $\geq 16$  h) tiende a favorecer la acumulación de biomasa en lechugas (Hernández-Adasme 2023). Sin embargo, en la variedad Carmoli, indica que, tanto fotoperiodos muy cortos (8 h) como muy largos (24 h) son óptimos, lo que coincide parcialmente con resultados de Hernández-Adasme et al. (2022), donde observaron que el contenido de materia seca en cultivos de lechuga depende tanto de la duración del fotoperiodo como del espectro de luz. Esto sugiere que, para Carmoli, un fotoperiodo más corto es beneficioso en las primeras etapas del cultivo, mientras que, fotoperiodos más largos son más efectivos en las etapas finales.

A diferencia de la evaluación del crecimiento de lechugas en condiciones de luz constante, se observa que variedades de lechuga verde como Levistro aumentan significativamente su contenido de materia seca con fotoperiodos prolongados (Hernández-Adasme et al. 2022). Un estudio similar afirma que fotoperiodos de hasta 24 h favorecen la acumulación de materia seca en ciertas variedades, especialmente en etapas de crecimiento más avanzadas, lo cual coincide con el comportamiento de Levistro durante el periodo de cultivo (Hernández-Adasme 2023).

### **5.1.2 Área foliar**

En la Figura 11, se muestran los resultados del crecimiento de área foliar ( $\text{cm}^2$ ) en ambas variedades de lechuga durante el periodo de cultivo. En la variedad Levistro, el fotoperiodo de 16 h promovió el mayor crecimiento foliar durante todo el ciclo del cultivo, destacándose en el periodo de 30 días ( $75.26 \text{ cm}^2$ ) y mostrando diferencias significativas frente a fotoperiodos más cortos, el fotoperiodo de 12 h también favoreció el crecimiento, alcanzando  $58.61 \text{ cm}^2$  a los 30 días, mientras que el de 8 h resultó en un crecimiento significativamente menor, con  $44.89 \text{ cm}^2$ .

En cuanto a la variedad Carmoli, los fotoperiodos de 12 y 16 h fueron igualmente efectivos para incrementar el área foliar, alcanzando  $79.56 \text{ cm}^2$  y  $79.90 \text{ cm}^2$  a los 30 días, respectivamente; superando los demás fotoperiodos, a pesar de que, el de 8 h mostró un aumento en el área foliar fue menos efectivo, con  $50.27 \text{ cm}^2$  a los 30 días. Ambas variedades mostraron una mejor respuesta a fotoperiodos largos, destacando especialmente a los 30 días con fotoperiodos de 12 y 16 h, sugiriendo que periodos de luz intermedios favorecen el crecimiento foliar en ambas variedades.



**Figura 10.** Efecto del fotoperíodo sobre el área foliar (cm<sup>2</sup>) en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).

Fotoperíodos intermedios (14-16 h) han revelado que, tienden a optimizar el crecimiento del área foliar en cultivos de lechuga, ya que permiten un balance adecuado entre la acumulación de biomasa y la capacidad de fotosíntesis (Hernández-Adasme 2023). Esto se debe a que, se proporciona un tiempo óptimo de luz sin causar estrés por sobreexposición (Hernández-Adasme et al. 2022).

Además, la utilización de fotoperíodos prolongados muestra una tendencia similar, con fotoperíodos de 12 y 16 h promoviendo un crecimiento significativamente mayor en comparación con el fotoperíodo de 8 h. Esto sugiere que la variedad Levistro se adapta mejor a fotoperíodos de duración media o prolongada para un óptimo crecimiento foliar (Zhen et al. 2024), similar a lo observado en Carmoli (Hernández-Adasme 2023).

Sin embargo, Levistro refleja beneficiarse menos de fotoperíodos prolongados (24 h), lo que podría deberse a diferencias en la forma en que ambas variedades responden fisiológicamente a la luz, pudiendo estar relacionadas con la fotoinhibición, ya que un fotoperíodo continuo puede generar un desequilibrio energético y afectar la eficiencia del fotosistema, limitando el rendimiento fotosintético (Palsha et al. 2024).

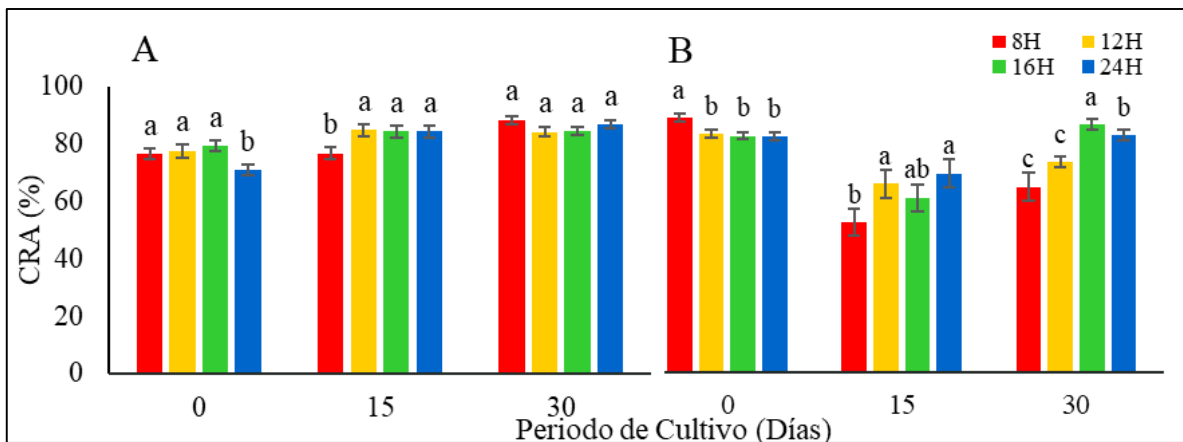
### **5.1.3 Capacidad de Retención de Agua (CRA %)**

En la Figura 12, se presenta la capacidad de retención de agua (CRA %) evaluada en las variedades Carmoli y Levistro a lo largo del periodo de cultivo. Donde, en la variedad Carmoli, durante el inicio del periodo de cultivo, los fotoperiodos 8, 12 y 16 h revelaron valores de CRA sin diferencias significativas entre 75.3 a 77.9 %, siendo significativamente más bajo 24 h (70.9 %).

