

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Influencia de la iluminación LED en el desarrollo y rendimiento
de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de
invernadero, Huanta, Ayacucho - 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Arturo BAUTISTA ORELLANA

ASESOR:

Ing. Msc. FEDERICO QUICAÑO SUÁREZ

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

A Dios, fuente inagotable de la vida,
salud y sabiduría, por ser la guía
constante en mi camino y darme la
fortaleza para enfrentar cada desafío.

A mi familia, mamita a mi papito y a mis
hermano y enamorada, por su gran sacrificio y
apoyo incondicional en mi formación
profesional.

AGRADECIMIENTO

Mis sentimientos de gratitud por la Universidad Nacional de San Cristóbal Huamanga y la carrera de Ingeniería Agrícola, quien me brindó la oportunidad de lograr gran aprendizaje en la vida profesional. Me gustaría agradecer a mis profesores, ya que, sin su dedicación, duro trabajo y dirección constante, no podría alcanzar mi logro profesional. Gracias a ustedes, fui capaz de adquirir las habilidades necesarias para superar los desafíos profesionales con confianza. Además, mi aprecio indudablemente para toda mi familia y amigos, ya que su amor, apoyo y la fe en mí fueron la fuerza que me ayudaron a superar todos los problemas. Les dedico este logro a mis amigos quienes siempre me brindaron la mejor compañía y apoyo. Gracias miles, queridos amigos y familiares.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
Objetivos.....	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
CAPÍTULO I.....	13
MARCO TEÓRICO	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Bases teóricas	14
1.2.1 Iluminación con LED	14
1.2.2	La
luz.....	15
1.2.3 La luz y su importancia en el desarrollo vegetal	15
1.2.4 Iluminación en la hortícola	17
1.2.5 Luz en los procesos fisiológicos de las plantas.	18
1.2.6 Iluminación artificial en la agricultura	20
1.2.7 Historia y evolución de la iluminación artificial	21
1.2.8 Iluminación LED y otras fuentes de luz	22
1.2.9 Ventajas de la iluminación LED en la agricultura	23
1.2.10 Aplicaciones en cultivos	24
1.2.11 Características del LED	25
1.2.12 Tipos de LED	26
1.2.13 Producción en ambiente protegido	27
1.2.14 Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	27
1.2.15 Ventajas del cultivo en invernaderos	29
1.2.16 Impacto de la iluminación LED en el cultivo de lechuga	30
1.2.17 El rendimiento en cultivos	30
1.2.18 El rendimiento en cultivos de lechuga	30

1.2.19 Fotoperiodismo en lechuga	30
1.2.20 Eficiencia de uso de la luz (LUE)	31
1.2.21 Calidad nutricional bajo diferentes espectros de luz	31
1.2.22 Modelos de crecimiento bajo LED	32
1.2.23 Balance energético y sostenibilidad	32
CAPÍTULO II.....	33
MATERIALES Y MÉTODO	33
2.1 Ubicación	33
2.1.1 Ubicación política	33
2.1.2 Ubicación geográfica	33
2.1.3 Límites.....	35
2.1.4 Vías de acceso	36
2.2 Materiales y equipos	36
2.2.1 Materiales para el proyecto	36
2.2.2 Equipos para el proyecto	36
2.3 Metodología	37
2.3.1 Implementación del invernadero	37
2.3.2 Sistema de iluminación	37
2.3.3 Sistema de riego	39
2.3.4 La germinación de las semillas	40
2.3.5 Trasplante	41
2.3.6 Control fitosanitario	43
2.3.7 Fertilización	44
2.3.8 Cosecha	48
2.3.9 Condiciones ambientales del invernadero	49
2.3.10 Técnicas de recolección y análisis de datos	49
2.3.11 Instrumentos de medición	50
2.3.12 Procedimiento de manejo del cultivo	50
2.3.13 Análisis de datos	51
2.4 Marco del estudio	51
2.4.1 Diseño experimental	51
2.5 Población, muestra y muestreo	51
2.5.1 Población	51
2.5.2 Muestra.....	52
2.5.3 Muestreo	52
2.5.4 Procedimientos Experimental	52

2.5.5 Determinar la influencia de la iluminación LED en la tasa de crecimiento de la lechuga.....	53
2.5.6 Comparar la productividad de cultivos de lechuga bajo iluminación LED frente a iluminación convencional.....	63
CAPÍTULO III.....	68
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
3.1 Resultados.....	68
3.1.1 Determinar la influencia de la iluminación LED en la tasa de crecimiento de la lechuga.....	68
3.1.2 Comparar la productividad de lechugas cultivadas con iluminación LED y luz natural.....	76
3.2. Discusiones.....	80
CAPÍTULO IV.....	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
4.1 Conclusiones.....	81
4.2 Recomendaciones.....	82
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Composición nutricional de la lechuga por 100 g.....	29
Tabla 2	Límites geográficos de la provincia de Huanta.....	35
Tabla 3	Vías de acceso de la provincia de Huanta.....	36

Tabla 4	<i>Cantidad objetivo de nutrientes para preparar 200 L de solución</i>	45
Tabla 5	<i>Esquema del diseño experimental</i>	51
Tabla 6	<i>Especificaciones de iluminación por sección</i>	56
Tabla 7	<i>Grupos de tratamientos</i>	68
Tabla 8	<i>Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)</i>	69
Tabla 9	<i>Registro semanal - Tratamiento B: Led Azul (450 nm)</i>	69
Tabla 10	<i>Registro semanal - Tratamiento C: Led Red (660 nm)</i>	70
Tabla 11	<i>Crecimiento semanal bajo iluminación LED de color Rojo y Azul y luz natural</i> 71	
Tabla 12	<i>Comparativa de peso fresco (g) - Cosecha final</i>	72
Tabla 13	<i>Comparativa de diámetro de roseta (cm)</i>	73
Tabla 14	<i>Tasas de crecimiento en altura según etapa fenológica</i>	75
Tabla 15	<i>Cálculo de parámetros de crecimiento</i>	76
Tabla 16	<i>Productividad por tubería de invernadero</i>	78
Tabla 17	<i>Ecuaciones de regresión lineal para altura de planta</i>	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Circuito básico de iluminación LED con interruptor</i>	14
Figura 2	<i>Espectro electromagnético y luz visible</i>	15

<i>Figura 3</i>	<i>Tendencia de producción y área cosechada</i>	16
<i>Figura 4</i>	<i>Espectros de luz azul profunda y roja intensa</i>	17
<i>Figura 5</i>	<i>Esquema de la fotofosforilación en la fotosíntesis</i>	18
<i>Figura 6</i>	<i>Proceso de fotosíntesis del cultivo</i>	19
<i>Figura 7</i>	<i>Procesos de fotofosforilación cíclica y no cíclica en la fotosíntesis</i>	20
<i>Figura 8</i>	<i>Cultivo en interiores con iluminación LED</i>	21
<i>Figura 9</i>	<i>Estrategias de iluminación LED en agricultura protegida</i>	22
<i>Figura 10</i>	<i>Sistema de cultivo con iluminación LED</i>	23
<i>Figura 11</i>	<i>Efectos de diferentes espectros de luz LED</i>	24
<i>Figura 12</i>	<i>Temperatura de color en luces LED</i>	25
<i>Figura 13</i>	<i>Tipos de tecnología LED</i>	26
<i>Figura 14</i>	<i>Cultivo vertical en invernaderos con iluminación LED</i>	28
<i>Figura 15</i>	<i>Influencia del espectro de luz en el crecimiento de las plantas</i>	31
<i>Figura 16</i>	<i>Mapa departamental del proyecto</i>	33
<i>Figura 17</i>	<i>Mapa provincial del proyecto Huanta</i>	34
<i>Figura 18</i>	<i>Mapa distrital del proyecto Huanta</i>	34
<i>Figura 19</i>	<i>Mapa de intervención del proyecto</i>	35
<i>Figura 20</i>	<i>Espectro combinado de luz azul</i>	38
<i>Figura 21</i>	<i>Espectro combinado de luz roja</i>	39
<i>Figura 22</i>	<i>El monitoreo de germinación</i>	41
<i>Figura 23</i>	<i>Trasplante de las plántulas</i>	42
<i>Figura 24</i>	<i>Trasplante de las plántulas</i>	42
<i>Figura 25</i>	<i>Control fitosanitario</i>	44
<i>Figura 26</i>	<i>Sistema de fertirrigación en tanques de 200 L</i>	47
<i>Figura 27</i>	<i>Sistema de fertirrigación en tanques de 200 L</i>	47
<i>Figura 28</i>	<i>Cosecha de la lechuga</i>	48
<i>Figura 29</i>	<i>Esquema de la distribución del invernadero</i>	53
<i>Figura 30</i>	<i>Proceso de siembra en bandejas</i>	54

<i>Figura 31</i>	<i>Proceso de siembra en bandejas</i>	55
<i>Figura 32</i>	<i>Distribución de plántulas en el invernadero</i>	57
<i>Figura 33</i>	<i>Fertilización aplicación de nutrientes</i>	58
<i>Figura 34</i>	<i>Fertilización aplicación de nutrientes</i>	58
<i>Figura 35</i>	<i>Altura de lechuga en etapa de cosecha</i>	60
<i>Figura 36</i>	<i>Número de hojas de la lechuga en etapa de desarrollo</i>	61
<i>Figura 37</i>	<i>Diámetro de las lechugas en etapa de cosecha</i>	61
<i>Figura 38</i>	<i>Peso fresco de la lechuga</i>	62
<i>Figura 39</i>	<i>Peso seco de la lechuga</i>	63
<i>Figura 40</i>	<i>Longitud de la lechuga en etapa de cosecha</i>	64
<i>Figura 41</i>	<i>Lechuga para cosechar del tratamiento de luz azul</i>	65
<i>Figura 42</i>	<i>Lechuga para cosechar del tratamiento de luz Rojo</i>	65
<i>Figura 43</i>	<i>Registro del peso de lechuga fresca cosechada</i>	66
<i>Figura 44</i>	<i>Registro del peso de lechuga fresca cosechada</i>	67
<i>Figura 45</i>	<i>Crecimiento semanal bajo iluminación LED y luz natural</i>	71
<i>Figura 46</i>	<i>Comparativa de peso fresco (g) - Cosecha final</i>	72
<i>Figura 47</i>	<i>Comparativa de diámetro de roseta (cm)</i>	74
<i>Figura 48</i>	<i>Tasas de crecimiento en altura según etapa fenológica</i>	75
Figura 49	<i>Tasas de crecimiento en altura según etapa fenológica</i>	77
Figura 50	<i>Rendimiento en biomasa bajo iluminación LED y luz natural.</i>	78
Figura 51	<i>Crecimiento semanal bajo iluminación LED y luz natural</i>	79

RESUMEN

La investigación tuvo como propósito analizar el efecto de la iluminación LED roja (660 nm) y azul (450 nm) sobre el crecimiento y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Green Leaf, en comparación con la iluminación natural, en un invernadero ubicado en Huanta, Ayacucho. Se aplicó un enfoque experimental cuantitativo utilizando 150 plantas distribuidas en tres tratamientos (n=50): luz natural como control, iluminación LED azul e iluminación LED roja. Las condiciones de trabajo incluyeron una intensidad lumínica de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, una potencia de 48 W y un fotoperiodo nocturno de 12 horas.

Los resultados evidenciaron que la iluminación LED roja favoreció significativamente el desarrollo del cultivo, alcanzando una altura final de 47,5 cm y una velocidad de crecimiento de 1,34 cm/día, valores superiores al tratamiento control (33,3 cm y 1,11 cm/día) y al tratamiento con LED azul, el cual produjo plantas más compactas (31,5 cm y 0,99 cm/día). En relación con la productividad, el peso fresco final bajo iluminación roja fue de 127,1 g, mostrando un incremento significativo del 30% ($p < 0,01$) respecto al control, que obtuvo 97,8 g; mientras que el LED azul registró 112,4 g, equivalente a un aumento del 15%. Asimismo, el espectro rojo incrementó el diámetro de la roseta (31,5 cm frente a 22,1 cm) y el número de hojas (19 frente a 14). A nivel del sistema de producción, la proyección anual por tubería con LED rojo alcanzó 34,98 kg, superando en 8,03 kg al sistema con luz natural.

Se concluye que la iluminación LED ejerce un efecto favorable en el cultivo de lechuga, destacándose el espectro rojo como la opción tecnológica más eficiente para incrementar la biomasa comercial y reducir el tiempo del ciclo vegetativo en los invernaderos de la región.

Palabras clave: iluminación LED; *Lactuca sativa*; invernadero; productividad; Huanta.

ABSTRACT

The aim of this research was to assess the effect of red (660 nm) and blue (450 nm) LED lighting on the growth and yield of Green Leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) compared to natural light conditions in a greenhouse located in Huanta, Ayacucho. A quantitative experimental design was implemented using 150 plants distributed into three treatments (n=50): natural light as control, blue LED lighting, and red LED lighting. The experimental conditions included a light intensity of 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a power of 48 W, and a 12-hour nocturnal photoperiod.

The findings revealed that red LED lighting significantly enhanced crop development, achieving a final plant height of 47.5 cm and a growth rate of 1.34 cm/day, outperforming both the control treatment (33.3 cm and 1.11 cm/day) and the blue LED treatment, which generated more compact plants (31.5 cm and 0.99 cm/day). In terms of productivity, the final fresh weight under red LED lighting reached 127.1 g, representing a significant increase of 30% ($p < 0.01$) compared to the control group with 97.8 g, while blue LED lighting produced 112.4 g, corresponding to a 15% increase. Likewise, the red spectrum improved rosette diameter (31.5 cm versus 22.1 cm) and leaf number (19 versus 14). At the production system level, the estimated annual yield per pipe under red LED lighting reached 34.98 kg, exceeding natural light production by 8.03 kg.

It is concluded that LED lighting positively affects lettuce cultivation, with the red spectrum representing the most effective technological alternative to maximize commercial biomass and accelerate the vegetative cycle in greenhouse production systems in the region.

Keywords: LED lighting; *Lactuca sativa*; greenhouse; productivity; Huanta.

INTRODUCCIÓN

La luz constituye un factor esencial en la producción agrícola, debido a que participa de manera directa en procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis, la fotomorfogénesis y el control de la floración. A través de la energía lumínica, las plantas convierten el agua y el dióxido de carbono en glucosa y oxígeno, permitiendo así su crecimiento, desarrollo y permanencia (Rangel, 2015).

Además de su función energética, la luz influye en la regulación morfológica de las plantas mediante la fotomorfogénesis, interviniendo en procesos como la germinación, el alargamiento de tallos y la formación de hojas. En los sistemas de agricultura protegida, especialmente en invernaderos, la iluminación artificial cumple la función de complementar o reemplazar la luz natural en zonas con limitada radiación solar o durante estaciones con menor disponibilidad lumínica. En este contexto, las lámparas tradicionales fluorescentes y de sodio de alta presión han sido gradualmente sustituidas por la tecnología de diodos emisores de luz (LED), reconocida por su mayor eficiencia (Flores, 2021).

La iluminación LED ha generado importantes avances en la agricultura moderna gracias a su bajo consumo energético y a la posibilidad de adaptar el espectro de luz según las necesidades fisiológicas de los cultivos en cada etapa de desarrollo. A diferencia de otros sistemas de iluminación, los LEDs producen escaso calor, reduciendo el estrés térmico en las plantas y disminuyendo la necesidad de mecanismos adicionales de enfriamiento, lo que favorece un uso más eficiente de los recursos (Gonzales & Ramírez, 2016). Diversos estudios han demostrado que esta tecnología favorece el crecimiento vegetativo y mejora la calidad nutricional de hortalizas de hoja, como la lechuga, incrementando compuestos beneficiosos para la salud.

Sin embargo, para lograr resultados óptimos en el uso de iluminación LED es necesario realizar una adecuada planificación técnica, considerando la selección del espectro lumínico más apropiado según la etapa fenológica del cultivo. Asimismo, esta tecnología debe complementarse con un manejo adecuado de variables ambientales, tales como temperatura, humedad y nutrición mineral, a fin de asegurar un desarrollo vegetal eficiente y saludable (Mulato, 2023).

En la región Ayacucho, el cultivo de lechuga está orientado principalmente al abastecimiento local y al autoconsumo, destacando iniciativas hidropónicas con producción relevante de variedades como crespa (60 %), seda (30 %) y morada (10 %). Actualmente, diversas iniciativas regionales promueven la implementación de

microreservorios e invernaderos familiares en provincias como Huanta, Huamanga y La Mar, con el propósito de fortalecer la seguridad alimentaria y enfrentar la limitada disponibilidad hídrica. Estas acciones impulsan el desarrollo de una agricultura sostenible y autosuficiente dentro de programas de agricultura familiar (Pérez, 2021).

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar la influencia de la iluminación LED en el desarrollo y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de invernadero en Huanta, Ayacucho.

Objetivos específicos

- Determinar la influencia de la iluminación LED en la tasa de crecimiento de la lechuga.
- Comparar la productividad de cultivos de lechuga bajo iluminación LED frente a iluminación convencional.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes regionales

Pérez (2021), en un estudio desarrollado en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en Ayacucho, analizó el rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Grandes Lagos en la zona de Canaán, ubicada a 2750 m s. n. m. La investigación estuvo orientada a evaluar diferentes dosis de guano de islas y potasio, concluyendo que un adecuado manejo técnico en las condiciones altitudinales de Ayacucho permite incrementar notablemente la productividad comercial del cultivo. Este antecedente sirve como referencia para la presente investigación, debido a que proporciona parámetros base de rendimiento en condiciones ambientales similares, sobre los cuales se analiza la incorporación de tecnología LED.

1.1.2 Antecedentes nacionales

Mulato (2023), en la Universidad Nacional de Huancavelica, estudió el efecto de la iluminación LED en la producción hidropónica de lechuga cultivada bajo invernadero. La investigación utilizó un diseño completamente al azar (DCA), comparando iluminación LED roja y azul frente a un tratamiento control sin iluminación artificial. Los resultados evidenciaron que el espectro rojo presentó mayor efectividad, alcanzando alturas promedio de 27 cm y pesos frescos de 228 g luego de 30 días de cultivo. El autor concluyó que la luz LED roja favorece significativamente el rendimiento en sistemas de producción controlados, validando el uso de esta tecnología en regiones altoandinas del país.