Durante los 15 días, los tratamientos 12, 16 y 24 h obtuvieron un aumento significativo (84.7 %) en comparación al fotoperiodo de 8 h el cual se mantuvo en su valor inicial, sin embargo, en la etapa final del periodo de cultivo el fotoperiodo de 8 h, obtuvo un aumento significativo (88.37 %), estableciéndose de esta manera en el mismo rango de los demás fotoperiodos.

Por otra parte, en la variedad Levistro, al inicio del periodo de cultivo, el fotoperiodo 8 h (82.8 %) demostró ser significativamente el tratamiento con valores más altos en comparación a 12, 16 y 24 h (75.1 - 77.2 %), a mediados del periodo de cultivo (15 días), el tratamiento 8 h mostró una disminución (48.9 %), mientras que los tratamientos 12, 16 y 24 h alcanzaron valores significativamente más altos (61 %).

Siendo en el día 30, el fotoperiodo 16 h el tratamiento que presentó el mayor CRA (80.68%), seguido de 24 h, 12 h y 8 h (77.33, 68.5 y 60.44%) en los cuales se encontró diferencias significativas. En la variedad Carmoli, los fotoperiodos largos (12, 16 y 24 h) favorecieron un CRA alto y consistente, mientras que el fotoperiodo de 8 h mostró un incremento al final del cultivo.



**Figura 11.** Efecto del fotoperiodo sobre el contenido relativo de agua (CRA %) en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).

Estudios previos mostraron en cultivos de lechuga, que fotoperiodos largos tienden a mantener una mayor capacidad de retención de agua en fases avanzadas de crecimiento (Palsha et al. 2024). Esto debido a que, tienden a maximizar su metabolismo, contribuyendo a una mejor estabilidad de agua en sus tejidos. Encontrando de esta manera que, fotoperiodos más largos, como 16 h en la variedad Levistro que muestra un aumento en CRA al pasar de 77 % al inicio del periodo a 80.7 % al finalizarlo.

De manera similar, en Carmoli, los fotoperiodos de 12, 16 y 24 h mantuvieron valores estables de CRA al día 30 (85.2 %), lo que es consistente con la literatura que destaca la estabilidad hídrica bajo condiciones de luz prolongada, donde no solo favorecen el desarrollo foliar, sino también mejoran la capacidad de retención de agua en lechugas (Hernández-Adasme 2023).

Por otro lado, aunque el fotoperiodo de 8 h generalmente se asocia con menor estabilidad hídrica, en este estudio se observó un comportamiento diferente en Carmoli, donde este tratamiento alcanzó un valor de 88.4 % en el día 30. Este resultado podría reflejar una adaptación específica de la variedad a condiciones de luz limitadas en comparación a los otros fotoperiodos (Zhen et al. 2024).

#### 5.1.4 Color

En la Tabla 3, se presenta la coloración de ambas variedades de lechuga durante el periodo de cultivo (Anexo 6 y 7). En la variedad Levistro, al inicio del cultivo (día 0), fotoperiodos de 8 y 12 h registraron valores significativamente mayores de luminosidad (67 y 66.5 °) y croma (47.8 y 45.7 °), lo que, junto con el ángulo del tono (120-123 °), reflejó un color verde más brillante e intenso. A los 15 días, los tratamientos mostraron una disminución de estas variables, siendo significativamente más altas en fotoperiodos de 16 y 24 h, donde la luminosidad disminuyó a 53.4 y 54.7 °, y el croma a 41.6 y 41.8 °.

A pesar de esto, el ángulo del tono se mantuvo constante, entre 120-122, preservando el color verde. Al finalizar el periodo (día 30), la luminosidad incrementó en 16 h (60.3), mientras que en 12 y 24 h permaneció significativamente más baja (51.1 y 54.5 °). En esta etapa, el croma disminuyó en general, reflejando una pérdida de intensidad de color, aunque el ángulo del tono continuó estable en todos los fotoperiodos, reafirmando la estabilidad del matiz verde.

En cuanto a la variedad Carmoli, los resultados muestran una baja luminosidad desde el inicio, particularmente en los fotoperiodos de 8 y 24 h (51 y 49.2 °), debido a su color característico, disminuyendo conforme avanzaba el periodo del cultivo, indicando una intensificación del color oscuro. La saturación o croma indicó valores bajos al inicio, especialmente en el fotoperiodo de 24 h (7.5 °), aumentando moderadamente al final en fotoperiodos de 12 y 16 h (31.9 y 32.8 °), resaltando la intensidad del tono rojo en esos tratamientos.

**Tabla 3.** Efecto del fotoperiodo sobre el color (L\*, C\* y hue) en las variedades de lechuga Levistro y Carmoli durante el periodo de cultivo

| Tratamiento | L*                        |               |              | C*            |              |              | hue           |               |               |
|-------------|---------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
|             | Periodo de cultivo (Días) |               |              |               |              |              |               |               |               |
|             | 0                         | 15            | 30           | 0             | 15           | 30           | 0             | 15            | 30            |
|             |                           |               |              |               |              |              |               |               |               |
| L8          | 67 ± 1.01 A               | 58.7 ± 0.6 A  | 59.8 ± 5.4 A | 47.8 ± 1.6 A  | 47.6 ± 0.4 A | 44.2 ± 2.7 A | 120.4 ± 0.4 B | 120.6 ± 0.2 C | 121.4 ± 8.5 A |
| L12         | 66.5 ±0.9 A               | 55.9 ± 0.6 B  | 51.1 ± 6.3 C | 45.7 ± 1.9 AB | 43.8 ± 0.4 B | 31.1 ± 5.2 D | 122.9 ± 0.4 A | 121.1 ± 0.2 B | 122.3 ± 6.4 A |
| L16         | 64.3±1 AB                 | 53.4 ± 0.6 C  | 60.3 ± 6.2 A | 41.6 ± 1.6 B  | 43.2 ± 0.4 B | 41.9 ± 6.2 B | 122.6 ± 0.4 A | 121.5 ± 0.2 B | 121.2 ± 1.7 A |
| L24         | 61.4±1 B                  | 54.7 ± 0.6 BC | 54.5 ± 5.8 B | 41.8 ± 1.6 B  | 41.9 ± 0.4 C | 54.5 ± 5.8 B | 122.7 ± 0.4 A | 122 ± 0.2 A   | 121.4 ± 1.8 A |
| C8          | 51 ± 1.9 AB               | 50.1 ± 1.1 A  | 40 ± 1.4 B   | 20 ± 1.2 B    | 37.9 ± 0.5 A | 20.9 ± 1.1 B | 93.3 ± 2.3 B  | 121.8 ± 0.3 A | 106.5 ± 1.8 B |
| C12         | 50.4 ± 1.7 AB             | 47.4 ± 1.4 B  | 49.8 ± 1.5 A | 30 ± 1.8 A    | 32.5 ± 0.9 B | 31.9 ± 1 A   | 117.9 ± 1.3 A | 119.9 ± 0.5 B | 119.9 ± 0.6 A |
| C16         | 55.9 ±2.3 A               | 40.4 ± 1.3 D  | 49.9 ± 1.5 A | 13.2 ± 1.2 C  | 23.9 ± 1.3 C | 32.8 ± 1.1 A | 116.8 ± 2.5 A | 112.3 ± 1.8 C | 120.6 ± 0.6 A |
| C24         | 49.2 ± 2.5 B              | 44.4 ± 1.4 C  | 49.2 ± 1.5 A | 7.6 ± 0.5 D   | 27.1 ± 1.3 C | 33.7 ± 0.9 A | 98.6 ± 3.7 B  | 112.4 ± 1.5 C | 120.8 ± 0.6 A |

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

El ángulo del tono por su parte, varió de forma considerable especialmente en el fotoperiodo de 8 h, donde cambia de 93.2 ° al inicio a 106.5 ° al día 30, reflejando un ajuste en la tonalidad que podría estar relacionado con la maduración del color. El ángulo del tono sugiere una modificación en la tonalidad hacia un tono rojo-morado conforme avanzaba el cultivo, el cual podría estar relacionado con la transición del color rojo en las hojas bajo fotoperiodos cortos.

La luminosidad en Carmoli, refleja que, fotoperiodos cortos tienden a intensificar el color oscuro en la planta, por otro lado, el incremento en la saturación sugiere un desarrollo en la intensidad del tono rojo en estos tratamientos, lo cual podría estar relacionado con la exposición prolongada a la luz que activa la síntesis de pigmentos que intensifican tonos rojos en las hojas. Demostrando que, en condiciones de luz limitada, variedades de lechuga con capacidad de cambio cromático tienden a ajustar su ángulo del tono hacia matices más rojos o morados en respuesta a la adaptación fotoperiódica (Hernández-Adasme 2023).

Fotoperiodos cortos tienden a favorecer la conservación de luminosidad manteniendo la apariencia fresca y clara de las hojas en Levistro, de igual manera en esta variedad los fotoperiodos prolongados suelen reducir la saturación de los pigmentos en las hojas, lo que podría explicar esta disminución en la saturación de Levistro bajo fotoperiodos más largos (Palsha et al. 2024).

Mientras tanto, la tonalidad verde se mantiene constante sin cambios significativos, indicando que, a pesar de las variaciones en la luminosidad y saturación, la tonalidad de esta variedad se mantiene uniforme, lo cual es característico en variedades de lechuga verde. Reflejando que, el ángulo de tono suele ser más uniforme en cultivos con tonos verdes, dado que la clorofila permanece activa en distintos fotoperiodos sin cambiar significativamente el color (Hernández-Adasme 2023).

## **5.2 Evaluaciones químicas de ambas variedades de lechuga**

Las evaluaciones químicas realizadas en esta investigación permitieron determinar el efecto de los fotoperiodos sobre la concentración de flavonoides totales y la capacidad antioxidante en las lechugas Carmoli y Levistro a lo largo del periodo de cultivo.

### **5.2.1 Capacidad Antioxidante (Método DPPH y FRAP)**

La Figura 13, muestra la capacidad antioxidante en las variedades de lechuga mediante el método FRAP y DPPH, evaluados a lo largo del periodo de cultivo.