1.1.3 Antecedentes internacionales

Ángeles (2023), en una tesis de maestría realizada en la Universidad Autónoma Chapingo de México, evaluó el efecto de la iluminación LED complementaria en dos sistemas hidropónicos cerrados. Los resultados demostraron que esta tecnología genera efectos positivos en el desarrollo de las plantas, mejorando el peso fresco, la biomasa total y el número de hojas. Además, el estudio resalta que la iluminación LED resulta especialmente eficiente en condiciones de limitada radiación natural, favoreciendo una agricultura sostenible y de precisión.

Jiménez (2016), de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador, comparó el comportamiento de diferentes cultivares de lechuga bajo lámparas LED de 150 W y 135 W, así como bajo iluminación fluorescente. Los hallazgos señalaron que las lámparas LED de 150 W favorecieron el crecimiento en altura y longitud de hoja. Sin embargo, el

autor advirtió que la intensidad y el tipo de luz influyen directamente en la morfología de la planta, recomendando un control adecuado para evitar la etiolación.

Guillén et al. (2017), en Panamá, analizaron el efecto de las luces LED sobre el desarrollo y la calidad nutricional de la lechuga en ambientes controlados. Mediante sistemas hidropónicos con iluminación LED combinada, demostraron que esta tecnología mejora el crecimiento vegetal y optimiza la calidad nutricional del producto final. Asimismo, el modelo implementado mostró mayor eficiencia en el uso de agua y energía, constituyéndose como una alternativa viable para sistemas hortícolas urbanos y automatizados.

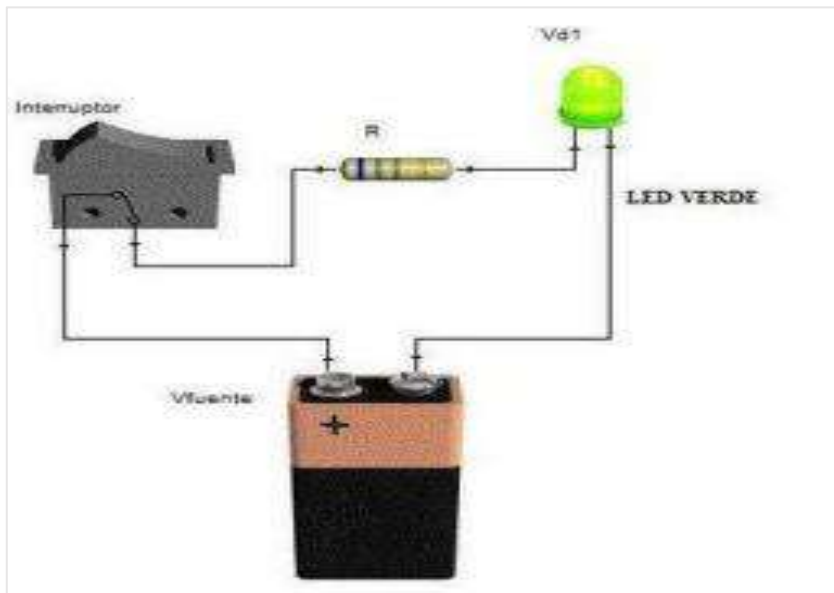
1.2 Bases teóricas

1.2.1 Iluminación con LED

Para que los LEDs funcionen correctamente, necesitan una tensión específica conocida como tensión de polarización. Si esta tensión se supera, el diodo puede dañarse, ya que su resistencia disminuye, lo que provoca un aumento excesivo de la corriente. Por esta razón, es fundamental utilizar una resistencia que limite la cantidad de corriente que pasa a través del diodo, protegiéndolo y asegurando su funcionamiento adecuado (Torre, 2014).

Figura 1

Circuito básico de iluminación LED con interruptor



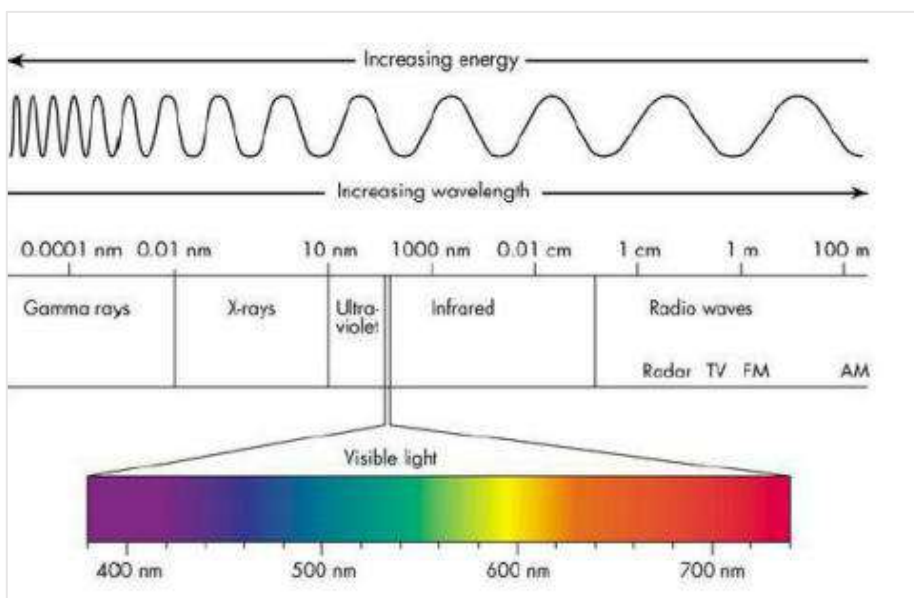
En la figura 1 muestra un diagrama de un circuito básico que incluye un LED verde, una resistencia (R), un interruptor y una fuente de alimentación (batería). Este circuito permite controlar la activación del LED mediante el interruptor, limitando la corriente con la resistencia para proteger el diodo.

1.2.2 La luz

La principal fuente de energía de los ecosistemas es la luz solar, que las plantas adquieren mediante la fotosíntesis. A continuación, la energía se almacena en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas mediante la fotosíntesis. El conjunto de energía electromagnética que emite el sol se conoce como radiación solar. El sol emite energía electromagnética que se desplaza a 300.000 km/s a la velocidad de la luz. El espectro de la radiación solar incluye energía ultravioleta e infrarroja. La luz que es visible para el ojo humano en su núcleo, a la radiación ultravioleta (Roldán & Ramírez, 2008).

Figura 2

Espectro electromagnético y luz visible



En la figura 2 se muestra un diagrama que representa el espectro electromagnético, mostrando la relación entre la energía, longitud de onda y las diferentes formas de radiación, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio.

1.2.3 La luz y su importancia en el desarrollo vegetal

La luz es esencial para la fotosíntesis, el proceso en el que las plantas transforman la energía lumínica en compuestos orgánicos indispensables para su crecimiento. La calidad de la luz, determinada por su espectro, impacta directamente en la eficiencia fotosintética y en el desarrollo morfológico de las plantas. Por ejemplo, la luz azul estimula el crecimiento vegetativo (Flores, 2021).

desde hace más de 12.000 años, cuando aparecieron los primeros métodos agrícolas en diversas partes del mundo (Stanghellini et al., 2019).

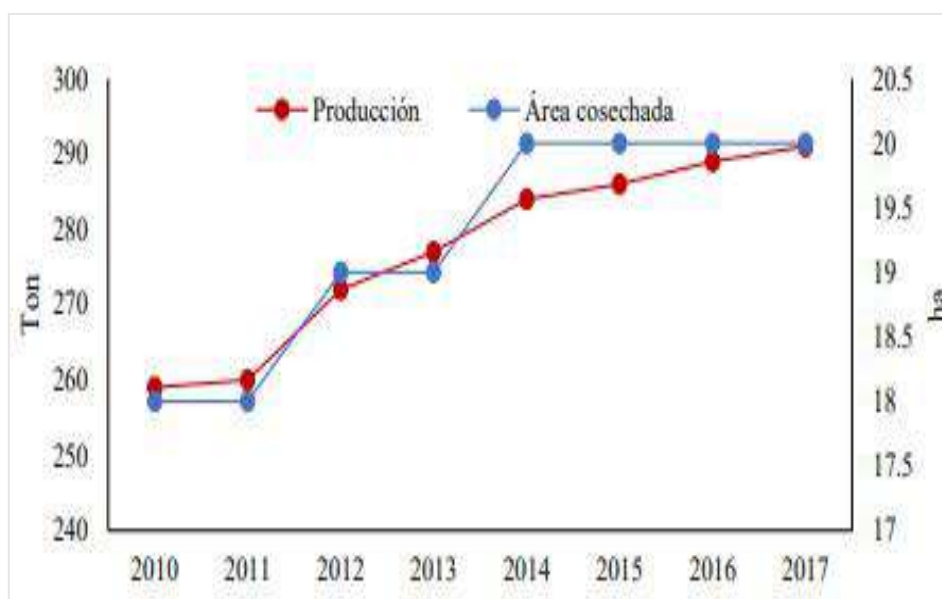
Hace 12.000 años Stanghellini et al. (2019) se intentó mejorar el medio ambiente para aumentar el rendimiento agrícola. Además, se buscaron sustitutos para que los alimentos producidos fueran más sanos sin cambiar su composición. Las prácticas agrícolas mesoamericanas vieron el desarrollo de métodos novedosos para aumentar el rendimiento de los cultivos.

La escasez de alimentos provocada por el crecimiento demográfico impulsó el desarrollo de métodos novedosos para aumentar la producción de los cultivos (Duffetel, 2008). Con el fin de encontrar soluciones agrícolas que fueran eficaces para diversos cultivos hortícolas, se utilizó esta estrategia con las chinampas, que eran formaciones de suelo sobre lagos (Baca, 1983; Ebel, 2020). Se decidió incluir a las chinampas en el escudo nacional por su importante contribución al avance de los métodos agrícolas y al abastecimiento de alimentos de México. En el artículo 2 de la Ley sobre el Escudo, la Bandera y el Himno Nacionales se hace referencia a las chinampas como pepa (DOF, 1984).

Sobre un lago, la chinampa es una roca de la que crecen un vegetal llamado nopal (*Opuntia ficus-indica*) y un cactus (*Opuntia ficus-indica*). La agricultura mundial se ha expandido en los últimos años; según la producción de hortalizas frescas (t) y la superficie cosechada (ha) han aumentado un 11%.

Figura 3

Tendencia de producción y área cosechada



En la figura 3 se tiene un gráfico de líneas que muestra la evolución de la producción (en toneladas) y el área cosechada (en hectáreas) desde 2010 hasta 2017.

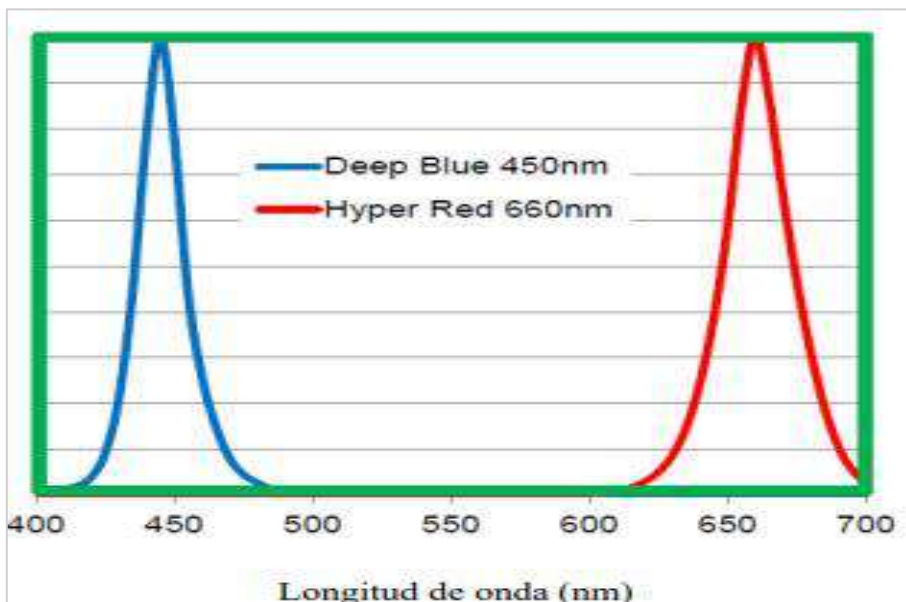
1.2.4 Iluminación en la hortícola

La cantidad de luz tiene tres efectos en el crecimiento de las plantas: interfiere en la capacidad de la planta para hacer la fotosíntesis. El proceso de fotosíntesis en las plantas es una reacción fotoquímica que se produce dentro de los cloroplastos de las células vegetales. Bajo la influencia de la energía luminosa, el CO₂ se transforma en hidratos de carbono. impacto de la energía luminosa. En cuanto a la composición espectral de la calidad de la luz, las regiones azul y roja son las más cruciales para la fotosíntesis porque la composición de las distintas regiones de longitud de onda (azul, verde, amarillo, rojo, rojo lejano o invisible, como UV o IR) es crucial para el crecimiento, la forma, el desarrollo y la floración de la planta (foto morfogénesis).

Y las zonas más cruciales para la fotosíntesis son las de color rojo. Debido a que afecta principalmente a la floración de las plantas, la duración de la luz también se conoce como fotoperiodo. influye principalmente en la floración de las plantas; la regulación del fotoperiodo puede influir en el tiempo de floración. mediante la regulación del fotoperiodo. La energía que necesita la planta para sobrevivir y desarrollarse la proporcionan las longitudes de onda de 450 y 660 nm. 400-700 (PAR) de energía son necesarios para que la planta sobreviva y prospere (Osram, 2016).

Figura 4

Espectros de luz azul profunda y roja intensa



En la figura 4 en el gráfico que muestra los picos de emisión en las longitudes de onda específicas de 450 nm para el azul profundo (Deep Blue) y 660 nm para el rojo intenso (Hyper Red).

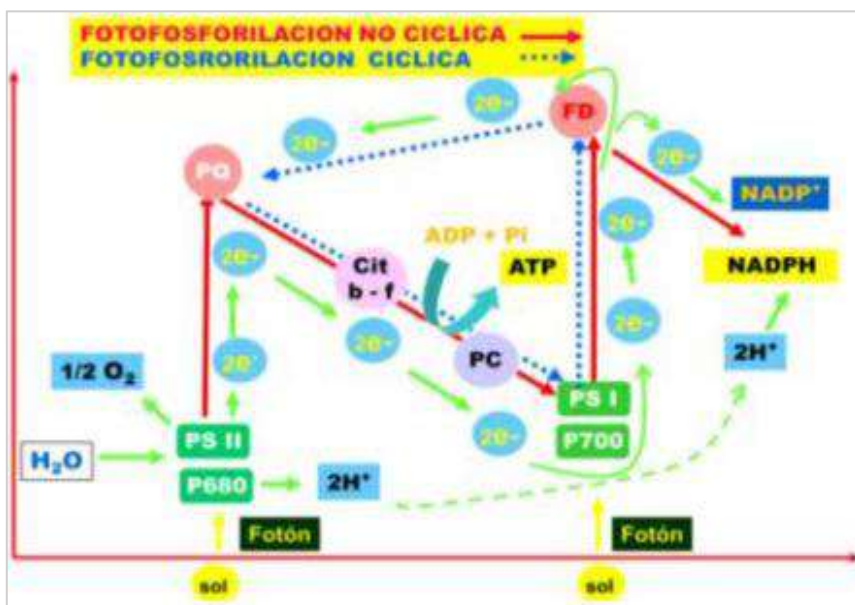
La capacidad de fotosíntesis de las hojas aumenta con el crecimiento hasta alcanzar la plena madurez, momento en el que empieza a disminuir gradualmente. Después, la capacidad empieza a disminuir gradualmente. Hojas viejas y senescentes Con el tiempo, como resultado de la degradación de la clorofila y la pérdida de cloroplastos, las hojas viejas y senescentes se vuelven amarillas y pierden su capacidad de fotosíntesis. Debido a la sombra de las hojas superiores (o internas) y de las plantas circundantes, la alta densidad de plantas acelera la senescencia de las hojas inferiores (o externas).

1.2.5 Luz en los procesos fisiológicos de las plantas.

1.2.5.1 Fase fotoquímica. Las plantas utilizan la energía de la luz a través de dos fotosistemas durante la fase fotoquímica, también conocida como fase luminosa. El primer fotosistema, el FS II, absorbe la energía de la clorofila a través del pigmento P680, que absorbe las longitudes de onda inferiores o iguales a 680 nm. En el fotosistema uno, formado por dos moléculas de clorofila P700 que absorben partículas de luz con longitudes de 700 nm, los átomos de hidrógeno se utilizarán para descomponer las moléculas de agua en dos moléculas de H^+ con dos electrones y una molécula de oxígeno. Esta energía, también conocida como fotón, se liberará al medio ambiente en longitudes de onda inferiores o iguales a 680 nm (Casierra et al., 2011).

Figura 5

Esquema de la fotofosforilación en la fotosíntesis



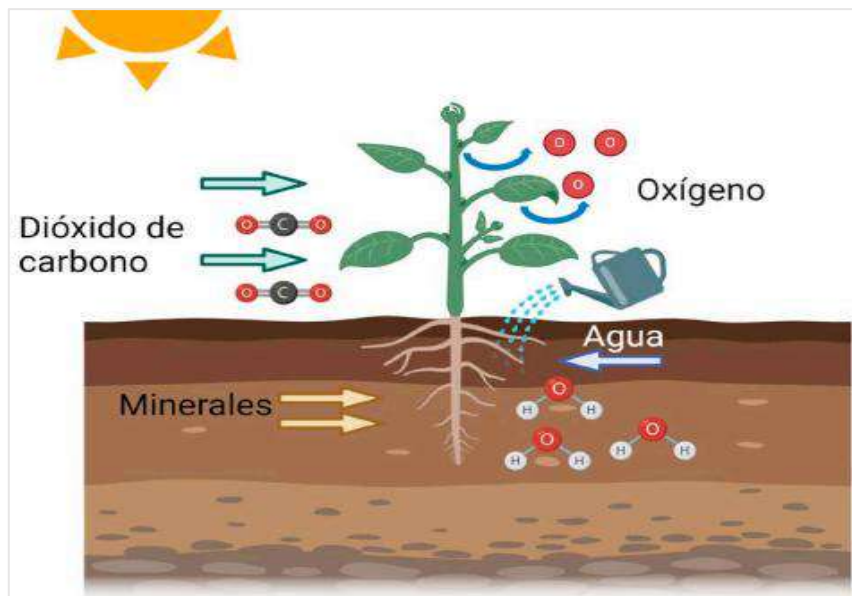
En la figura 5 muestra un diagrama ilustrativo de los procesos de fotofosforilación cíclica y no cíclica en la fotosíntesis. La fotofosforilación cíclica y no cíclica son mecanismos mediante los cuales las plantas convierten la energía solar en ATP y NADPH. El esquema muestra el flujo de electrones entre los fotosistemas II (PS II) y I (PS I),

1.2.5.2 La fotosíntesis. La fotosíntesis es el proceso vital en el que las plantas convierten el dióxido de carbono en oxígeno y el agua en glucosa, aprovechando la energía de la luz. Este mecanismo, fundamental para su crecimiento y desarrollo, tiene lugar en los cloroplastos, donde los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, capturan la luz, principalmente en las regiones roja y azul del espectro visible (Hernández & Aguirre, 2024).