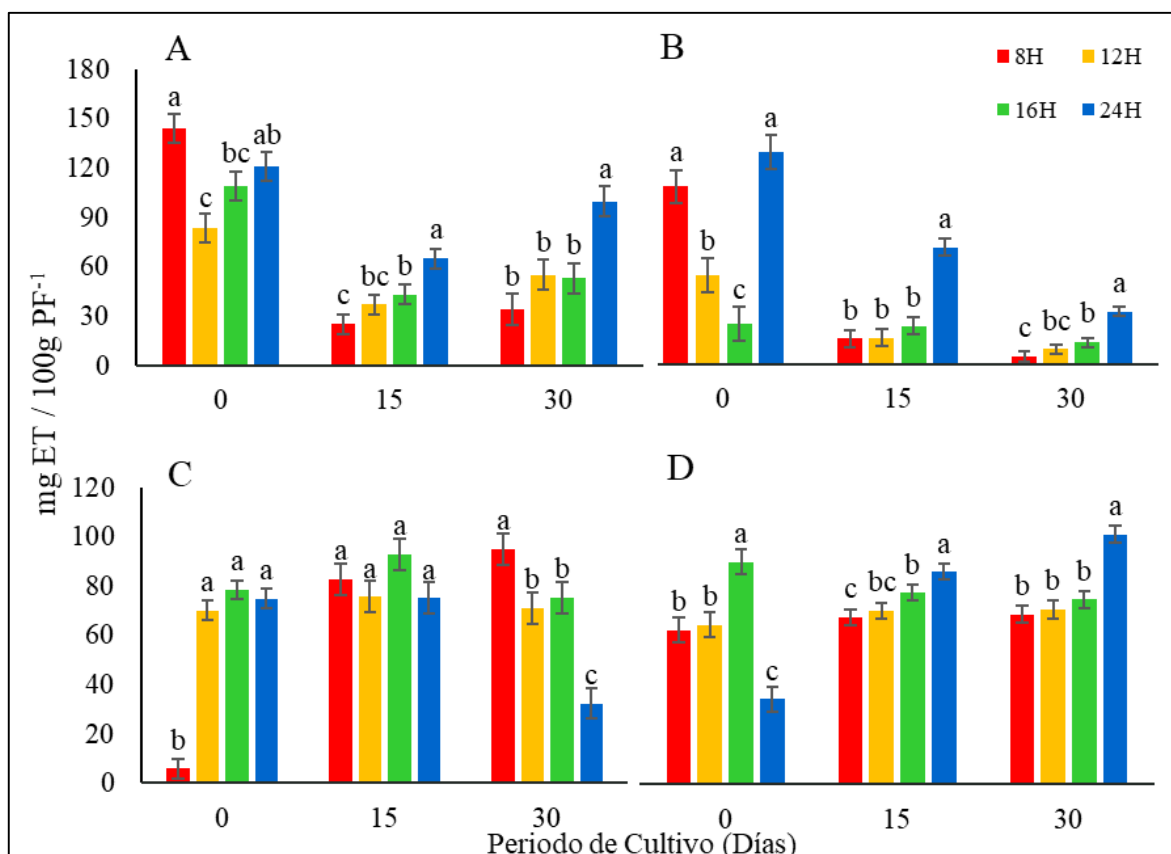
Para Levistro, el fotoperiodo de 24 h presentó los valores mayores de capacidad antioxidante inicial medida por DPPH ( $128.6 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$ ), disminuyendo a los 15 días y 30 días, aunque manteniéndose superior al resto de los tratamientos ( $71.1$  y  $32 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$ ), sin embargo, el fotoperiodo de 8 h también mostró un valor inicial alto ( $107.8 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$ ), aunque, se redujo drásticamente a lo largo del periodo de cultivo hasta llegar a concentraciones de  $4.5 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$ .

En cuanto a Carmoli, el fotoperiodo 8 h mostró valores más altos por DPPH al inicio ( $143.9 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$ ) disminuyendo considerablemente a los 15 y 30 días ( $25.3$  y  $34.2 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$ ), por otro lado, el fotoperiodo de 24 h presentó valores durante el periodo de cultivo equivalentes a  $120.8 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$  al inicio y manteniéndose con una concentración de  $99.7 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$  al finalizarlo.

Para la medición de la capacidad antioxidante por el método FRAP en Levistro, se revelaron valores significativamente más altos en el fotoperiodo de 16 h a los 0 días ( $89.3 \text{ mg ET} / 100\text{g PF}^{-1}$ ), a pesar de mostrar estos valores al inicio, el fotoperiodo de 24 h resultó tener un

incremento a partir de los 15 días (85.4 mg ET / 100g PF<sup>-1</sup>), donde a partir de esta etapa mantuvo a los 30 días concentraciones de 100.6 mg ET / 100g PF<sup>-1</sup>, indicando que pudo estimular la capacidad antioxidante en etapas avanzadas del cultivo.

Mientras tanto en Carmoli, se presentaron valores altos en casi todos los tratamientos desde 15 días, debido a que, al inicio el fotoperiodo de 8 h presentó valores inferiores (5.7 mg ET / 100g PF<sup>-1</sup>), a pesar de esto, a los 15 días, mantuvo concentraciones sin diferencias significativas a los demás fotoperiodos (82.8 mg ET / 100g PF<sup>-1</sup>), donde al finalizar el ciclo se estableció como el tratamiento significativamente con mayores concentraciones en comparación a los demás (94.9 mg ET / 100g PF<sup>-1</sup>).



**Figura 12.** Efecto del fotoperiodo sobre la capacidad antioxidante mediante los métodos DPPH (A y B) y FRAP (C y D) en las variedades de lechuga Carmoli (A y C) y Levistro (B y D).