Las estomas son estructuras fundamentales que ayudan a las plantas a adaptarse a un entorno en constante cambio. Funcionan como puertas de intercambio entre la planta y la atmósfera, desempeñando un papel crucial en la regulación de la pérdida de agua mediante la transpiración y en la absorción de CO_2 necesario para la fotosíntesis. Comprender los factores que influyen en su apertura es clave para entender cómo las plantas logran un equilibrio entre captar el CO_2 que necesitan y conservar el agua vital para su supervivencia (Talón & Azcón-Bieto, 2013).

Figura 6

Proceso de fotosíntesis del cultivo

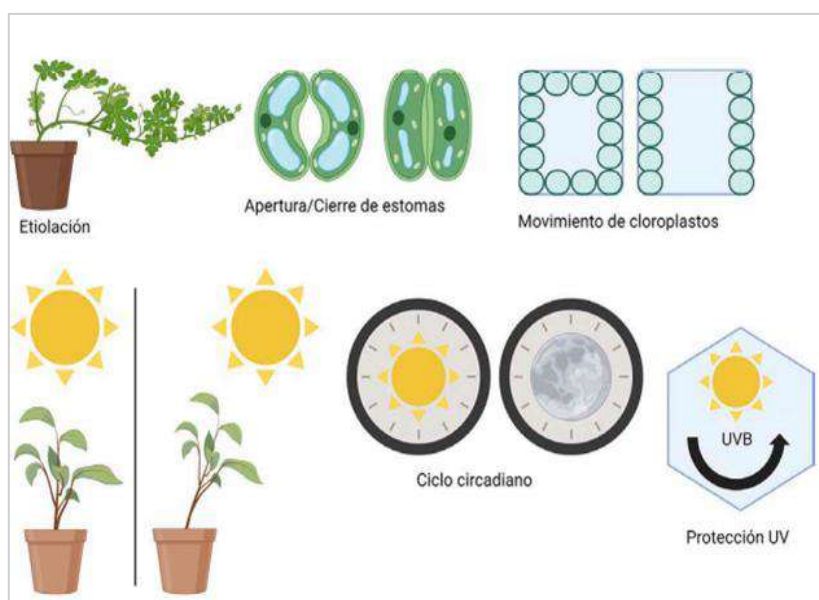


En la figura 6 basado en Hernández y Aguirre (2024), la imagen representa el proceso mediante el cual las plantas llevan a cabo la fotosíntesis y absorben los nutrientes esenciales para su desarrollo.

1.2.5.3 Fotorreceptores. Los fotorreceptores son moléculas clave que permiten a las plantas captar diferentes longitudes de onda de la luz y transformarlas en señales bioquímicas que regulan procesos esenciales, como el crecimiento y el fototropismo. Entre los principales fotorreceptores se encuentran los fitocromos, criptocromos y fototropinas, que reaccionan a colores específicos como el rojo, el azul y la luz ultravioleta. Gracias a estos receptores, las plantas pueden diferenciar entre el día y la noche, ajustar su ciclo circadiano y adaptarse a las variaciones de luz para favorecer su desarrollo óptimo (Hernández & Aguirre, 2024).

Figura 7

Procesos de fotofosforilación cíclica y no cíclica en la fotosíntesis



En la figura 7, La imagen representa los mecanismos de fotosíntesis, incluyendo la apertura y cierre de estomas, el movimiento de cloroplastos, el ciclo circadiano y la protección UV en las plantas. Adaptado de Hernández y Aguirre (2024).

1.2.6 Iluminación artificial en la agricultura

La luz es esencial para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la energía lumínica en compuestos orgánicos vitales para su crecimiento. La calidad de la luz, definida por su espectro, influye directamente en la eficiencia fotosintética y en el desarrollo morfológico de las plantas. Por ejemplo, la luz azul favorece el crecimiento vegetativo. La implementación de iluminación artificial en la agricultura ha permitido extender las temporadas de cultivo y aumentar la productividad. Entre las fuentes de luz artificial más comunes se encuentran las lámparas fluorescentes, las lámparas de sodio de alta presión y, más recientemente, los diodos emisores de luz (LED). Cada tipo de

iluminación tiene características específicas en cuanto a espectro, eficiencia (InfoAgro, s. f.).

Dado que la iluminación LED aumenta el desarrollo y la productividad de las plantas protegidas, es una técnica revolucionaria en la producción hortícola. El objetivo del estudio era evaluar los efectos de la iluminación LED en la producción hidropónica de lechuga de invernadero (Pérez, 2021).

Figura 8

Cultivo en interiores con iluminación LED



En la figura 8 se muestra la fotografía de un sistema de cultivo hidropónico en interiores que utiliza iluminación LED de espectro rojo y azul. Este tipo de luz es óptimo para el crecimiento de plantas, ya que el espectro ajustado favorece la fotosíntesis y el desarrollo vegetativo en entornos controlados.

1.2.7 Historia y evolución de la iluminación artificial

La iluminación artificial ha transformado la agricultura, permitiendo el cultivo de plantas en condiciones controladas y optimizando su crecimiento. Desde las lámparas incandescentes hasta las modernas luces LED, la evolución de estas tecnologías ha mejorado la eficiencia energética y la calidad de la luz, adaptándose a las necesidades específicas de cada cultivo (Rangel, 2015) . La iluminación artificial ha evolucionado significativamente a lo largo de la historia, adaptándose a las necesidades específicas de cada época. En el contexto agrícola, los avances tecnológicos han permitido reemplazar métodos tradicionales como el uso de cera y grasa, predominantes en la Edad Media, por fuentes de iluminación más eficientes como el gas y la electricidad. Estas innovaciones no solo han optimizado la productividad en los cultivos, sino que también han abierto

nuevas posibilidades en la gestión de espacios agrícolas, permitiendo un control más preciso sobre las condiciones lumínicas (Luengo, 2023).

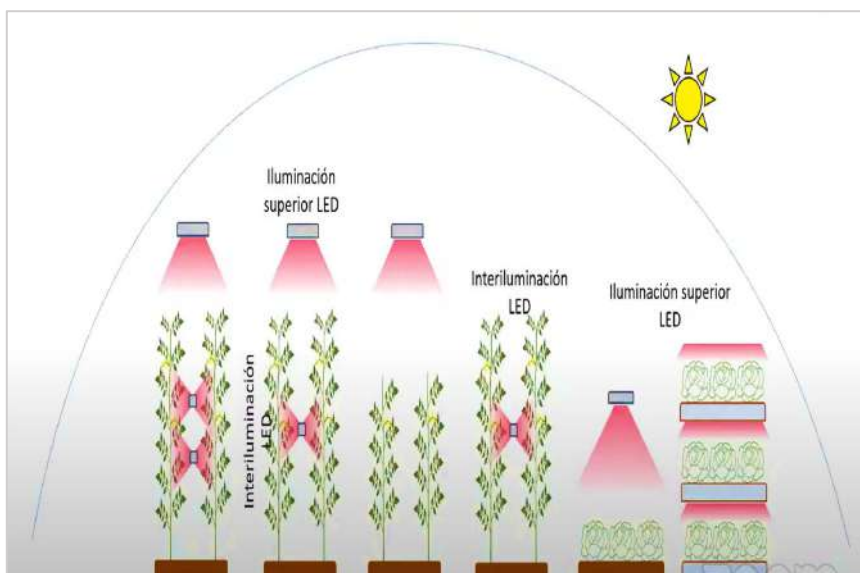
1.2.8 Iluminación LED y otras fuentes de luz

1.2.8.1 Fluorescentes. Si comparamos estas luces con la iluminación incandescente, son más eficientes, ya que utilizan sólo la energía necesaria para una radiación eficaz, lo que mejora la calidad de las plantas. A diferencia de las luces incandescentes, emiten tanto luz roja como azul, que es esencial para promover el crecimiento. Desarrollo, a diferencia de las luces incandescentes que emiten sobre todo luz roja sin equilibrar el espectro luminoso necesario para la planta. Además, tienen una vida útil mucho más larga que las incandescentes (Ehow, 2021).

1.2.8.2 Luces LED. Se trata de un sistema de iluminación artificial mejorado y energéticamente eficiente para aplicaciones de horticultura contemporánea, incluidos cultivos frutales, decorativos, forrajeros, medicinales, microvegetales e hidropónicos. Los LED emisores de luz azul y roja bien calibrados son especialmente eficaces para potenciar el crecimiento de las plantas.

Figura 9

Estrategias de iluminación LED en agricultura protegida



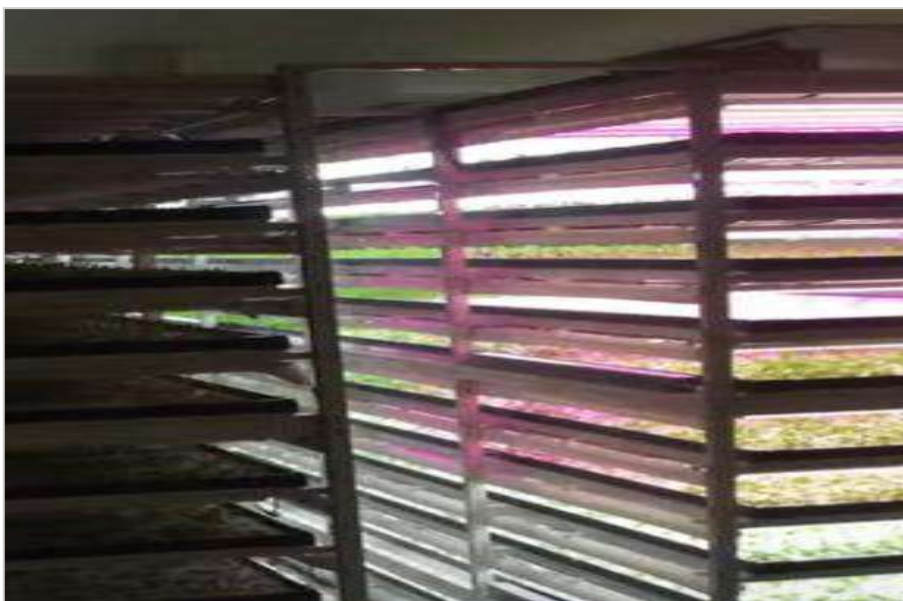
En la figura 9 se muestra un esquema de uso de iluminación LED superior e intermedia en cultivos de invernadero. La combinación de luces superiores e intermedias permite una distribución homogénea de la luz, optimizando la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas en entornos controlados, especialmente en sistemas de cultivo en altura.

1.2.9 Ventajas de la iluminación LED en la agricultura

Las luces LED han revolucionado la iluminación agrícola debido a sus múltiples ventajas. Eficiencia energética: Los diodos emisores de luz (LED) consumen menos energía en comparación con las lámparas tradicionales, lo que contribuye a la reducción de los costos operativos en la agricultura (Gonzales & Ramírez, 2016).

Figura 10

Sistema de cultivo con iluminación LED



En la figura 10 la imagen muestra un sistema de cultivo vertical iluminado con luces LED en un ambiente controlado. La estructura en múltiples niveles permite el aprovechamiento máximo del espacio en invernaderos o áreas de cultivo interiores.

Se basan en muchos fenómenos, entre ellos la supuesta influencia del espectro y la intensidad de la irradiación luminosa en el desarrollo de la biomasa vegetal, así como el efecto de la longitud de onda de la luz en el rendimiento de biomasa (λ). (λ menos λ). Este proceso de irradiación artificial fue en su día difícil de aplicar. Se realizaron esfuerzos ineficaces y costosos con lámparas de tungsteno y luego fluorescentes alimentadas por corriente alterna. En la actualidad, existe la tecnología LED. Los dispositivos LED han logrado avances significativos en varios ámbitos de las ciencias aplicadas, permitiendo la producción de una iluminación brillante y duradera. Están diseñados para su aplicación en interiores. Los cultivos de interior sólo emiten longitudes de onda de luz que corresponden a sus valores individuales y a los que rodean los máximos de absorción de los procesos fotoquímicos estándar de las plantas, que oscilan entre 400 y 500 nanómetros (nm) y entre 600 y 700 nm. Estas longitudes de onda inducen la germinación, el crecimiento vegetativo, el desarrollo y la floración de las

plantas a través de sus pigmentos fotosensibles. En comparación con otros tipos de luces de cultivo, estos dispositivos de crecimiento en interiores son atractivos, ya que no necesitan balastos (Ramos & Ramírez, 2016).

1.2.10 *Aplicaciones en cultivos*

La tecnología de iluminación LED ha transformado la agricultura moderna, proporcionando ventajas notables en una amplia variedad de cultivos. Su capacidad para ajustar el espectro lumínico, la intensidad y la duración de la luz permite optimizar tanto el crecimiento como la calidad de las plantas en entornos controlados, como invernaderos y sistemas de cultivo vertical (Espinal, 2021).

Figura 11

Efectos de diferentes espectros de luz LED



En la figura 11 la imagen ilustra el uso de distintos espectros de luz LED (rojo, morado y azul) para el cultivo de plantas en invernaderos. Cada color de luz LED tiene efectos específicos en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

El cultivo de lechuga en invernaderos ofrece múltiples ventajas, como la protección contra condiciones climáticas adversas, control de plagas y enfermedades, y la posibilidad de producir durante todo el año. Según el "Manual de Producción de Lechuga" del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), la producción en invernaderos permite optimizar el uso de recursos y mejorar la calidad del producto final (Cedillo et al., 2021).

1.2.11 Características del LED

Se puede observar las siguientes características de las bombillas y focos led para invernaderos según (Sanz, 2016).

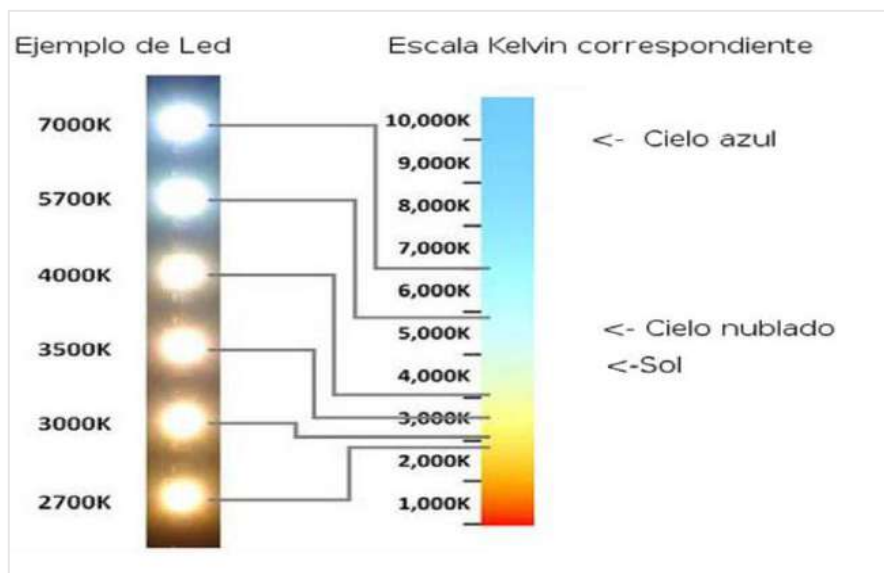
1.2.11.1 Potencia. Esta es la característica principal que mostrará la potencia de la bombilla. Ocasionalmente, puede manifestarse la potencia comparable sobre las bombillas convencionales. Puede manifestarse de las siguientes formas: 8 W a 50 W incandescente 7 W equivalen a 60 W (Sanz, 2016).

1.2.11.2 Luminosidad: También denominada flujo luminoso. La luminosidad es una medida expresada en lúmenes que denota la intensidad de la luz emitida. la luminosidad de la luz irradiada. Pueden observarse variaciones de lúmenes a niveles de potencia equivalentes. Es un principio básico. Es un criterio crucial a la hora de seleccionar un LED.

1.2.11.3 Temperatura de color: La temperatura de color es una propiedad de un LED que debe tenerse siempre en cuenta. Debe controlarse continuamente. Este dato denota el color de la luz de la bombilla. Este número se tiene en cuenta debido a las diferencias significativas entre las distintas condiciones de iluminación.

Figura 12

Temperatura de color en luces LED



En la figura 12 La imagen muestra diferentes ejemplos de luces LED clasificadas según su temperatura de color en la escala Kelvin, la cual mide el tono de luz emitido, desde colores cálidos hasta fríos.

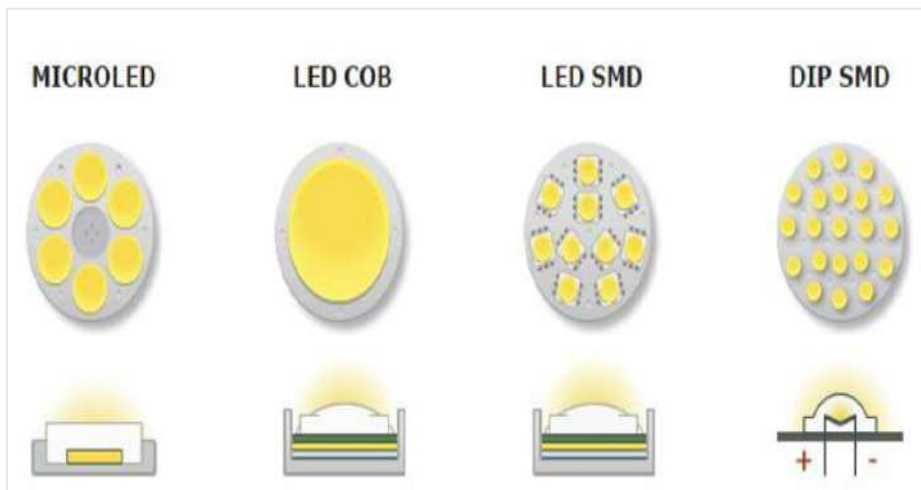
1.2.11.4 Vida útil: La duración prevista, en horas, del funcionamiento del LED en circunstancias ideales. Una cifra mayor indica una mayor duración para amortizar el coste de la bombilla.