En ambas variedades para el método DPPH, el fotoperiodo de 24 h es generalmente el que mantiene la mayor capacidad antioxidante, especialmente en etapas avanzadas, lo cual refleja que los fotoperiodos prolongados inducen mecanismos de defensa que aumentan la actividad antioxidante. Sin embargo, Carmoli responde de manera eficiente a fotoperiodos cortos (8 h) al inicio, indicando que puede activar una respuesta antioxidante rápidamente en condiciones de luz moderada, probablemente debido a una interacción más rápida entre sus sistemas de percepción de luz y metabolismo, mientras que, Levistro parece necesitar una exposición continua para alcanzar niveles elevados de antioxidantes (Hernández-Adasme et al. 2022).

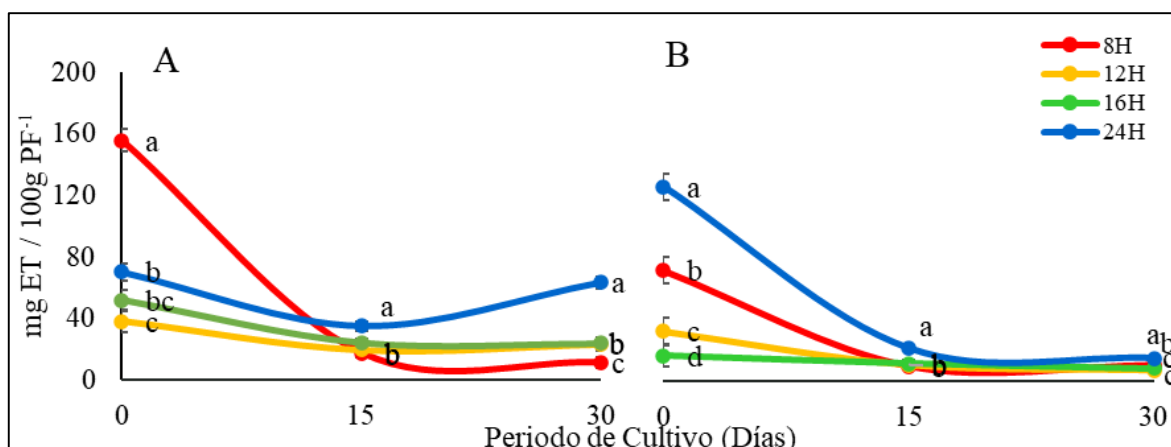
Aunque los resultados varían según el método empleado, ambos métodos destacan el fotoperiodo de 24 h como un tratamiento eficaz para incrementar la actividad antioxidante. Sin embargo, el método FRAP en Carmoli sugiere una respuesta menos dependiente de la duración del fotoperiodo, ya que esta variedad muestra valores altos incluso en fotoperiodos de 8 y 16 h, en concordancia con estudios que evidencian una variabilidad en la respuesta antioxidante en función de la variedad de lechuga (Hernández-Adasme 2023).

### **5.2.2 Contenido de flavonoides totales**

La Figura 14, muestra el contenido de flavonoides totales en las variedades de lechuga Carmoli y Levistro, evaluados a lo largo del periodo de cultivo.

En la variedad Levistro, al inicio del periodo de cultivo, el contenido de flavonoides presentó concentraciones significativamente más altas en el fotoperiodo 24 h (125.1 mg ERUT / 100g PF<sup>-1</sup>) en comparación con los demás tratamientos, que, durante todo el ciclo, presentaron concentraciones menores con respecto a 24 h. Siendo a los 15 días, una disminución general en todos los fotoperiodos, debido al ciclo normal y la redistribución de los flavonoides a lo largo de la planta, a pesar de esto el fotoperiodo 24 h se mantuvo concentraciones significativamente mayores de flavonoides igual a 21.3 mg ERUT / 100g PF<sup>-1</sup>

A los 30 días, el fotoperiodo de 24 h siguió manteniendo concentraciones significativamente más altas de flavonoides ( $14.9 \text{ mg ERUT} / 100\text{g PF}^{-1}$ ) en comparación con los fotoperiodos 8, 12 y 16 h ( $8.7 \pm 1.4 \text{ mg ERUT} / 100\text{g PF}^{-1}$ ), sugiriendo una respuesta constante ante el estrés generado por la exposición lumínica prolongada.



**Figura 13.** Efecto del fotoperiodo sobre el contenido de flavonoides totales en las variedades de lechuga Carmoli (A) y Levistro (B).

En cuanto a la variedad Carmoli, el fotoperiodo de 8 h muestra significativamente el mayor contenido de flavonoides ( $155.5 \text{ mg ERUT} / 100\text{g PF}^{-1}$ ) en comparación a los demás tratamientos al inicio del periodo de cultivo, indicando que esta variedad puede responder inicialmente a condiciones de menor luz con un incremento en estos compuestos como mecanismo de defensa, este comportamiento sugiere una rápida activación de respuestas antioxidantes en condiciones de luz cortas al inicio del cultivo reflejadas en la Figura 13.

A pesar que, a los 15 días todos los tratamientos presentaron una reducción moderada en sus concentraciones, el fotoperiodo de 24 h presentó una concentración de  $35.1 \text{ mg ERUT} / 100\text{g PF}^{-1}$ , siendo significativamente mayor en comparación a los demás tratamientos, posiblemente debido a la adaptación a la exposición a la luz continua, donde, a los 30 días, el fotoperiodo de 24 h nuevamente destaca con un aumento significativo en la concentración de flavonoides ( $63.5 \text{ mg ERUT} / 100\text{g PF}^{-1}$ ) en comparación a los demás tratamientos,

revelando que a través del periodo de cultivo su concentración se mantuvo en niveles más altos en comparación a los demás tratamientos.