1.2.12 Tipos de LED

La tecnología LED engloba varias distinciones, lo que da lugar a múltiples tipos de LED. Existen dos tecnologías principales: LED COB y LED SMD (Sanz, 2016).

Figura 13

Tipos de tecnología LED



En la figura 13 La figura presenta diferentes tipos de tecnología LED utilizados en aplicaciones de iluminación. Incluye MicroLED, LED COB (Chip on Board), LED SMD (Surface-Mounted Device) y DIP SMD (Dual In-line Package).

1.2.12.1 LED chip-on-board (COB). COB, o Chip On Board, se refiere a la integración de muchos LED en un único encapsulado. Poseen una luminosidad de unos 120 Lm/W, son resistentes a las perturbaciones eléctricas y dispersan eficazmente el calor, lo que facilita un uso continuo prolongado. Su ángulo de apertura es de 160°. Todo indica que esta tecnología ganará cada vez más popularidad (Sanz, 2016).

1.2.12.2 Diodos emisores de luz de montaje superficial (SMD). Los LED SMD tienen una luminosidad de 60 Lm/W y, al estar envueltos superficialmente en una resina semirrígida, pueden repartirse por toda la bombilla, facilitando ángulos de apertura de 360°. Sin embargo, su disipación térmica es inferior, lo que los hace menos aconsejables para un uso prolongado (Sanz, 2016).

1.2.13 Producción en ambiente protegido

Controlar el entorno que necesitan las plantas para alcanzar su pleno potencial es la principal distinción entre el medio protegido y la agricultura al aire libre.

explica que un invernadero facilita el mantenimiento de parámetros físicos que interactúan entre sí, como la temperatura del aire y del suelo, la humedad relativa, el porcentaje de CO₂ en la atmósfera, la iluminación, etc. en circunstancias ideales para el crecimiento de las plantas cultivadas en él, o al menos en circunstancias favorables para el interior, o al menos en circunstancias favorables en relación con el exterior (Flores, 2007).

1.2.14 Lechuga (*Lactuca sativa*)

La iluminación LED, al ofrecer un espectro de luz óptimo, mejora la tasa de fotosíntesis, lo cual acelera el crecimiento y aumenta la biomasa de la lechuga (Nájera, 2020). La lechuga forma parte de la familia dicotiledónea más extensa dentro del reino vegetal, la Asteraceae, antes conocida como Compositae. Su clasificación completa se puede ver en él. Esta planta se caracteriza por una notable diversidad, resultado principalmente de la variedad en tipos de hojas y patrones de crecimiento. Esto ha llevado a distintos investigadores a identificar varias variedades botánicas dentro de la especie, muchas de las cuales tienen importancia en la horticultura en diversas partes del mundo (Mulato, 2023).

Figura 14

Cultivo vertical en invernaderos con iluminación LED



En la figura 14 la imagen muestra un sistema de cultivo vertical en invernadero, optimizado con iluminación LED. Este método permite el crecimiento de cultivos en múltiples niveles, maximizando el uso del espacio y proporcionando luz artificial adecuada para el desarrollo óptimo de las plantas.

Es una hortaliza de hoja ampliamente cultivada y consumida a nivel mundial, valorada por su contenido nutricional y versatilidad en la gastronomía. El cultivo en invernaderos ha permitido optimizar su producción, ofreciendo ventajas significativas en términos de control ambiental, eficiencia en el uso de recursos y calidad del producto final.

1.2.14.1 Taxonomía. Lactuca se clasifica en las siguientes clases y es miembro del reino vegetal reino Magnoliophyta, de la clase Magnoliopsida es miembro de la familia Asterales, orden Asterales y de la familia Asteraceae. Sus miembros incluyen el orden genus Lactuca, la especie Lactuca sativa L., la subfamilia Cichorioideae, la tribu Cichorioideae y la tribu Lactuceae y de la familia Asteraceae. Sus miembros incluyen el género Lactuca, la especie Lactuca sativa L., la subfamilia Cichorioideae, la tribu Cichorioideae y la tribu Lactuceae (Zolezzi et al., 2017).

Propiedades nutricionales de la lechuga. Una ración de 100 g de lechuga contiene los siguientes nutrientes: 15 kcal, 94% de agua, 1,3% de proteínas, 2,87 g de hidratos de carbono, 0,15 g de grasas, 1,3 g de fibra, 0,7 g de azúcares y vitaminas K, A, B9, C, B2,

B1, B6, B5, colina y niacina. Además, esta hortaliza contiene cantidades variables de Mn, Fe, K, Ca, Mg, Cu, P y Zn (Zolezzi et al., 2017).

Tabla 1

Composición nutricional de la lechuga por 100 g

Nutriente	Cantidad por 100 g
Calorías	15 kcal
Agua	94%
Proteínas	1.3%
Hidratos de carbono	2.87 g
Grasas	0.15 g
Fibra	1.3 g
Azúcares	0.7 g

La tabla 1 muestra el valor nutricional de la lechuga, destacando que contiene 15 kcal por cada 100 gramos. La lechuga es principalmente agua (94%) y también aporta proteínas, hidratos de carbono, grasas, fibra y azúcares en pequeñas cantidades.

1.2.15 Ventajas del cultivo en invernaderos

La producción de lechuga en invernaderos ofrece múltiples beneficios. El cultivo en invernaderos ha surgido como una técnica agrícola que ofrece múltiples beneficios, permitiendo optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas y mejorar la productividad. Los invernaderos facilitan la incorporación de tecnologías avanzadas, como sistemas de iluminación LED, control automatizado de clima y monitoreo de variables ambientales. Estas innovaciones contribuyen a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción agrícola (Zambrano et al., 2003).

- Control Climático: Permite regular factores como la temperatura, humedad y luz, creando condiciones óptimas para el crecimiento de la planta (Martínez et al., 2015).
- Protección contra Plagas y Enfermedades: Reduce la incidencia de agentes patógenos y plagas, disminuyendo así la necesidad de pesticidas (Martínez et al., 2015).
- Uso Eficiente del Agua y Nutrientes: Facilitar la implementación de sistemas de riego y fertilización más precisos, optimizando el uso de recursos (Martínez et al., 2015).

- Producción Continua: Independientemente de las condiciones climáticas externas, es posible mantener una producción constante durante todo el año (Martínez et al., 2015).

1.2.16 Impacto de la iluminación LED en el cultivo de lechuga

Diversos estudios han evaluado el efecto de la iluminación LED en el cultivo de lechuga: Crecimiento y Desarrollo: La iluminación LED, al ofrecer un espectro de luz adecuado, incrementa la tasa de fotosíntesis, acelerando el crecimiento y aumentando la biomasa de la lechuga (Mulato, 2023).

1.2.17 El rendimiento en cultivos

es una medida que indica la cantidad de producto cosechado por unidad de área cultivada. Este indicador es esencial en la agricultura porque ayuda a determinar la eficiencia del sistema de cultivo, la viabilidad económica y la rentabilidad de una determinada práctica agrícola (Lobos et al., 2020).

1.2.18 El rendimiento en cultivos de lechuga

El rendimiento de la lechuga en invernaderos, como cualquier cultivo, depende de varios factores importantes. La variedad de lechuga que se elija, la cantidad de plantas sembradas en un área determinada, las condiciones del ambiente (como la temperatura y la humedad), y las prácticas de cuidado y manejo que se utilicen, todos influyen de manera directa en la productividad de la cosecha. Por ejemplo, algunas variedades pueden adaptarse mejor a entornos controlados, mientras que otras pueden necesitar espacios más amplios para desarrollarse adecuadamente. Además, el control de la temperatura y la humedad dentro del invernadero es crucial para asegurar que la lechuga crezca saludable y con buena calidad (Martínez et al., 2015).

En promedio, el rendimiento nacional de lechuga es de alrededor de 42,880 unidades por hectárea. Sin embargo, en la Región de O'Higgins, este rendimiento puede llegar hasta las 51,370 unidades por hectárea. Estos valores suelen variar en función de las prácticas de cultivo utilizadas y las condiciones específicas de cada región, que pueden influir notablemente en la producción (Mulato, 2023).

1.2.19 Fotoperiodismo en lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa*) es una planta sensible al fotoperiodo, factor que regula tanto el crecimiento vegetativo como la inducción floral (espigado). Bajo días largos, el cultivo tiende a espigar rápidamente, reduciendo su calidad comercial. Por ello, el manejo de la

duración de la luz resulta determinante en invernaderos, ya que permite prolongar la fase vegetativa y obtener mayor biomasa foliar (Resh, 2013).

1.2.20 Eficiencia de uso de la luz (LUE)

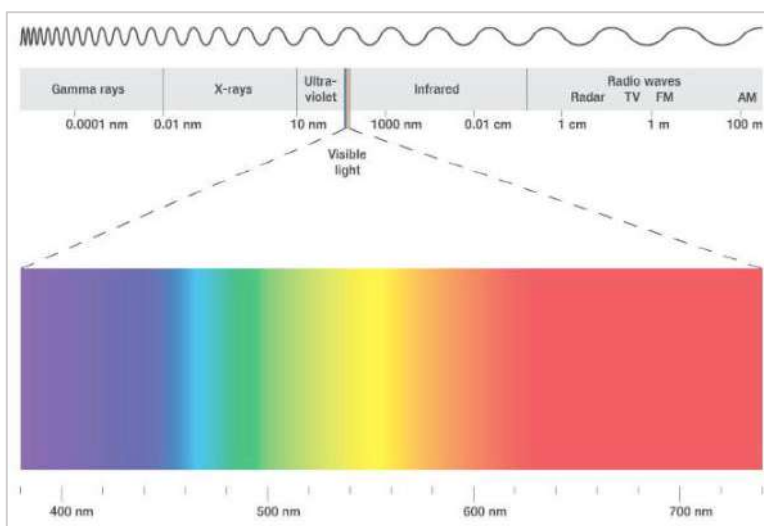
La eficiencia en el uso de la luz (LUE, por sus siglas en inglés) mide la biomasa producida por unidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida. Este indicador permite comparar tratamientos de iluminación y cuantificar el beneficio real de los LED en términos de productividad. En lechuga, una mayor LUE se asocia con espectros balanceados de azul y rojo, así como con intensidades controladas (Monteith & Moss, 1977).

1.2.21 Calidad nutricional bajo diferentes espectros de luz

La composición nutricional de la lechuga puede modificarse con la iluminación artificial. Espectros enriquecidos en luz azul y roja incrementan la acumulación de vitamina C, compuestos fenólicos y antocianinas, mejorando la calidad nutraceutica del producto. Esto demuestra que el uso de LED no solo optimiza rendimiento, sino también el valor funcional de los cultivos (Li & Kubota, 2009).

Figura 15

Influencia del espectro de luz en el crecimiento de las plantas



La figura 15 la imagen ilustra el espectro electromagnético y su relación con el crecimiento de las plantas. La luz visible, entre 400 y 700 nm, comprende los colores del arco iris y es esencial para la fotosíntesis.

1.2.22 *Modelos de crecimiento bajo LED*

El crecimiento de la lechuga puede describirse mediante modelos sigmoides o logísticos, que permiten estimar la tasa de crecimiento relativo y el tiempo al que se alcanza el máximo rendimiento. Estos modelos son útiles para analizar cómo la iluminación LED modifica la dinámica de acumulación de biomasa y la duración del ciclo de cultivo (Marcelis et al., 1998).

1.2.23 *Balance energético y sostenibilidad*

El uso de LED en agricultura protegida tiene implicaciones energéticas y económicas. Si bien la inversión inicial es alta, el consumo eléctrico por kilogramo de biomasa producida resulta menor que con sistemas fluorescentes o de sodio, lo que mejora la sostenibilidad. Además, en agricultura urbana y vertical, los LED permiten reducir el uso de agua y pesticidas, favoreciendo sistemas más eficientes y respetuosos con el ambiente (Kozai et al., 2019).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Ubicación

2.1.1 Ubicación política.

Región : Ayacucho.

Provincia : Huanta.

Distrito : Huanta.

Localidad : Huanta

2.1.2 Ubicación geográfica

Sur : 8.570.117,86 m.

Este : 581354,78 m.

Altitud : 2628 m.s.n.m. (promedio)

Figura 16

Mapa departamental del proyecto



En la figura 16 Este mapa muestra la división política del Perú, destacando los departamentos donde se desarrolló y contextualizó el proyecto.

Figura 17

Mapa provincial del proyecto Huanta



En la figura 17 El mapa ilustra la provincia de Huanta y su relación con las provincias vecinas.

Figura 18

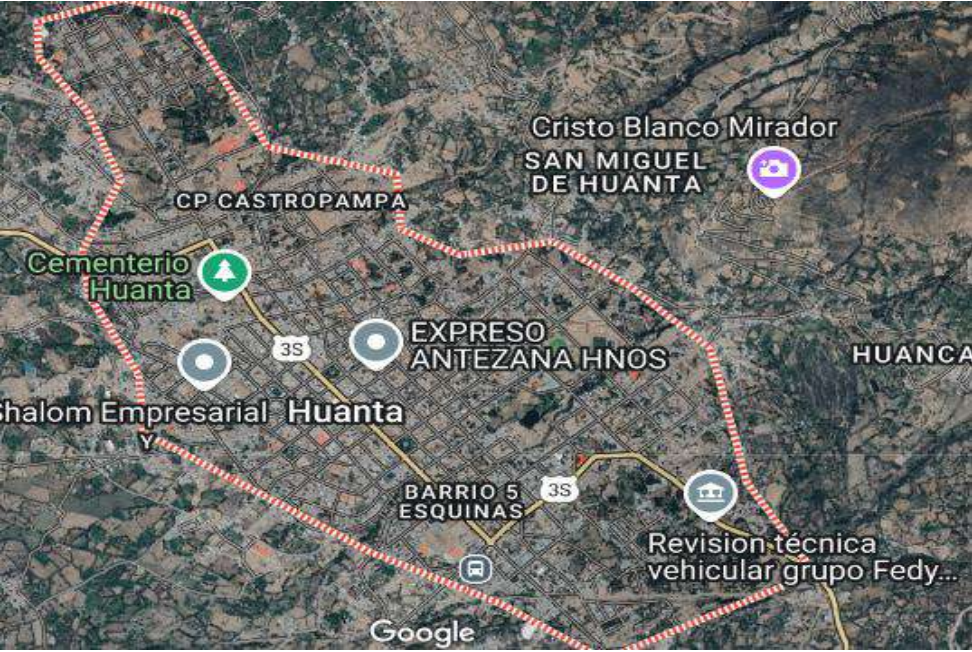
Mapa distrital del proyecto Huanta



En la figura 18 el mapa muestra los distritos de la provincia, destacando la distribución geográfica del proyecto en el contexto distrital, permitiendo un análisis más detallado de las áreas de intervención.

Figura 19

Mapa de intervención del proyecto



En la figura 19 muestra mapa satelital delimita el área de intervención del proyecto en la ciudad de Huanta, resaltando los principales puntos de referencia.

2.1.3 Límites

Tabla 2

Límites geográficos de la provincia de Huanta

Dirección	Limite	Dirección	Limite
Norte	Junín	Este	La Convención
Sur	Huamanga	Oeste	Tayacaja, Angaraes y Churcampa

La tabla 2 describe los límites geográficos de la provincia de Huanta, Ayacucho. Al norte, limita con Junín; al sur, con Huamanga; al este, con La Convención; y al oeste, con Tayacaja, Angaraes y Churcampa.

2.1.4 Vías de acceso

Tabla 3

Vías de acceso de la provincia de Huanta

Medio de transporte	Punto de Partida	Tiempo estimado de viaje	Observaciones
Combinado	Paradero de combis de Huanta, a 10 minutos a pie del mercado de Magdalena	1 hora	Las tarifas pueden variar según la hora del día.
Taxi colectivo	combis en el mercado de Magdalena	45 minutos	Tarifas más altas después de las 6:30 pm
Auto Privado	Aeropuerto Alfredo Mendívil Duarte (alquiler de vehículos)	45 minutos - 1 hora	Se recomienda tomar la carretera 3S.

La tabla 3 muestra las opciones de transporte disponibles para llegar a Huanta desde puntos de partida específicos, el tiempo estimado de viaje y observaciones relevantes, como la variabilidad en las tarifas y recomendaciones de rutas. Esto facilita la planificación de traslados.

2.2 Materiales y equipos

2.2.1 Materiales para el proyecto

- Semillas certificadas de lechuga (*Lactuca sativa* L.), variedad Green Leaf.
- Sustrato para almácigo: mezcla de turba y perlita en proporción 1:1.
- Solución nutritiva con macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B y Mo), preparada en tanques de 200 L.
- Hojas de registro y documentación.
- Equipos de protección personal.

2.2.2 Equipos para el proyecto

- Bombillas LED de 48 W con espectro azul (450 nm) y rojo (660 nm), instaladas a 1 m sobre el dosel vegetal.
- Sensor PAR para medir la densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).
- Flexómetro y regla milimetrada para medir altura y diámetro de roseta.
- Balanza digital de precisión ($\pm 0,01$ g), calibrada antes de cada jornada.
- Estufa u horno de secado regulable entre 60 y 75 °C.
- Termohigrómetro digital para registrar temperatura y humedad relativa; medidor portátil de pH y conductividad eléctrica.

- Invernadero o cámara de crecimiento controlado.
- Canales o tuberías de cultivo hidropónico, esponjas de soporte y bandejas de germinación.
- Sistema automatizado de riego y fertirrigación con temporizador, bomba, filtros y tanques de 200 L.
- Malla Raschel para regular la radiación incidente y reducir el estrés lumínico.