El contenido de flavonoides al inicio del periodo de cultivo sugiere que, ambas variedades responden positivamente a la luz continua, en términos de acumulación de flavonoides, posiblemente debido a que la exposición prolongada estimulando la biosíntesis de estos compuestos como una estrategia antioxidante frente al estrés lumínico. En contraste, investigaciones reportan que en condiciones de espectro de luz azul-rojo, un fotoperiodo de 12 h suele inducir un incremento moderado de flavonoides en lechuga (Hernández-Adasme 2023).

Sin embargo, el fotoperiodo prolongado parece inducir en Carmoli una respuesta antioxidante persistente a largo plazo, provocando una acumulación sostenida bajo luz LED y fotoperiodos de 24 h en lechuga. Indicando también, que variedades de hojas verdes suelen responder favorablemente a la exposición continua (Hernández-Adasme et al. 2022). Esto sugiere que la exposición prolongada puede ayudar a mantener la acumulación de flavonoides a medida que la planta se adapta al estrés lumínico, debido a mecanismos que permiten a las plantas manejar el exceso de luz y los efectos negativos asociados, como la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Zoratti *et al.* 2014).

## **VI. CONCLUSIONES**

- Los fotoperiodos prolongados (16 y 24 h) favorecieron la acumulación de biomasa y mejoraron el rendimiento de la variedad Levistro en condiciones controladas.
- En la variedad Carmoli, fotoperiodos de 8 y 24 h promovieron la acumulación de biomasa en distintas etapas del periodo de cultivo, mostrando adaptabilidad a condiciones de luz extremas
- El fotoperiodo de 24 h favoreció el incremento en la concentración de flavonoides y la capacidad antioxidante en ambas variedades.
- En Carmoli, el fotoperiodo 24 h generó mayores concentraciones de los compuestos bioactivos al inicio y final del ciclo, mientras que en Levistro estimuló un aumento progresivo hacia el final del periodo.
- El fotoperiodo 24 h favoreció el rendimiento y contenido de compuestos bioactivos, presentando una mejor adaptación a la luz continua en Levistro, demostrando que, la exposición prolongada de luz equilibra el rendimiento y calidad, convirtiéndose en una herramienta efectiva para mejorar la producción en sistemas de agricultura controlada.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar más estudios en lechugas cultivadas en ambientes controlados para determinar las condiciones óptimas de luz, mediante la evaluación de diferentes parámetros de iluminación, con el objetivo de determinar el factor de mejor aprovechamiento en rendimientos.
- Se sugiere utilizar fotoperiodos cortos (8-12 h) en cultivos de lechuga durante las etapas iniciales del cultivo y prolongar su duración en las etapas finales, con el propósito de mejorar el crecimiento y la acumulación de biomasa.
- Se sugiere realizar mediciones sobre otros compuestos bioactivos, como carotenoides y vitamina C, para obtener una visión más completa de la calidad nutricional en ambas variedades de lechuga.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, H; Yu-Xin, T; Qi-Chang, Y. 2020. Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. South African Journal of Botany 130:75-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2019.12.018>.

Argente, L; Gonz  les, L;   vila, C; Aguilera, L. 2006. Cultivos tropicales comportamiento del contenido relativo de agua y la concentraci  n de pigmentos fotosint  ticos de variedades de trigo cultivadas en condiciones. Cultivos Tropicales. 27. 49  53. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215825008>

Avgoustaki, D; Vatsika, G; Giakoumatos, A; Bartzanas, T. 2024. How different daily light integrals and spectral treatments influence the development of Valerianella locusta plants grown in an indoor vertical farm. Scientia Horticulturae 332:113044. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2024.113044>.

Barbosa, G; Almeida Gadelha, FD; Kublik, N; Proctor, A; Reichelm, L; Weissinger, E; Wohlleb, GM; Halden, RU. 2015. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. International Journal of Environmental Research and Public Health 12(6):6879-6891. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>.

Chawla, R. 2023. Hydroponics: Growing the Future of Sustainable Farming Hydroponics: Growing the Future of Sustainable Farming Article ID: 44699. 05. s.l., s.e. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/376083444>.

Chiesa, A. 2010. Factores precosecha y postcosecha que inciden en la calidad de la lechuga. *Horticultura Argentina* 29 (68):28-32. Consultado 6 nov. 2024. Disponible en <https://www.horticulturaar.com.ar/en/pdf/61/lettuce-quality-as-affected-by-preharvest-and-postharvest.pdf>.

Ciriello, M; Formisano, L; Pannico, A; El-Nakhel, C; Fascella, G; Duri, LG; Cristofano, F; Gentile, BR; Giordano, M; Roupheal, Y; Fusco, GM; Woodrow, P; Carillo, P. 2021. Nutrient solution deprivation as a tool to improve hydroponics sustainability: Yield, physiological, and qualitative response of lettuce. *Agronomy* 11(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11081469>.

Endo, M; Naoya Fukuda; Yoshida, H; Kusano, M. 2022. Effects of light quality, photoperiod, CO<sub>2</sub> concentration, and air temperature on chlorogenic acid and rutin accumulation in young lettuce plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 186:290-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2022.07.010>.

Engler, N; Krarti, M. 2021. Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141:110786. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110786>.

Ezzahoui, I; Abdelouahid, RA; Taji, K; Marzak, A. 2021. Hydroponic and Aquaponic Farming: Comparative Study Based on Internet of things IoT technologies. *Procedia Computer Science* 191:499-504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.064>.