2.3 Metodología

Para realizar los trabajos planteados en la presente practica se realizaron las siguientes actividades:

2.3.1 Implementación del invernadero

Para hacer que la instalación funcione como un invernadero de ambiente controlado, se hicieron algunos cambios en la infraestructura y en los equipos. La construcción tenía unas medidas de 9 m de largo, 3 m de ancho y 3 m de alto (caballetes) y estuvo ubicada en un N-S, de forma que se pudiera optimizar la captación y distribución de la radiación solar a lo largo del día.

Para el control del ambiente se implementaron las siguientes componentes:

- **Sistema de Iluminación:** En este caso, se incorporaron luces LED que sirven radiación solar natural y equilibran la natural que hay en el invernadero.
- **Mallas Sombreadoras (Tipo Raschel):** Uso de la malla de sombreado Raschel para regular la radiación solar que se presenta y evitar que el estrés de la luz.
- **Sistema Automatizado de Fertirriego:** Para el control del ahorro en el mantenimiento y el suministro de agua, se implementaron un sistema de control.
- **Sistema de Ventilación:** Se utilizo un sistema de ventilación como método para el control.

2.3.2 Sistema de iluminación

Se utilizaron bombillas LED de potencia de 48 watt para crear el sistema de iluminación y se colocaron a 1 m de distancia de la planta de acuerdo con la terapia inducida luz durante 12 horas (de 6 de la tarde a 6 de la mañana).

- Indicar espectro usado (azul 450 nm, rojo 660 nm).
- Precisar intensidad lumínica en $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (usando sensor PAR).
- Justificar el fotoperiodo elegido (12 h) con referencia bibliográfica.

Se implementó un sistema de iluminación artificial con bombillas LED de 48 W, distribuidas uniformemente y colocadas a 1 m de distancia sobre la copia de las plantas.

Los focos utilizados emitieron un espectro combinado de T1 (Luz led roja), T2 (Luz led azul) y T3 (Testigo) adecuado para promover tanto la fotosíntesis como la foto morfogénesis.

La intensidad lumínica se midió con un sensor PAR, registrándose un promedio de $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a nivel del dosel foliar. Esta intensidad se mantuvo constante durante el ciclo del cultivo para garantizar condiciones homogéneas de crecimiento.

El sistema funcionó con un fotoperiodo de 12 horas de iluminación continua (18:00–06:00), en correspondencia con estudios previos que demuestran que este rango horario favorece el crecimiento vegetativo de la lechuga al simular un día largo y evitar el estrés lumínico por exceso de radiación solar directa.

Figura 20

Espectro combinado de luz azul



Figura 21

Espectro combinado de luz roja



2.3.3 Sistema de riego

Durante la investigación se implementó un sistema automático de fertirrigación programado mediante un temporizador digital. El sistema funcionó en dos módulos independientes, con un tiempo de riego de 2 horas diarias, ajustable en intervalos de 30 minutos según la etapa fenológica del cultivo y las condiciones ambientales registradas en el invernadero.

El agua utilizada provino de la red de abastecimiento local de Huanta, previamente almacenada en tanques de 200 L y filtrada para evitar obstrucciones. Los análisis iniciales mostraron un pH de 7.1 ± 0.2 y una conductividad eléctrica (CE) de 0.40 mS/cm, valores que fueron corregidos durante la fertirrigación con ácido fosfórico para alcanzar un rango óptimo de pH entre 5.5 y 6.5 y una CE ajustada entre 1.4 y 1.8 mS/cm, siguiendo las recomendaciones del Manual de Producción de Lechuga en Ambientes Protegidos (CIREN, 2021).

- La frecuencia de riego fue determinada de acuerdo con la fase de desarrollo de la lechuga y la demanda hídrica del cultivo:
- Fase de germinación (0–10 días): Se aplicaron riegos ligeros de 3 veces al día (mañana, mediodía y tarde), con una duración de 5 minutos cada uno, manteniendo el sustrato constantemente húmedo para favorecer la imbibición de las semillas y la emergencia uniforme de plántulas.

- Fase de plántula y establecimiento (11–20 días): Se redujo la frecuencia a 2 riegos diarios de 10 minutos, manteniendo un balance entre humedad y aireación en el sustrato para promover el desarrollo radicular.
- Fase de crecimiento vegetativo (21–40 días): Se aplicó 1 riego diario de 20 minutos, con solución nutritiva completa, asegurando un suministro constante de nutrientes en la etapa de máxima demanda fisiológica.
- Fase de pre-cosecha (41–50 días): Se redujo la frecuencia a 1 riego cada dos días, con sesiones de 15 minutos, con el fin de disminuir el exceso de humedad y favorecer la concentración de sólidos solubles en las hojas, mejorando así la textura y calidad comercial.

La eficiencia del sistema fue evaluada periódicamente mediante la medición del caudal de los goteros y la verificación de uniformidad de riego, alcanzando un coeficiente de uniformidad superior al 90 %, lo cual garantizó una distribución homogénea del agua y nutrientes en todas las plantas.

2.3.4 La germinación de las semillas

Las semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Establecer las plántulas de lechuga en condiciones controladas.

- Preparación del sustrato: Se elaboró una mezcla de turba y perlita en proporción 1:1, asegurando una adecuada aireación y retención de humedad para la germinación.
- Siembra: Las semillas de lechuga se sembraron en bandejas de germinación con el sustrato preparado, manteniendo una distancia de 10 cm entre cada semilla para garantizar un desarrollo uniforme.

El monitoreo diario permitió registrar un porcentaje de germinación efectivo de 92.5 %, valor que se encuentra dentro del rango esperado para semillas certificadas de lechuga (≥ 90 %). Las plántulas obtenidas fueron vigorosas y presentaron una emergencia uniforme, lo que facilitó el trasplante y aseguró homogeneidad en la etapa inicial del cultivo.

Figura 22

El monitoreo de germinación



2.3.5 Trasplante

El trasplante de las plántulas se realizó a los 5 días después de la siembra, cuando alcanzaron una altura promedio de 3 - 4 cm, con dos a tres hojas verdaderas desarrolladas, lo que aseguró un estado fisiológico óptimo para el establecimiento en los canales de cultivo.

Se trabajó con un total de 150 plántulas, distribuidas en dos módulos experimentales: 100 plantas bajo iluminación LED y 50 plantas bajo luz natural, con el fin de evaluar comparativamente el efecto de las fuentes de luz sobre el crecimiento del cultivo.

Estas plantas fueron colocadas en esponjas para su desarrollo durante una semana a un riego constante. Seguidamente, Las plántulas fueron colocadas en los canales de cultivo siguiendo un distanciamiento de 20 cm entre plantas y 25 cm entre filas, lo que permitió un adecuado aprovechamiento del espacio, favoreció la aireación y redujo la competencia por nutrientes y radiación en tuberías de sistema hidropónico tipo piramidal.

El trasplante se realizó de forma manual, cuidando la integridad del sistema radicular, y se acompañó con un riego inmediato de establecimiento, a fin de minimizar el estrés por manipulación y favorecer la rápida adaptación de las plántulas al nuevo ambiente de crecimiento.

Figura 23

Trasplante de las plántulas



Figura 24

Trasplante de las plántulas



2.3.6 Control fitosanitario

Se implementaron medidas de manejo fitosanitario preventivo y correctivo con el objetivo de minimizar la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.).

El monitoreo de plagas y enfermedades se realizó de manera semanal, mediante inspecciones visuales en campo y la revisión de trampas cromáticas instaladas en cada módulo de cultivo. Se utilizaron trampas amarillas, destinadas al seguimiento de mosca blanca (*Bemisia tabaci*), pulgones (*Aphididae*) y minadores (*Liriomyza* sp.), así como trampas azules, específicas para trips (*Frankliniella occidentalis*). Estas trampas se colocaron a razón de una por cada 10 m², siguiendo las recomendaciones del Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA, 2020).

En cuanto a las enfermedades, se observaron principalmente problemas asociados a patógenos fúngicos, tales como *Pythium* sp., *Oidium* sp., *Peronospora destructor* (mildiu) y *Cercospora* sp.. Para el control de estas enfermedades se aplicaron tratamientos preventivos y curativos en caso necesario:

- Fosetil de aluminio (80 WP): aplicado a una dosis de 2 g/L de agua, mediante pulverización foliar dirigida, con una frecuencia de aplicación de cada 15 días en caso de detección de síntomas iniciales de mildiu u oídio.
- Azufre micronizado: utilizado como preventivo contra oídio, en dosis de 3 g/L, aplicado vía foliar mediante aspersion fina, evitando horas de alta radiación solar.
- Para plagas de insectos, cuando la población monitoreada superó los umbrales de daño económico, se aplicaron productos de origen biológico:
- Extracto de neem (*Azadirachta indica*): a una dosis de 3 mL/L, aplicado vía foliar cada 7 días en caso de presencia de pulgones o mosca blanca.
- *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki*: en dosis de 1 g/L, aplicado en infestaciones puntuales de minadores y larvas de lepidópteros.
- El programa fitosanitario aplicado priorizó el Manejo Integrado de Plagas (MIP), combinando prácticas preventivas (trampas, monitoreo, condiciones de ventilación del invernadero) con aplicaciones selectivas de productos, reduciendo así el impacto ambiental y evitando la resistencia de plagas y patógenos.

Figura 25

Control fitosanitario



2.3.7 Fertilización

La nutrición del cultivo se realizó mediante fertirrigación. La solución nutritiva se preparó en tanques de 200 L con agua filtrada. Primero se llenó aproximadamente el 70 % del volumen, luego se incorporaron los nutrientes previamente disueltos y, finalmente, se completó el volumen hasta 200 L. Para evitar precipitados, los componentes con calcio y hierro se prepararon separados de los fosfatos y sulfatos y se mezclaron únicamente en el tanque de trabajo con agitación continua.

La composición de la solución nutritiva aplicada durante la fase de crecimiento vegetativo se expresó en concentración de nutrientes en partes por millón (ppm):

- Macronutrientes principales:
 - Nitrógeno (N): 150 ppm
 - Fósforo (P_2O_5): 50 ppm
 - Potasio (K_2O): 200 ppm

- Calcio (Ca): 120 ppm
- Magnesio (Mg): 50 ppm
- Azufre (S): 60 ppm
- Micronutrientes:
 - Hierro (Fe-EDDHA): 2.5 ppm
 - Manganeseo (Mn): 0.5 ppm
 - Zinc (Zn): 0.05 ppm
 - Cobre (Cu): 0.05 ppm
 - Boro (B): 0.5 ppm
 - Molibdeno (Mo): 0.05 ppm

Tabla 4

Cantidad objetivo de nutrientes para preparar 200 L de solución

Nutriente	Concentración objetivo	Cantidad de nutriente en 200 L
Nitrógeno (N)	15S0 ppm	30,00 g
Fósforo (P ₂ O ₅)	50 ppm	10,00 g
Potasio (K ₂ O)	200 ppm	40,00 g
Calcio (Ca)	120 ppm	24,00 g
Magnesio (Mg)	50 ppm	10,00 g
Azufre (S)	60 ppm	12,00 g
Hierro (Fe-EDDHA)	2,50 ppm	0,50 g
Manganeseo (Mn)	0,50 ppm	0,10 g
Zinc (Zn)	0,05 ppm	0,01 g
Cobre (Cu)	0,05 ppm	0,01 g
Boro (B)	0,50 ppm	0,10 g

Molibdeno (Mo)	0,05 ppm	0,01 g
----------------	----------	--------

La cantidad de cada fertilizante comercial se calculó según su riqueza declarada mediante: masa de fertilizante (g) = (concentración objetivo (mg/L) × 200 L) / (1000 × fracción del nutriente). Esta relación permite reproducir la solución sin confundir la masa del nutriente con la masa de la sal fertilizante. Los micronutrientes se premezclaron en un volumen pequeño de agua y se incorporaron al final, verificando pH y conductividad eléctrica.

El suministro de nutrientes se efectuó diariamente a través del sistema de riego, asegurando un aporte continuo de elementos esenciales en función de la demanda del cultivo. Durante la fase de germinación se utilizó una solución nutritiva diluida (50 % de la concentración total), aumentando gradualmente hasta alcanzar la concentración completa en la fase de crecimiento vegetativo.

La calidad de la solución nutritiva se controló mediante mediciones diarias de conductividad eléctrica (CE) y pH, utilizando un medidor portátil digital. Los valores de CE se mantuvieron en el rango de 1.4 a 1.8 mS/cm, mientras que el pH se ajustó entre 5.5 y 6.5, rango óptimo para el cultivo de lechuga.

Para el ajuste del pH se emplearon reguladores específicos: hidróxido de potasio (KOH) para incrementar el valor y ácido fosfórico (H₃PO₄) para reducirlo. Estos ajustes garantizaron tanto la disponibilidad de nutrientes como la estabilidad química de la solución nutritiva aplicada.

Figura 26

Sistema de fertirrigación en tanques de 200 L



Figura 27

Sistema de fertirrigación en tanques de 200 L



2.3.8 Cosecha

La cosecha de las plantas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) se realizó de manera manual, utilizando tijeras desinfectadas con alcohol al 70 %, con el fin de evitar daños mecánicos y reducir riesgos de contaminación cruzada para poder sacar hojas secas o malogradas.

El criterio de madurez comercial se definió considerando los siguientes parámetros:

- Número de hojas: entre 15 y 25 hojas bien desarrolladas por planta.
- Peso fresco: promedio de 100–250 g por planta, acorde a estándares comerciales de lechuga tipo manteca.
- Tiempo fisiológico: entre 30 y 45 días después del trasplante (DDT), dependiendo del módulo de cultivo.

La fecha de inicio de cosecha fue el 30 de octubre de 2025, correspondiente a los 30 días después del trasplante. El periodo de cosecha tuvo una duración de 7 días, en los cuales se realizaron cortes escalonados para asegurar la recolección de plantas en su punto óptimo de desarrollo.

Posterior a la cosecha, las plantas fueron colocadas en cajas plásticas limpias y trasladadas al área de evaluación, donde se registraron las variables de altura, número de hojas, peso fresco y biomasa seca, necesarias para el análisis experimental.

Figura 28

Cosecha de la lechuga



2.3.9 Condiciones ambientales del invernadero

Durante el desarrollo del experimento se monitorearon y controlaron las condiciones ambientales críticas para el cultivo de lechuga, principalmente temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica dentro del invernadero.

El rango de temperatura se mantuvo entre 18 y 24 °C, mientras que la humedad relativa osciló entre 65 y 80 %, valores considerados óptimos para el crecimiento vegetativo de lechuga en ambientes protegidos, propios de la atmósfera ambiente, sin suplementación adicional.

El control y monitoreo constante de estas condiciones garantizó la creación de un microclima adecuado, reduciendo el estrés ambiental y asegurando un desarrollo uniforme y saludable del cultivo durante todo el ciclo experimental.

2.3.10 Técnicas de recolección y análisis de datos

La recolección de datos se efectuó desde la germinación hasta la cosecha mediante fichas de observación estandarizadas. Las evaluaciones se realizaron a los 0, 7, 14, 21 y 30 días después del trasplante (DDT). En cada tratamiento se seleccionaron aleatoriamente 15 plantas para las mediciones repetidas de altura, número de hojas y diámetro de roseta; al final del ciclo se evaluó la biomasa de las 50 plantas por tratamiento.

Las variables evaluadas incluyeron:

- **Altura de planta (cm):** medida con una regla milimetrada y flexómetro, desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja más alta.
- **Número de hojas:** conteo directo de hojas completamente desarrolladas.
- **Peso fresco (g):** determinado mediante una balanza digital de precisión (± 0.01 g).
- **Peso seco (g):** obtenido tras el secado de las muestras en estufa a 70 °C durante 48 horas, hasta alcanzar peso constante.
- **Registro fotográfico:** realizado en cada fase fenológica como evidencia visual del desarrollo de las plantas en ambos tratamientos.

Para el análisis de la información, se aplicó un enfoque en dos etapas:

- **Estadística descriptiva:** cálculo de media, desviación estándar y coeficiente de variación para cada variable.

El procesamiento de datos se realizó con el software Jupyter, complementado con hojas de cálculo en Microsoft Excel para cálculos preliminares y elaboración de gráficos comparativos.

2.3.11 Instrumentos de medición

Para la toma de datos se utilizaron instrumentos especializados, seleccionados de acuerdo con la naturaleza de cada variable evaluada:

- Altura de planta: se midió con un flexómetro, registrando la distancia desde la base del tallo hasta la hoja más apical.
- Peso fresco: se determinó con una balanza digital de precisión (± 0.01 g), calibrada antes de cada jornada de medición.
- Peso seco: se obtuvo utilizando un horno de secado regulado a 75 °C, en el cual las muestras permanecieron durante 48 horas o hasta alcanzar peso constante.

2.3.12 Procedimiento de manejo del cultivo

Durante el ciclo experimental se implementaron labores de mantenimiento y manejo agronómico destinadas a garantizar un desarrollo uniforme del cultivo en ambos tratamientos (luz LED y luz natural).

- Limpieza y desinfección del invernadero: se efectuó antes de la siembra y de manera periódica cada 15 días, utilizando soluciones desinfectantes en pisos, herramientas y equipos, con el fin de reducir la presencia de patógenos y plagas.
- Monitoreo fitosanitario: se llevó a cabo de manera semanal, mediante la revisión visual de plantas y trampas cromáticas instaladas en los módulos, aplicándose medidas de control preventivo y correctivo en caso de detección de plagas o enfermedades (según lo detallado en el apartado de control fitosanitario).
- Riego y fertirrigación: se realizaron siguiendo la programación establecida en los apartados, asegurando el aporte adecuado de agua y nutrientes durante todas las fases fenológicas.
- Control de humedad relativa: se mantuvo en el rango de 65–80 % mediante ventilación natural y ajustes en la frecuencia de riego.
- Registro de datos: todas las variables de crecimiento y productividad fueron monitoreadas de acuerdo con el cronograma experimental, garantizando uniformidad en la recolección de información.

Se elaboró un cronograma de actividades, que comprendió desde la germinación hasta la cosecha, lo que permitió estandarizar el manejo en ambas secciones experimentales y reducir la variabilidad en los resultados.

2.3.13 Análisis de datos

El procesamiento de la información recolectada se realizó mediante un enfoque cuantitativo. En una primera etapa se aplicó estadística descriptiva, obteniéndose medidas de tendencia central (media) y de dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación) para cada variable evaluada (altura de planta, número de hojas, peso fresco, peso seco). El procesamiento de los datos se efectuó con el software Jupyter, complementado con hojas de cálculo para la elaboración preliminar de gráficos y tablas comparativas.

2.4 Marco del estudio

2.4.1 Diseño experimental

Tabla 5

Esquema del diseño experimental

Aspecto	Descripción
Tipo de estudio	Experimental
Enfoque	Cuantitativo
Variable independiente	Tipo de iluminación (A: luz natural, B: LED azul, C: LED rojo)
Variable dependiente	Tasa de crecimiento (altura de las plantas)
Grupo experimental	Plantas bajo iluminación LED
Grupo Control	Plantas bajo luz natural

Esta tabla 5 resume el diseño experimental utilizado para evaluar el impacto de diferentes tipos de iluminación en el crecimiento de las plantas. Se establece un enfoque cuantitativo donde la variable independiente es el tipo de iluminación (A: luz natural, B: LED azul, C: LED rojo).

2.5 Población, muestra y muestreo

2.5.1 Población

La población considerada en este estudio estuvo formada por todas las plantas de lechuga cultivadas bajo las condiciones experimentales establecidas. Estas plantas

correspondían a la variedad Green Leaf, esta variedad fue seleccionada por su alta aceptación comercial, su adaptabilidad a sistemas de cultivo en ambientes controlados y su ciclo de crecimiento relativamente corto, lo que permite evaluar con precisión los efectos de la iluminación en un periodo limitado. La población del estudio estuvo conformada por 150 plantas de lechuga de la variedad Green Leaf, distribuidas equitativamente con 50 plantas por cada tratamiento.

2.5.2 Muestra

Para las mediciones repetidas se seleccionó mediante muestreo aleatorio simple una submuestra de 15 plantas por tratamiento ($n = 45$). En la cosecha final se evaluó la totalidad de las 150 plantas para determinar el peso fresco y la productividad por tratamiento.

2.5.3 Muestreo

Se aplicó muestreo aleatorio simple para elegir las 15 plantas de seguimiento dentro de cada tratamiento. Cada planta fue identificada con un código permanente para mantener la trazabilidad de las mediciones durante todo el ciclo. La evaluación final de biomasa se realizó sobre la población completa.

2.5.4 Procedimientos Experimental

a) Preparación del invernadero

Dividir el invernadero en tres secciones iguales para comparar el crecimiento de lechuga bajo iluminación LED B: luz natural, A: LED azul, A: LED rojo.

División del espacio: Separe el invernadero en dos áreas de 3 m x 3 m cada una.

Instalación de iluminación:

- En la Sección A, instale lámparas LED de espectro completo a una altura de 1 metro sobre las plantas.
- La Sección B permanecerá con luz natural sin intervención adicional.

Dividir el invernadero en tres áreas de 3 m x 3 m para cada tipo de iluminación.

Instale las lámparas LED en la sección experimental y ajústelas para operar en un ciclo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad.

Figura 29

Esquema de la distribución del invernadero



En la figura 29 el esquema representa la división del invernadero en tres secciones: la Sección A y B, donde se emplea iluminación LED para promover un crecimiento controlado de las plantas, y la Sección B, que depende exclusivamente de la luz natural.

2.5.5 Determinar la influencia de la iluminación LED en la tasa de crecimiento de la lechuga

- **Siembra de semillas:**
 - Establecer las plántulas de lechuga en condiciones controladas.
 - **Preparación del sustrato:** Se elaboró una mezcla de turba y perlita en proporción 1:1, asegurando una adecuada aireación y retención de humedad para la germinación.
- **Siembra:** Las semillas de lechuga se sembraron en bandejas de germinación con el sustrato preparado, manteniendo una distancia de 10 cm entre cada fila de semilla para garantizar un desarrollo uniforme.

Figura 30

Proceso de siembra en bandejas



En la figura 30 muestra el proceso de siembra manual en bandejas de germinación. Esta técnica permite una colocación precisa de las semillas, facilitando un crecimiento homogéneo y un mejor control de las condiciones iniciales de las plántulas.

- **Condiciones de germinación:** Las bandejas se colocaron en un ambiente controlado con temperatura constante de 20 °C y humedad relativa del 70%, condiciones óptimas para el proceso de germinación.

Figura 31

Proceso de siembra en bandejas



En la figura 31 La imagen ilustra el proceso inicial de germinación en bandejas, donde las plántulas emergen en un ambiente controlado.

Aplicación de tratamientos de luz

Diseño completamente aleatorizado con tres tratamientos lumínicos para comparar el efecto de diferentes espectros electromagnéticos sobre el desarrollo fisiológico.

Proporcionar las condiciones lumínicas específicas para cada sección.

- **Sección con luces (LED):**

Encienda las lámparas LED durante 12 horas al día (18:00 a 6:00). Asegurar una intensidad luminosa de $300 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$.

- **Sección (Luz natural):**

Exponga las plantas únicamente a la luz solar disponible.

Tabla 6*Especificaciones de iluminación por sección*

Sección	Tipo de luz	Duración diaria	Intensidad ($\mu\text{mol m}^2/\text{s}$)
A	CONDUJO	12 horas	300
B	Natural	Variable	Variable
C	CONDUJO	12 horas	300

La tabla 6 muestra las características de iluminación utilizadas en cada sección del experimento. La Sección A y C emplea luz LED con una duración diaria de 16 horas y una intensidad de 300 $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$, mientras que la Sección B utiliza luz natural con duración e intensidad variables.

Trasplante al invernadero

Transferir las plántulas germinadas al invernadero para su crecimiento bajo las condiciones experimentales.

- **Selección de plántulas:** Después de 2 semanas, seleccione plántulas con altura uniforme de 5 cm.
 - En la Sección A (iluminación Rojo), plantar 50 plántulas.
 - En la Sección B (luz natural), plantar otras 50 plántulas.
 - En la Sección (iluminación LED Azul), plantar otras 50 plántulas.
- **Espaciamiento:** Mantenga una distancia de 10 cm entre plantas y 20 cm entre filas.

Figura 32

Distribución de plántulas en el invernadero



En la figura 32 la imagen muestra la organización de plántulas en un invernadero, donde las camas elevadas permiten un control adecuado del crecimiento y desarrollo de las plantas.

Mantenimiento y monitoreo

Garantizar condiciones óptimas de crecimiento y registrar datos relevantes.

- **Riego:** Aplicar riego por goteo en ambas secciones, manteniendo el sustrato húmedo sin encharcar.
- **Fertilización:** Aplicar una solución nutritiva estándar una vez por semana.

Figura 33

Fertilización aplicación de nutrientes



Figura 34

Fertilización aplicación de nutrientes



Métodos e instrumentos de recogida de datos

Observación Directa del Crecimiento y Desarrollo de las Plantas

Descripción del método: La observación directa permite registrar semanalmente el desarrollo físico y la salud de las plantas, como la altura, número de hojas, color y otros cambios visibles en su morfología.

- Cada semana, se seleccionarán 15 plantas al azar en cada sección (LED A, B y luz natural) para mediciones detalladas.
- Los datos de altura, número de hojas y estado visual se registrarán en una hoja de observación.

Instrumentos utilizados:

- Cinta métrica: Para medir la altura de las plantas con una precisión de 1 mm.
- Cámara fotográfica: Para capturar imágenes de las plantas, permitiendo análisis visuales posteriores y comparación de crecimiento.

Metodología para cuantificar las variables de la investigación

A continuación, se describen los métodos e instrumentos utilizados para recabar información sobre cada una de las variables de la investigación:

– Altura de las plantas

Cada 7 días después del trasplante (DDT), se midió la altura de cada planta en cada condición. Se utilizó un flexómetro para medir la altura de cada planta. La unidad de medida fue cm.

– Altura de planta

A lo largo de las semanas y días después del trasplante, datos de crecimiento de las plantas en altura fueron registrados y analizados en función de las etapas fenológicas. Durante la etapa de la germinación (días 0-7), las plantas mostraron un crecimiento inicial más que moderado. En la etapa vegetativa (semanas 2-4), el incremento en la altura fue más que significativo.

Figura 35

Altura de lechuga en etapa de cosecha

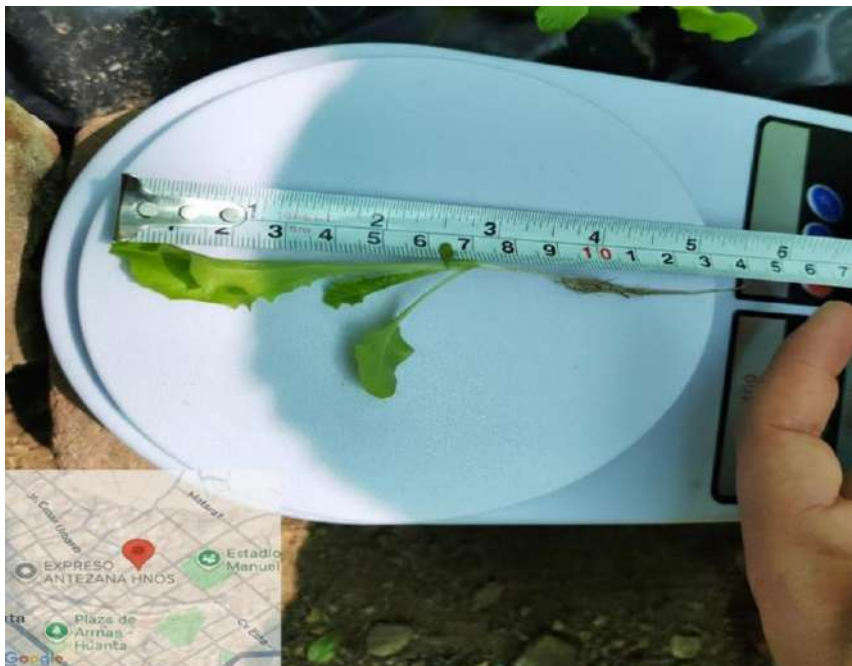


– **Número de hojas**

El conteo de las hojas de lechuga se limita a las hojas verdaderas, esto es, las hojas que se desarrollan después de las hojas cotiledonarias. Para ello, se lleva a cabo un conteo visual a cada planta, de tal forma que se asegure que ninguna hoja se contabilice dos veces. En caso de contar con un alto número de plantas, pueden muestrearse un número representativo de las plantas y contabilizar las hojas y a partir de ese número, se puede extrapolar el conteo promedio al resto de las plantas.

Figura 36

Número de hojas de la lechuga en etapa de desarrollo



– **Diámetro de las lechugas**

Para obtener el diámetro de una lechuga, se mide la distancia más amplia de la planta, a nivel del suelo, donde las hojas forman una roseta. Para este propósito, se emplea una cinta métrica o un calibrador. Se mide de un extremo a otro, pasando por el centro de la planta.

Figura 37

Diámetro de las lechugas en etapa de cosecha



– **Peso fresco de la lechuga**

El peso fresco de la lechuga se contabiliza justo después de la cosecha, cuando se pesa la planta en su totalidad, incluyendo las raíces y las hojas, manteniendo la planta sin permitir que se seque. Para esto, se corta la planta a nivel del suelo, y se pesa posteriormente. Se utiliza una balanza de precisión para esto.

Figura 38

Peso fresco de la lechuga



– **Peso seco de la lechuga**

El peso seco de la lechuga se determina después de cosechar la planta y eliminar toda la humedad que contiene. Para esto, se corta la planta a nivel del suelo y se coloca en un horno de secado a una temperatura controlada de 60 a 70 °C durante 24 a 48 h, hasta que la planta se estabiliza en peso. Se requiere completo secado, para a continuación determinar el peso seco en una balanza de precisión.

Figura 39

Peso seco de la lechuga



– **Tasa de crecimiento**

La tasa de crecimiento de una planta puede calcularse a partir de una fórmula básica que relaciona el cambio de biomasa o la altura de la planta en un lapso de tiempo determinado. En el caso de una lechuga, si se mide la altura o el peso, se pueden usar las siguientes fórmulas:

– **Cálculo de la tasa de crecimiento**

Para cada grupo (LED y otro tipo de iluminación), calcula la tasa de crecimiento promedio en cada uno de los parámetros medidos (altura, número de hojas, peso fresco y peso seco).

$$Tasa\ de\ crecimiento = \frac{Valor\ final - Valor\ inicial}{Tiempo\ transcurrido}$$

2.5.6 Comparar la productividad de cultivos de lechuga bajo iluminación LED frente a iluminación convencional.

Grupos de Tratamiento

Divide las plantas de lechuga en tres grupos:

Grupo C (iluminación LED roja): Expuesto a iluminación LED, con un espectro de luz y ciclo de iluminación controlado (12 horas de luz natural y 12 horas de oscuridad luz led color Rojo).

Grupo B (iluminación LED azul): Expuesto a iluminación LED, con un espectro de luz y ciclo de iluminación controlado (12 horas de luz natural y 12 horas de oscuridad luz led color Azul).

Grupo A (iluminación natural o control): Expuesto a otro tipo de iluminación de luz natural).

Variables a Medir

- **Cantidad de hojas**

Treinta días después de la plantación, se contó el número de hojas de cada planta en cada tratamiento.

- **Longitud de la hoja**

A los 30 días después del trasplante, se realizó la medición. Se midió la distancia entre el cuello de la planta y el ápice de la hoja la punta de la hoja. Se midió la hoja primaria de cada planta en función del tratamiento cada planta en función del tratamiento; esta medición se dio en cm.

Figura 40

Longitud de la lechuga en etapa de cosecha



– **Anchura de las hojas**

A los 30 días del trasplante, se tomó la medida en general en función del tratamiento. Se midió desde el extremo derecho al izquierdo de la planta 30 días, utilizando una regla graduada. Esta medida se convirtió a centímetros utilizando una regla graduada.

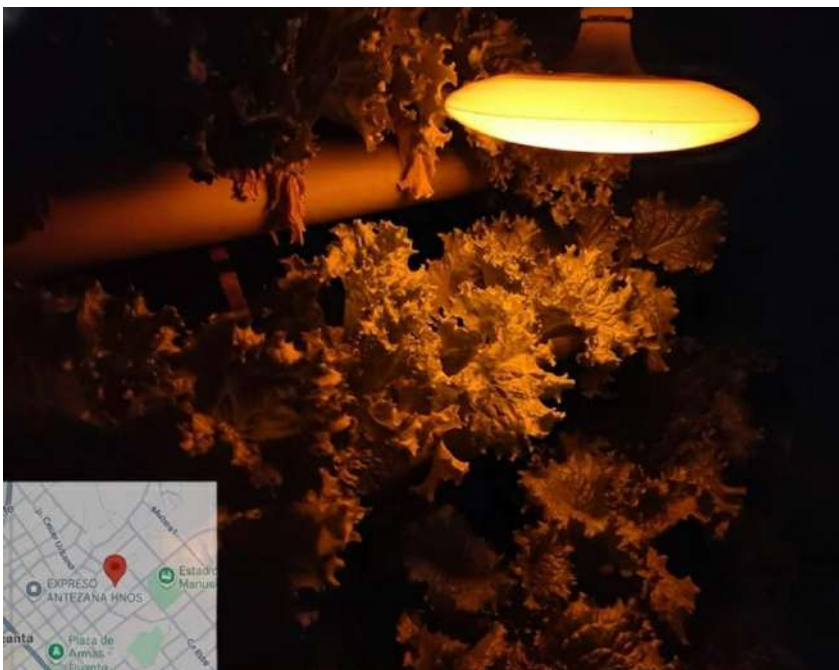
Figura 41

Lechuga para cosechar del tratamiento de luz azul



Figura 42

Lechuga para cosechar del tratamiento de luz Rojo



– **Peso en fresco**

El pesaje se realizó 45 días después del trasplante, coincidiendo con el momento de la cosecha. Para ello, cada lechuga fue pesada individualmente con una balanza analítica, registrándose su peso en gramos (g) según el tratamiento correspondiente.

Figura 43

Registro del peso de lechuga fresca cosechada



– **Peso seco**

Treinta días después del trasplante, se procedió al pesaje durante la cosecha de acuerdo con el tratamiento, cada planta se mantuvo en la mufla eléctrica a 75 °C durante 24 horas. La unidad de medida para esta medición es el gramo (g).

Figura 44

Registro del peso de lechuga fresca cosechada



– **Cálculo de la Productividad**

Con los datos recopilados, puedes calcular y comparar la productividad de los cultivos en ambos grupos utilizando las siguientes fórmulas:

– **Rendimiento por Área (kg/m²)**

Para calcular el rendimiento por área, debes medir el peso total de las lechugas cosechadas en cada unidad de superficie. Si las plantas cultivadas bajo iluminación LED tienen un mayor rendimiento o crecimiento, puedes analizar la eficiencia de la iluminación.

$$\text{Rendimiento por área} = \frac{\text{Peso total cosechado}}{\text{Área cultivada}}$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Determinar la influencia de la iluminación LED en la tasa de crecimiento de la lechuga

La evaluación consistió en 150 plantas de lechuga distribuidas en tres tratamientos experimentales de 50 plantas por cada tratamiento. Para cada tratamiento, se seleccionaron 15 plantas de manera representativa, sobre las cuales se realizó el registro de los parámetros agronómicos descritos en el protocolo. Esta selección permitió la adquisición de una muestra estadísticamente adecuada que, a su vez, facilitó que los resultados fuesen confiables, permitiendo así una comparación objetiva entre los diferentes tratamientos.

Tabla 7

Grupos de tratamientos

Grupo	Tratamiento	Intensidad LED	Potencia	Fotoperíodo	Nº Plantas	Horario LED
B	Control (Luz Natural)	-	-	Natural	50	-
A	Luz Natural + LED Azul	200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	48W	12 h/día	50	6:00 pm - 6:00 am
A	Luz Natural + LED Rojo	200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	48W	12 h/día	50	6:00 pm - 6:00 am

Según la Tabla 7 se observa que con $n = 150$ plantas. Se aprecia que el diseño es capaz de comparar el efecto que el uso de diferentes luces espectrales puede tener sobre el crecimiento y rendimiento de las plantas bajo un fotoperíodo y con intensidad de luz actínica todo el tiempo.