Folta, K; Childers, KS. 2008. Light as a Growth Regulator: Controlling Plant Biology with Narrow-bandwidth Solid-state Lighting Systems. *HortScience* 43:1957-1964. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1957>.

Goodman, W; Minner, J. 2019. Will the urban agricultural revolution be vertical and soilless? A case study of controlled environment agriculture in New York City. *Land Use Policy* 83:160-173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.038>.

Guo, M; Yang, G; Meng, X; Zhang, T; Li, C; Bai, S; Zhao, X. 2023. Illuminating plant–microbe interaction: How photoperiod affects rhizosphere and pollutant removal in constructed wetland? *Environment International* 179:108144. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2023.108144>.

Hata, N; Hayashi, Y; Okazawa, A; Ono, E; Satake, H; Kobayashi, A. 2012. Effect of photoperiod on growth of the plants, and sesamin content and CYP81Q1 gene expression in the leaves of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Environmental and Experimental Botany* 75:212-219. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2011.07.004>.

Hernández-Adasme, C. 2023. Efecto de la aplicación de espectros de luz sobre las características agronómicas, el comportamiento fisiológico y la calidad funcional de hojas de lechuga producidas hidropónicamente. Santiago, Universidad de Chile. Consultado 9 nov. 2024. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/198969/efecto-de-la-aplicacion-de-espectros-de-luz-sobre-las-caracteristicas-agronicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Hernández-Adasme, C; Palma-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* 9(4):493. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040493>.

Hernández-Adasme, C; Silva, H; Escalona, V. 2022. In-door germination and seedling growth of green and red lettuce under LED-light spectrum and subsequent effect on baby leaf lettuce. *Italian Journal of Agronomy* 17(2). DOI: <https://doi.org/10.4081/ija.2022.1982>.

Hernández-Adasme, C; Silva, H; Escalona, VH. 2022. Germination of green and red lettuce cultivars is influenced by LED light spectrum. *Acta Horticulturae* 1337(1337):361-366. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1337.49>.

Kelly, N; Choe, D; Meng, Q; Runkle, ES. 2020. Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod. *Scientia Horticulturae* 272:109565. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2020.109565>.

Kim, M; Moon, Y; Tou, JC; Mou, B; Waterland, NL. 2016. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis* 49:19-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2016.03.004>.

Kim, M; Moon, Y; Tou, J; Mou, B; Waterland, N. 2016. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis* 49:19-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2016.03.004>.

Lara, A; Rojas, A; Ramírez, H; Alcalá, J; Méndez, H; Romero, M. 2020. Respuesta fotosintética de lechuga hidropónica a relaciones de  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  en verano y otoño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43:565-573. Consultado 6 nov. 2024. Disponible en <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/43-4A/7a.pdf>.

Llorach, R; Martínez-Sánchez, A; Tomás-Barberán, FA; Gil, MI; Ferreres, F. 2008. Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry* 108(3):1028-1038. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2007.11.032>.

Mampholo, BM; Maboko, MM; Soundy, P; Sivakumar, D. 2016. Phytochemicals and Overall Quality of Leafy Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Varieties Grown in Closed Hydroponic System. *Journal of Food Quality* 39(6):805-815. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfq.12234>.

Materska, M; Olszówka, K; Chilczuk, B; Stochmal, A; Pecio, Ł; Pacholczyk-Sienicka, B; Piacente, S; Pizza, C; Masullo, M. 2019. Polyphenolic profiles in lettuce (*Lactuca sativa* L.) after CaCl<sub>2</sub> treatment and cold storage. *European Food Research and Technology* 245(3):733-744. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3195-0>.

Matsuda, R; Ozawa, N; Fujiwara, K. 2014. Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences. *Scientia Horticulturae* 170:150-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2014.03.014>.

Mejía de Tafur, MS; Burbano Diaz, RA; Garcia Davila, MA. 2014. Respuesta fotosintética del *Eucalyptus grandis* a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica* 63(4):311-317. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v63n4.43598>.

Moreno, B; Corrado, G; Zhang, L; Senizza, B; Righetti, L; Bruni, R; El-Nakhel, C; Sifola, MI; Pannico, A; De Pascale, S; Rouphael, Y; Lucini, L. 2020. The metabolic reprogramming induced by sub-optimal nutritional and light inputs in soilless cultivated green and red butterhead lettuce. *International Journal of Molecular Sciences* 21(17):1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21176381>.

Muller, A; Ferré, M; Engel, S; Gattinger, A; Holzkämper, A; Huber, R; Müller, M; Six, J. 2017. Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture? *Land Use Policy* 69:102-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2017.09.014>.

Nemali, K. 2022. History of Controlled Environment Horticulture: Greenhouses. *In* HortScience. s.l., American Society for Horticultural Science. p. 239-246 DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16160-21>.

Palsha, P Lou; van Iersel, MW; Dickson, RW; Seymour, L; Yelton, M; Ferrarezi, RS. 2024. Morphological and Physiological Changes of Hydroponic Lettuce Grown in Varying Potassium Concentrations and an Adaptive Lighting Control System. HortScience 59(8):1097-1105. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17806-24>.

Partap, M; Sharma, D; HN, D; Thakur, M; Verma, V; Ujala; Bhargava, B. 2023. Microgreen: A tiny plant with superfood potential. Journal of Functional Foods 107:105697. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2023.105697>.

Paterlini, H; González, MV; Picone, LI. 2004. Phenolics contribute significantly to higher antioxidant activity of red lettuce compared to green lettuce. Helsinki, Finlandia, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo:273-278. Consultado 7 nov. 2024. Disponible en [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672019000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672019000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=).