Tabla 8*Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)*

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	2.5	1.8	7.5	4	3.2	5.1	-
15/09/2025	Vegetativo	11	8.5	16	8	7.8	12.5	-
22/09/2025	Roseta	20	15	18	12	10.2	18.3	-
30/10/2025	Cosecha	32	22	19	14	12.5	22.1	97.8

Según la Tabla 8 se ve que, bajo condiciones de luz natural, el crecimiento de las plantas desde la fase de germinación hasta la cosecha se acompañó de aumentos progresivos en la longitud y el ancho de las hojas, el área foliar, el número de hojas, el diámetro de la roseta, y el peso fresco obtenido al final del ciclo se registró. El patrón ilustra una dinámica de control vegetativa estable, que sirve como línea base para contrastar el efecto del aporte de la iluminación LED.

Tabla 9*Registro semanal - Tratamiento B: Led Azul (450 nm)*

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	3.8	2.3	12.1	5	4.8	6.9	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.2	11.5	29.8	11	10.5	18.2	-
22/09/2025	Roseta	28.5	19.8	35.2	16	14.2	25.8	-
30/10/2025	Cosecha	41.3	25.6	42.7	19	17.8	31.5	112.4

Según la Tabla 9 se midieron 3,8 cm de largo de hoja, 2,3 cm de ancho, 12,1 cm² de área foliar, 5 hojas, 4,8 cm de altura y 6,9 cm de diámetro de roseta. En la etapa de roseta,

estos valores se incrementaron a 28,5 cm, 19,8 cm, 35,2 cm², 16 hojas, 14,2 cm y 25,8 cm, respectivamente. En la cosecha se lograron 41,3 cm de largo de hoja, 25,6 cm de ancho, 42,7 cm² de área foliar, 19 hojas, 17,8 cm de altura, 31,5 cm de diámetro de roseta y 112,4 g de peso fresco.

Tabla 10

Registro semanal - Tratamiento C: Led Red (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	2.8	2.1	8.9	5	3.5	5.8	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.5	10.8	24.3	10	6.8	15.2	-
22/09/2025	Roseta	22.8	18.2	26.5	15	9.5	20.8	-
30/10/2025	Cosecha	35.2	24.3	38.9	17	11.8	26.3	127.1

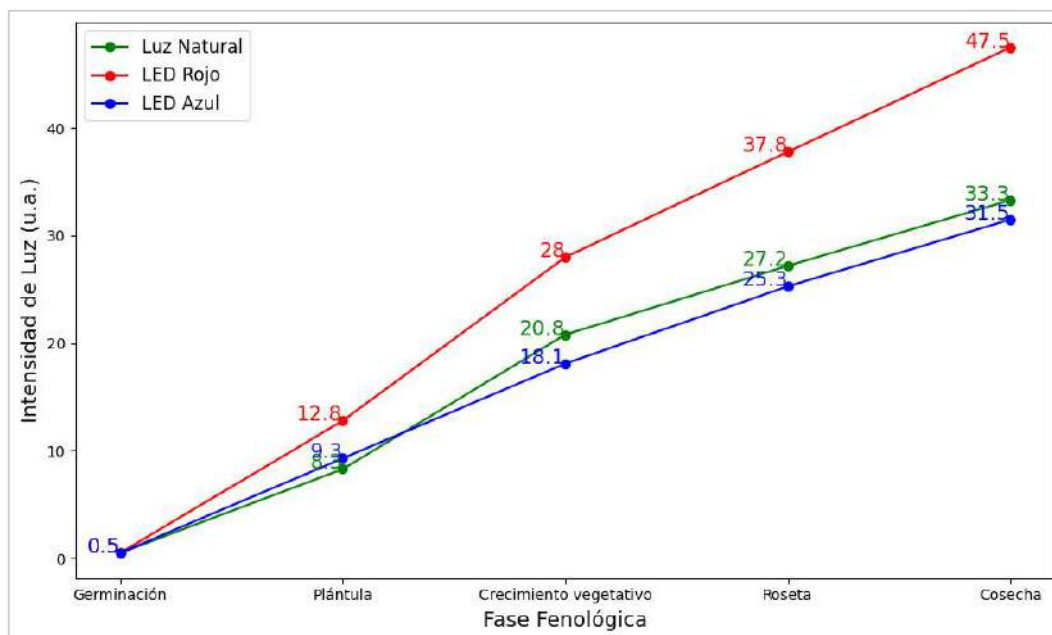
Según la Tabla 10 se ve que las plantas progresaron desde estado de plántula con 2,8 cm de largo de hoja, 2,1 cm de ancho, 8,9 cm² de área foliar, 5 hojas, 3,5 cm de altura y 5,8 cm de diámetro de roseta. En el crecimiento vegetativo, las plantas alcanzaron las medidas 13,5 × 10,8 cm (largo × ancho de hoja), 24,3 cm² de área foliar, 10 hojas, 6,8 cm de altura y 15,2 cm de diámetro de roseta. En roseta se registraron las siguientes medidas 22,8 × 18,2 cm, 26,5 cm² de área foliar, 15 hojas, 9,5 cm de altura y 20,8 cm de diámetro de roseta. A cosecha, estas medidas fueron 35,2 cm (largo de hoja), 24,3 cm (ancho), 38,9 cm² (área foliar), 17 hojas, 11,8 cm (altura), 26,3 cm (diámetro de roseta) y 127,1 g de peso fresco.

– Crecimiento en altura

A lo largo de un período de 8 semanas, se midió semanalmente la altura promedio de las plantas en dos condiciones de iluminación: LED y luz natural. Los resultados indicaron que las plantas bajo iluminación LED mostraron un crecimiento en altura notablemente mayor en comparación con las que estuvieron expuestas a luz natural.

Tabla 11*Crecimiento semanal bajo iluminación LED de color Rojo y Azul y luz natural*

Fecha	Fase Fenológica	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
01/09/2025	Germinación	0.5	0.5	0.5
04/09/2025	Plántula	8.3	12.8	9.3
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	20.8	28	18.1
22/09/2025	Roseta	27.2	37.8	25.3
30/10/2025	Cosecha	33.3	47.5	31.5

Figura 45*Crecimiento semanal bajo iluminación LED y luz natural*

Según la Figura 45 y Tabla 11 En todas las fases, la luz roja LED mostró un crecimiento sostenido, teniendo diferencias respecto a la luz natural de 54,2 % (plántula 12,8 cm vs 8,3 cm), 34,6 % (vegetativo 28,0 cm vs 20,8), 39,0 % (roseta 37,8 cm vs 27,2 cm), y 42,6 % (cosecha 47,5 cm vs 33,3 cm). La luz LED azul solo mostró un crecimiento un poco mayor respecto a la luz natural en la fase de plántula (+12,0 %) y un crecimiento menor en las fases de vegetativo (–13,0 %), roseta (– 7,0 %), y cosecha (–5,4 %), en estas etapas la morfología era más compacta. A nivel general, se establece que el

espectro rojo más que todos acelera el crecimiento en la altura de la lechuga durante todo el ciclo, y el azul, bajo las condiciones evaluadas, no mejora la altura final.

– **Comparativa de peso fresco (g) - Cosecha final**

Tabla 12

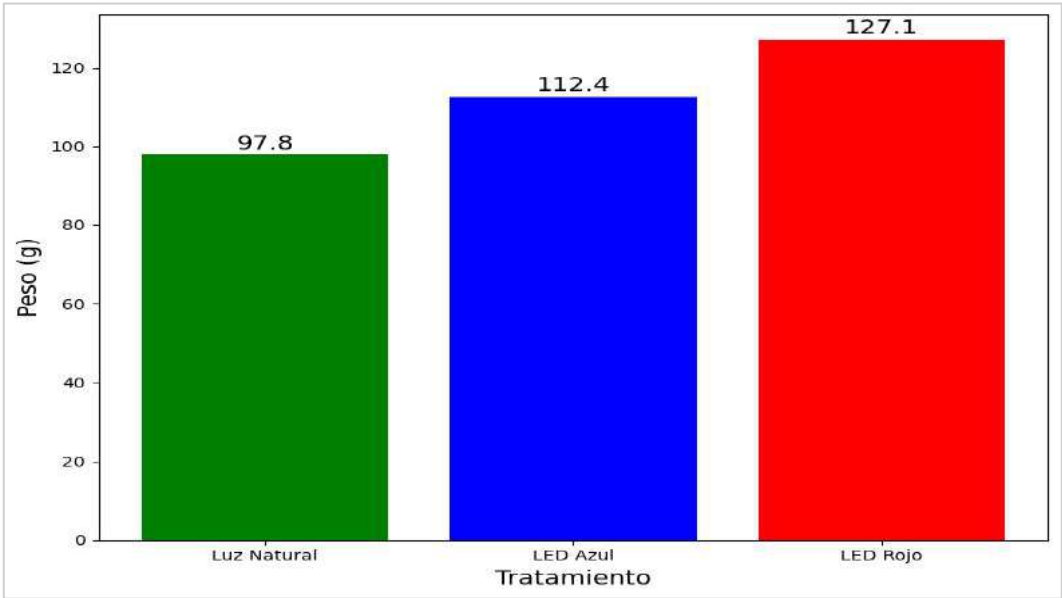
Comparativa de peso fresco (g) - Cosecha final

Tratamiento	Peso (g)	Diferencia vs Natural	Incremento	Significancia
Luz Natural	97.8	-	-	Control
LED Azul	112.4	+14.6 g	+15%	$p < 0.05$
LED Rojo	127.1	+29.3 g	+30%	$p < 0.01$

La tabla 12 muestra el crecimiento semanal promedio en altura de plantas de lechuga cultivadas bajo iluminación LED en comparación con aquellas expuestas a luz natural.

Figura 46

Comparativa de peso fresco (g) - Cosecha final



La Figura 46 muestra que la lechuga cultivada bajo iluminación LED, especialmente con luz roja, presentó un comparativa de peso fresco (g) - cosecha final, evidenciando un desarrollo más acelerado durante el ciclo del cultivo

Según la Figura 46 y Tabla 12 los datos muestran que la productividad con LED mejora comparada con la luz natural. El LED rojo maximiza el peso fresco. El LED azul incrementa el rendimiento, aunque en menor magnitud. Estos resultados son consistentes con la mayor expansión foliar y diámetro de roseta que se observó bajo LED y que se traduce en más biomasa comercial por planta.

– **Comparativa de diámetro de roseta (cm)**

Tabla 13

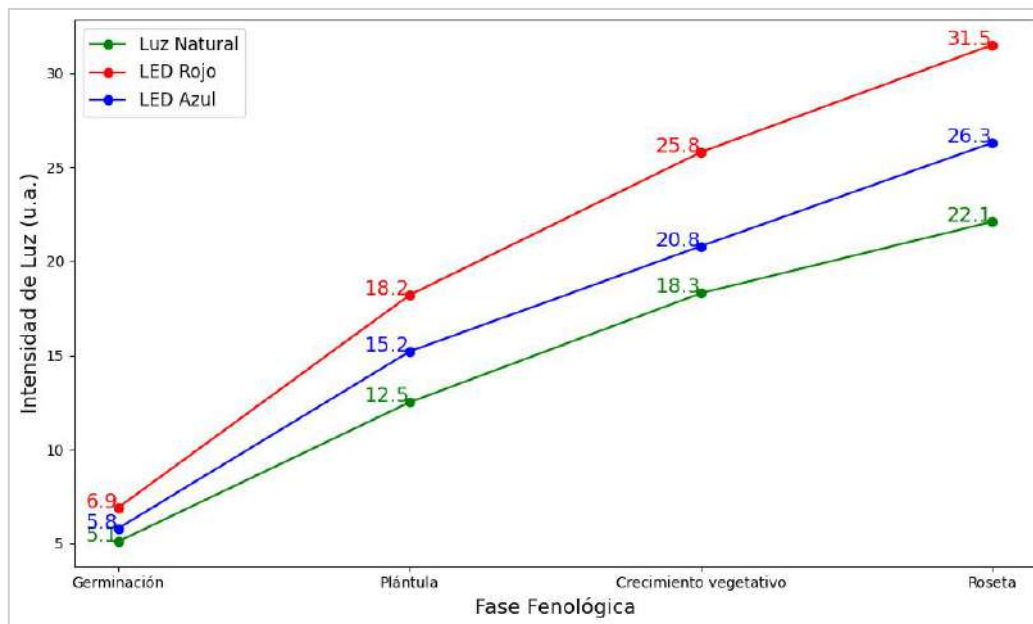
Comparativa de diámetro de roseta (cm)

Fecha	Fase Fenológica	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
01/09/2025	Germinación	-	-	-
04/09/2025	Plántula	5.1	6.9	5.8
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	12.5	18.2	15.2
22/09/2025	Roseta	18.3	25.8	20.8
30/09/2025	Cosecha	22.1	31.5	26.3

La Tabla 13 muestra que el diámetro de roseta fue mayor en las lechugas cultivadas bajo iluminación LED, destacando el tratamiento con luz roja, lo que indica un mejor desarrollo morfológico y mayor expansión foliar en comparación con la luz natural.

Figura 47

Comparativa de diámetro de roseta (cm)



La Figura 47 evidencia que las lechugas con mayor diámetro de roseta, bajo iluminación LED, especialmente roja, alcanzaron un mayor peso fresco en la cosecha final.

Según la Figura 47 y Tabla 13 el diámetro de la roseta aumentó a lo largo del ciclo en los tres tratamientos. Durante la etapa de plántula, los promedios fueron de 6.9 cm (LED rojo), 5.8 cm (LED azul) y 5.1 cm (luz natural). En la fase de crecimiento vegetativo, los promedios fueron de 18.2 cm (LED rojo), 15.2 cm (LED azul) y 12.5 cm (luz natural) de 18.2, 15.2 y 12.5 cm, respectivamente. En la etapa de roseta, los promedios fueron de 25.8 cm (rojo), 20.8 cm (azul) y 18.3 cm (natural). Durante la cosecha, el LED rojo fue el que más diámetro presentó con 31.5 cm, mientras que el LED azul, con 26.3 cm, y luz natural con 22.1 cm quedando a 22 cm.

+

– Tasa de crecimiento en altura según etapa fenológica

Tabla 14

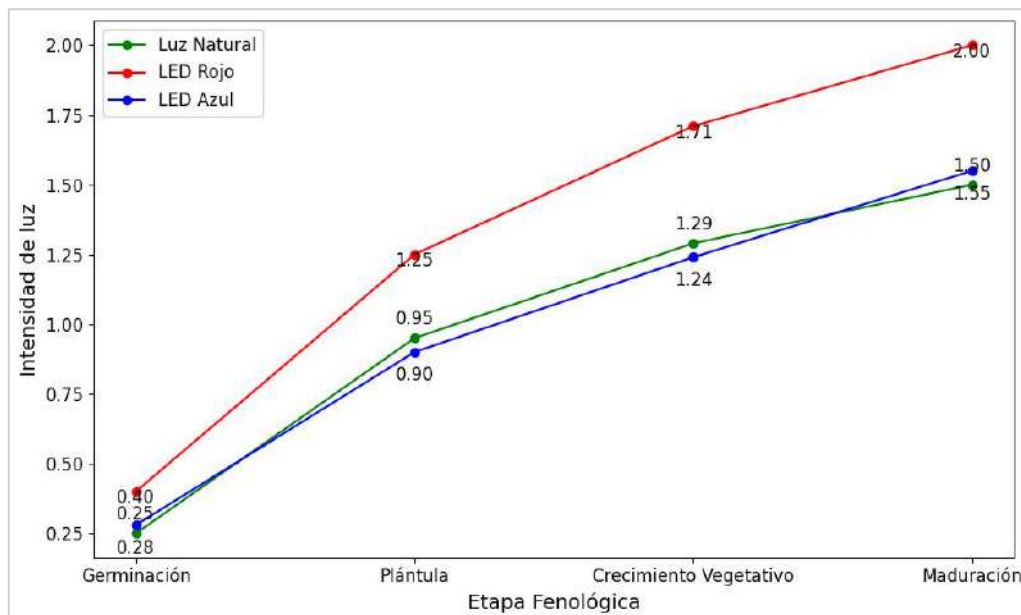
Tasas de crecimiento en altura según etapa fenológica

Fecha	Etapa Fenológica	Días desde siembra	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
01-04/11/2025	Germinación	0-4	0.25	0.4	0.28
04-15/11/2025	Plántula	4-14	0.95	1.25	0.9
15-22/11/2025	Crecimiento Vegetativo	14-21	1.29	1.71	1.24
22-30/11/2025	Maduración	21-30	1.5	2	1.55
PROMEDIO	Ciclo Completo	0-30	1.1	1.34	0.99

La Tabla 14 evidencia que la tasa de crecimiento en altura varía según la etapa fenológica del cultivo, siendo mayor durante la fase de crecimiento vegetativo, especialmente en las lechugas bajo iluminación LED.

Figura 48

Tasas de crecimiento en altura según etapa fenológica



La Figura 48 muestra que el diámetro de roseta varía según la etapa fenológica del cultivo, siendo mayor durante la fase de crecimiento vegetativo, especialmente en lechugas bajo iluminación LED.

Según la Figura 48 y la Tabla 14 Se presentan las tasas diarias de crecimiento en altura (cm/día) por etapa: germinación (0–4 días), plántula (4–14), crecimiento vegetativo (14–21) y maduración (21–30). El LED rojo registró 0,40; 1,25; 1,71; 2,00 cm/día, la luz natural 0,25; 0,95; 1,29; 1,50 cm/día y el LED azul 0,28; 0,90; 1,24; 1,55 cm/día. En promedio de ciclo (0–30 días): 1,34 (rojo), 1,11 (natural) y 0,99 (azul).

3.1.2 Comparar la productividad de lechugas cultivadas con iluminación LED y luz natural

– Cálculo de parámetros de crecimiento

Al concluir el experimento, se cosecharon las plantas para evaluar la cantidad de biomasa producida (peso fresco y seco).