Ramos, Y; Ramírez, E. 2016. Development of an artificial LED lighting system for indoor farming (en línea). 80(2):111-33120. Disponible en <http://media.clemson.edu/public/restoration/>.

Rouphael, Y; Carderelli Mariateresa; Leonardi, C; Giuffrida, F; Colla, G. 2012. Vegetable quality as affected by genetic, agronomic and environmental factors. Food Agriculture and Environment 10:680-688. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/235799237>.

SAN. (2018). Plan de Acción por la Nutrición de Honduras (PANH- 2030) (en línea). s.l., s.e. Consultado 7 nov. 2024. Disponible en <https://faolex.fao.org/docs/pdf/hon200569anx2.pdf>.

Sardare, MD; Admane, S V. 2019. A REVIEW ON PLANT WITHOUT SOIL-HYDROPONICS. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/331731460>.

Sharma, A; Hazarika, M; Heisnam, P; Pandey, H; Devadas, VS; Wangsu, M. 2024. Controlled Environment Ecosystem: A plant growth system to combat climate change through soilless culture. Crop Design 3(1):100044. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CROPD.2023.100044>.

Shi, M; Gu, J; Wu, H; Rauf, A; Emran, T Bin; Khan, Z; Mitra, S; Aljohani, ASM; Alhumaydhi, FA; Al-Awthan, YS; Bahattab, O; Thiruvengadam, M; Suleria, HAR. 2022. Phytochemicals, Nutrition, Metabolism, Bioavailability, and Health Benefits in Lettuce—A Comprehensive Review. Antioxidants 11(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11061158>.

Sukhova, E; Khlopkov, A; Vodeneev, V; Sukhov, V. 2020. Simulation of a nonphotochemical quenching in plant leaf under different light intensities. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics 1861(2):148138. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BBABIO.2019.148138>.

Sularz, O; Koronowicz, A; Smoleń, S; Kowalska, I; Skoczylas, Ł; Liszka-Skoczylas, M; Tabaszewska, M; Pitala, J. 2021. Anti- And pro-oxidant potential of lettuce (*Lactuca sativa* L.) biofortified with iodine by KIO<sub>3</sub>, 5-iodo- And 3,5-diiodosalicylic acid in human gastrointestinal cancer cell lines. RSC Advances 11(44):27547-27560. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1ra04679a>.

Talbot, MH; Monfet, D. 2024. Development of a crop growth model for the energy analysis of controlled agriculture environment spaces. Biosystems Engineering 238:38-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2023.12.012>.

Thoma, F; Schlehuber, D; Somborn, A; Keuter, V. 2024. How does supplementary green light and UV-radiation affect biomass and rutin content in *Levisticum officinale*?. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1322443>.

Tomasi, N; Pinton, R; Dalla Costa, L; Cortella, G; Terzano, R; Mimmo, T; Scampicchio, M; Cesco, S. 2015. New 'solutions' for floating cultivation system of ready-to-eat salad: A review. *Trends in Food Science & Technology* 46(2):267-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2015.08.004>.

Wilson, PE; Morrison, SC; Hedges, LJ; Kerkhofs, NS; Lister, CE. 2004. Phenolics contribute significantly to higher antioxidant activity of red lettuce compared to green lettuce. s.l., In *Proceedings of the XXII International Conference on Polyphenols*. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/266146321>.

Zhang, Y; Xiao, Z; Ager, E; Kong, L; Tan, L. 2021. Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods* 1(1):58-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFUTFO.2021.07.001>.

Zhen, S; Kusuma, P; Bugbee, B. 2024. Photons at the ultraviolet-visible interface: Effects on leaf expansion and photoinhibition. *Scientia Horticulturae* 326:112785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112785>.

Zheng, L; Van Labeke, M-C. 2018. Effects of different irradiation levels of light quality on *Chrysanthemum*. *Scientia Horticulturae* 233:124-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.033>.

Zoratti, L; Karppinen, K; Luengo Escobar, A; Häggman, H; Jaakola, L. 2014. Light-controlled flavonoid biosynthesis in fruits. *Frontiers in Plant Science* 5. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00534>.

## ANEXOS



**Anexo 1.** Preparación de condiciones de cultivo.



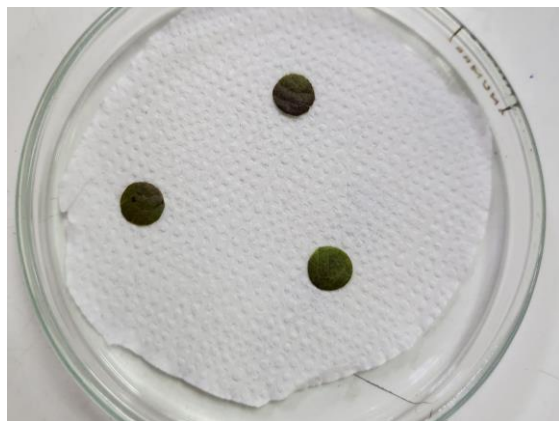
**Anexo 2.** Siembra de ambas variedades de lechuga.



**Anexo 4.** Ajuste de solución nutritiva.



**Anexo 3.** Medición de altura.



**Anexo 5.** Recorte de hojas para medir CRA.



**Anexo 6.** Coloración de las variedades de lechuga al momento del trasplante.



**Anexo 8.** Coloración de las variedades de lechuga a los 30 días.



**Anexo 7.** Toma de muestras de las variedades Levistro y Carmoli.



**Anexo 9.** Medición del espectro lumínico.