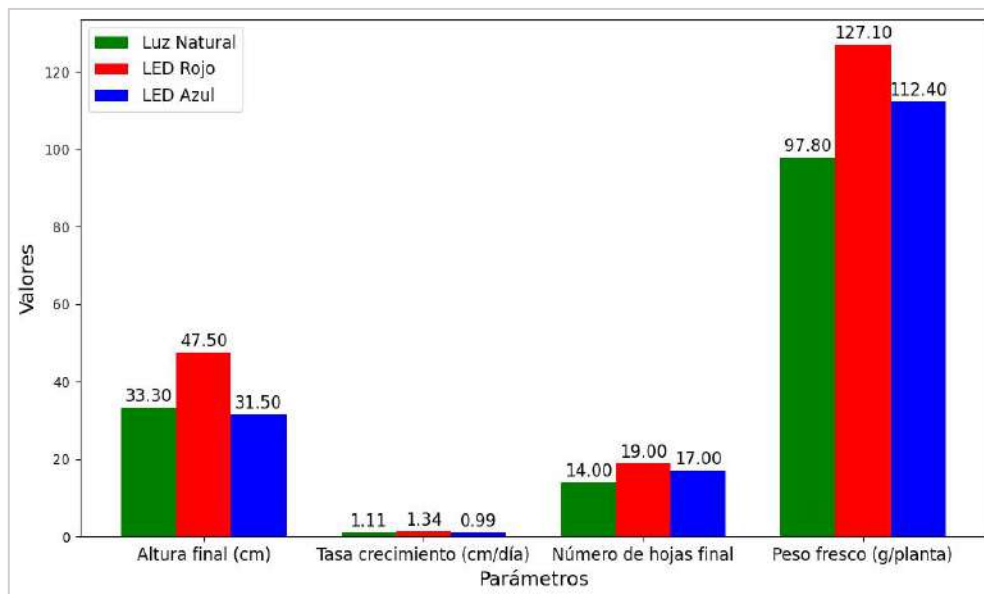
Tabla 15

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	33.3	47.5	31.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.11	1.34	0.99
Número de hojas final	14	19	17
Peso fresco (g/planta)	97.8	127.1	112.4

Figura 49

Tasas de crecimiento en altura según etapa fenológica

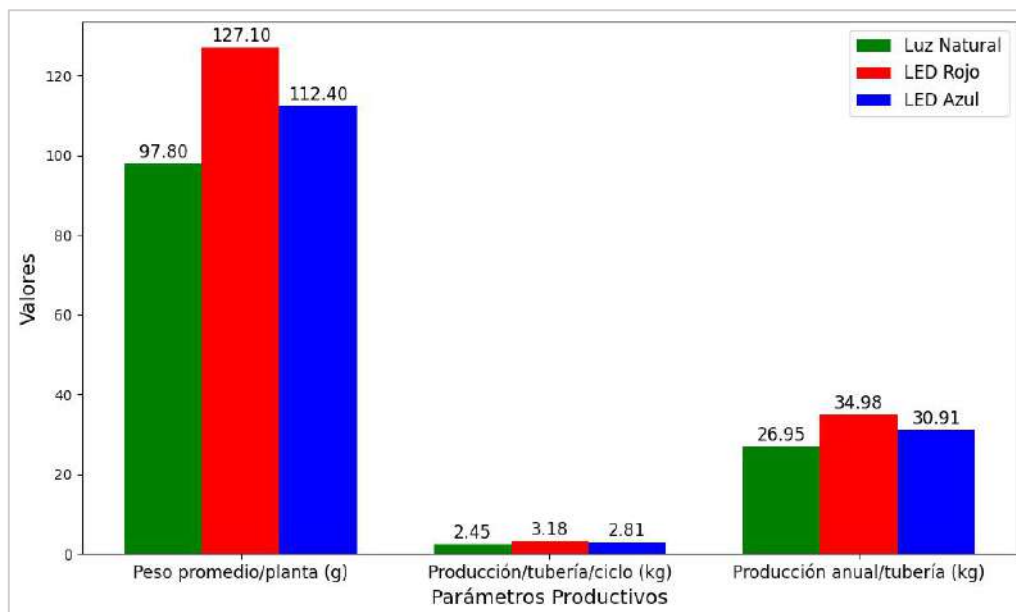


La Figura 49 muestra que la tasa de crecimiento en altura varía según la etapa fenológica del cultivo, registrándose los mayores incrementos durante la fase de crecimiento vegetativo bajo iluminación LED.

Según la Figura 49 y Tabla 15 el cálculo de los parámetros de crecimiento muestra que, al momento de la cosecha, el LED rojo (660 nm) obtuvo los mejores valores integrales: altura final 47.5 cm, tasa de crecimiento 1.34 cm/día, 19 hojas y peso fresco 127.1 g/planta; el LED azul (450 nm) presentó 31.5 cm, 0.99 cm/día, 17 hojas y 112.4 g; mientras que la luz natural registró 33.3 cm, 1.11 cm/día, 14 hojas y 97.8 g. Estas diferencias se explican por la dinámica del ciclo.

Tabla 16*Productividad por tubería de invernadero*

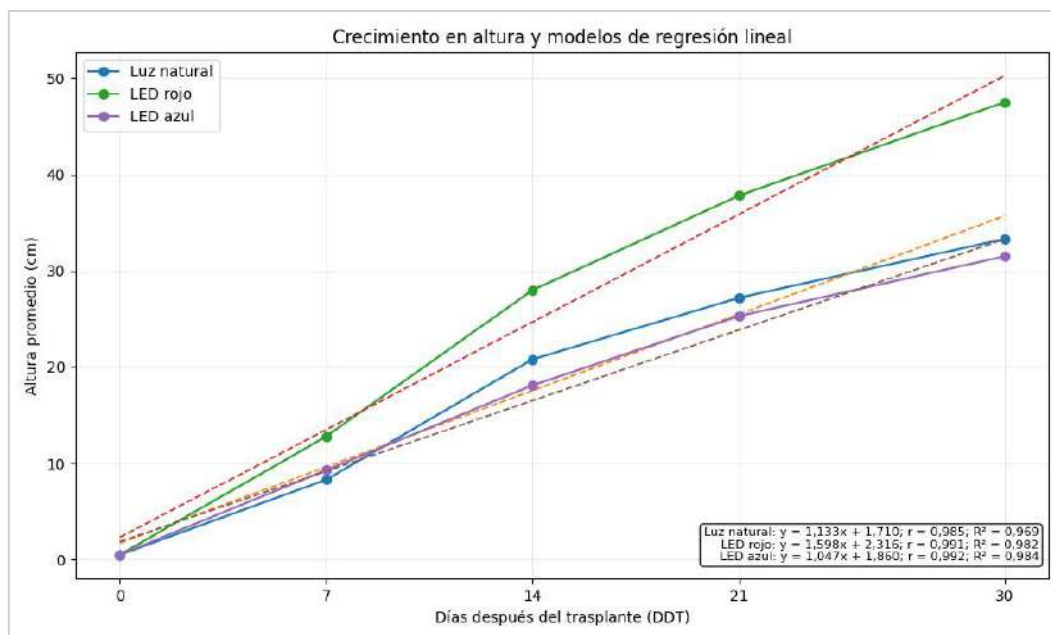
Parámetro Productivo	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Plantas/tubería	25	25	25
Peso promedio/planta (g)	97.8	127.1	112.4
Producción/tubería/ciclo (kg)	2.45	3.18	2.81
Ciclos por año	11	11	11
Producción anual/tubería (kg)	26.95	34.98	30.91

Figura 50*Rendimiento en biomasa bajo iluminación LED y luz natural.*

Se observa que en la Figura 50 y Tabla 16 que se trabajó con 25 plantas por tubería, el peso promedio por planta fue de 97.8 g (luz natural), 127.1 g (LED rojo) y 112.4 g (LED azul). Esto resulta en rendimientos por tubería y por ciclo de 2.45 kg (natural), 3.18 kg (rojo) y 2.81 kg (azul). Al proyectar 11 ciclos por año, la producción anual por tubería llega a 26.95 kg (natural), 34.98 kg (rojo) y 30.91 kg (azul).

Figura 51

Crecimiento semanal bajo iluminación LED y luz natural



Según la Figura 51, el tratamiento con LED rojo presentó la mayor altura durante todo el ciclo. La regresión lineal confirmó una asociación positiva muy fuerte entre los días después del trasplante y la altura: luz natural, $y = 1,133x + 1,710$ ($r = 0,985$; $R^2 = 0,969$; $p = 0,002$); LED rojo, $y = 1,598x + 2,316$ ($r = 0,991$; $R^2 = 0,982$; $p = 0,001$); y LED azul, $y = 1,047x + 1,860$ ($r = 0,992$; $R^2 = 0,984$; $p < 0,001$). La pendiente del tratamiento rojo fue la mayor, lo que indica un incremento promedio de 1,598 cm de altura por día dentro del intervalo evaluado. Estas ecuaciones describen la tendencia de los promedios y no sustituyen el análisis de los datos individuales.

Tabla 17

Ecuaciones de regresión lineal para altura de planta

Tratamiento	Ecuación	Pendiente (cm/día)	r	R²	p
Luz natural	$y = 1,133x + 1,710$	1,133	0,985	0,969	0,002
LED rojo	$y = 1,598x + 2,316$	1,598	0,991	0,982	0,001
LED azul	$y = 1,047x + 1,860$	1,047	0,992	0,984	< 0,001

La tabla 17 x = días después del trasplante; y = altura promedio de planta (cm). Los modelos se calcularon con los promedios observados a 0, 7, 14, 21 y 30 DDT

3.2. Discusiones

En la presente investigación se evaluó el efecto de la iluminación LED roja y azul sobre el crecimiento en altura de *Lactuca sativa* en vivero, comparándolo con un tratamiento control bajo luz natural. Los resultados mostraron diferencias claras entre los tratamientos, evidenciando que la luz LED roja promovió un mayor crecimiento vegetativo en comparación con la luz natural y la luz LED azul. Al finalizar el ciclo de evaluación, las plantas sometidas a luz LED roja alcanzaron una altura promedio de 47,5 cm, mientras que aquellas expuestas a LED azul registraron 31,5 cm y las del tratamiento con luz natural alcanzaron 33,3 cm. Asimismo, la tasa promedio de crecimiento fue superior con LED rojo, con 1,34 cm/día, seguida de la luz natural con 1,11 cm/día y del LED azul con 0,99 cm/día. Esta ventaja del LED rojo se mantuvo incluso durante la fase de maduración, donde se observó una tasa de 2,0 cm/día frente a 1,5 cm/día en el tratamiento control. Estos resultados permiten interpretar que la luz LED roja favorece de manera más eficiente el crecimiento en altura de la lechuga, debido a que este espectro estimula procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la expansión foliar, fundamentales en hortalizas de hoja. Por ello, los hallazgos respaldan la hipótesis de investigación, al demostrar que la iluminación LED roja influye favorablemente en este indicador agronómico, mientras que la luz LED azul no mostró una respuesta superior al control. Además, los resultados coinciden con estudios previos, como los de Mulato (2023) y Ángeles (2023), quien obtuvo un peso fresco de 228 g en sistemas puramente hidropónicos, los resultados en Huanta (127,1 g) sugieren que factores ambientales adicionales o la variedad *Green Leaf* influyen en la acumulación final de biomasa, quienes reportan mejoras morfológicas bajo iluminación LED suplementaria. En consecuencia, se concluye que, en las condiciones del presente estudio, la luz LED roja constituye la alternativa más eficiente para maximizar el crecimiento en altura y acelerar el desarrollo vegetativo de *Lactuca sativa*.

En la presente investigación, al contrastar la productividad final de *Lactuca sativa* en función de la biomasa o peso fresco, número de hojas y diámetro de roseta entre tratamientos con luz LED y luz natural, se observó que la iluminación suplementaria con LED, especialmente la roja, generó una respuesta superior respecto al control. En la cosecha, el peso fresco por planta alcanzó 127,1 g con LED rojo, 112,4 g con LED azul y 97,8 g con luz natural, evidenciándose incrementos de 30 % con LED rojo y 15 % con LED azul en comparación con el tratamiento control. Del mismo modo, el diámetro final de la roseta aumentó de 22,1 cm en luz natural a 31,5 cm con LED rojo y 26,3 cm con LED azul, mientras que el número de hojas se incrementó de 14 en el control a 19 y 17

hojas, respectivamente. A nivel de sistema, la producción por tubería y por ciclo fue de 3,18 kg con LED rojo, 2,81 kg con LED azul y 2,45 kg con luz natural; proyectada a 11 ciclos por año, la producción anual alcanzó 34,98 kg, 30,91 kg y 26,95 kg, respectivamente. Estos resultados permiten interpretar que la luz LED roja favoreció de manera más eficiente la acumulación de biomasa comercial, el desarrollo foliar y el rendimiento total del cultivo, lo que respalda la hipótesis de investigación. Asimismo, los hallazgos coinciden con Ángeles (2023), quien reporta mejoras significativas en el peso fresco, biomasa y número de hojas bajo iluminación LED, así como con Guillén et al. (2017), quienes destacan efectos positivos de esta tecnología sobre el crecimiento y la productividad en ambientes controlados. Del mismo modo, la superioridad del LED rojo concuerda con Mulato (2023), quien reportó mayores rendimientos agronómicos bajo este espectro. Desde una perspectiva reflexiva, la menor respuesta del LED azul podría estar asociada a una morfología más compacta y a una menor expansión del área fotosintética efectiva. En consecuencia, se concluye que, en las condiciones evaluadas, la luz LED roja fue la alternativa más eficiente para incrementar la productividad comercial de la lechuga en vivero, constituyéndose en una tecnología prioritaria para mejorar el rendimiento del cultivo en invernaderos de la región.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. La investigación concluye que la iluminación LED favoreció significativamente el crecimiento y la productividad del cultivo de lechuga en Huanta, destacándose el tratamiento con LED rojo como el más eficiente. Este tratamiento alcanzó una altura final de 47,5 cm y una velocidad de crecimiento de 1,34 cm/día, superando tanto a la luz natural (33,3 cm y 1,11 cm/día) como al LED azul (31,5 cm y 0,99 cm/día). Del mismo modo, el peso fresco obtenido con LED rojo fue de 127,1 g, mientras que bajo luz natural se registraron 97,8 g, confirmando así la hipótesis general sobre el efecto positivo de la tecnología LED en el rendimiento del cultivo.
2. En relación con el primer objetivo específico, se determinó que la iluminación LED tuvo una influencia directa en la tasa de crecimiento en altura. El espectro rojo presentó un promedio de 1,34 cm/día, permitiendo obtener plantas con una altura final 42,6 % superior al tratamiento control. Aunque el LED azul mostró un

desarrollo inicial favorable durante la etapa de plántula, su efecto no logró superar la altura final obtenida con luz natural debido a la formación de plantas más compactas. En consecuencia, el espectro rojo se consolidó como el más eficiente para estimular un crecimiento vertical sostenido durante las distintas fases fenológicas.

3. Respecto al segundo objetivo específico, se concluye que el uso de iluminación LED roja incrementó significativamente la productividad comercial en comparación con la iluminación convencional. El tratamiento permitió un aumento del 30 % en el peso fresco, además de favorecer el desarrollo morfológico de las plantas, alcanzando rosetas de 31,5 cm de diámetro y un promedio de 19 hojas por planta. Asimismo, la proyección anual por tubería dentro del sistema hidropónico alcanzó 34,98 kg con LED rojo, representando una ganancia adicional de 8,03 kg anuales frente a la producción obtenida bajo luz natural, posicionando este espectro como la alternativa más eficiente para la producción en invernadero.

4.2 Recomendaciones

1. Se recomienda priorizar el uso de iluminación LED de espectro rojo para maximizar la producción de biomasa, debido a que este tratamiento generó un incremento del 30 % en el peso fresco y una tasa de crecimiento de 1,34 cm/día. Por ello, los productores de la zona de Huanta podrían implementar este tipo de iluminación como complemento principal para reducir los ciclos de producción y obtener plantas con mayor peso comercial.
2. Se sugiere implementar sistemas de iluminación híbridos que combinen aproximadamente 80 % de espectro rojo y 20 % de espectro azul, con el objetivo de aprovechar la elevada acumulación de biomasa generada por la luz roja y, al mismo tiempo, mejorar la estructura foliar y evitar una elongación excesiva de las hojas mediante el aporte del espectro azul.
3. Se recomienda desarrollar una transición progresiva desde sistemas de iluminación natural hacia iluminación LED roja en los canales de cultivo con mayor rotación productiva. Paralelamente, sería conveniente realizar ensayos adicionales con diferentes combinaciones de espectros rojo y azul para optimizar la calidad estética y nutricional del producto final.
4. Se considera importante realizar análisis posteriores a la cosecha enfocados en la calidad nutricional y el contenido de compuestos nutraceuticos, a fin de determinar cómo los espectros LED rojo y azul influyen en la acumulación de vitaminas,

compuestos fenólicos y antocianinas, incrementando así el valor funcional de la lechuga producida en ambientes controlados.

5. Se recomienda incorporar sistemas automatizados y sensores ambientales que permitan monitorear variables como radiación fotosintéticamente activa, temperatura y consumo energético, optimizando el funcionamiento de la iluminación suplementaria de acuerdo con la disponibilidad de luz natural dentro del invernadero.
6. Finalmente, se sugiere evaluar la rentabilidad económica y el balance energético de los sistemas LED a largo plazo, considerando que su alta eficiencia puede disminuir los costos operativos por kilogramo de biomasa producida y favorecer la sostenibilidad de sistemas agrícolas verticales y urbanos frente a tecnologías convencionales.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Ángeles, G. (2023). *Producción de lechuga con luz LED suplementaria en dos sistemas hidropónicos cerrados* [Tesis de Maestría en Ciencias]. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia.
- Casierra, F., Peña, J., & Ulrichs, C. (2011). *Crecimiento y eficiencia fotoquímica del fotosistema ii en plantas de fresa (fragaria sp.) afectadas por la calidad de la luz. implicaciones agronómicas.*
- Cedillo, E., Martínez, P., Casiano, H., Hernández, L., Padilla, M., & Rodríguez, A. (2021). *Manual de producción de lechuga bajo invernadero.*
- DOF. (1984). *Ley sobre el escudo, la bandera y el himno nacionales. Congreso de los Estados Unidos SMexicanos.* Diario Oficial de la Federación.

- Duffetel, D. (2008). *Panorama de México a Puebla. Mapa de Balbuena*. (X. Artes de México, Ed.). Secretaría de Cultura-INAH.
- Ehow. (2021). *¿Qué tipo de luz hace que las plantas crezcan más: fluorescente o incandescente?* Ehow.com.
- Espinal, J. (2021). *Efecto de la iluminación LED en un sistema vertical de producción con lechuga (Lactuca sativa L.) bajo ambiente controlado*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Flores, A. (2007). *Efecto de frecuencias de poda en dos variedades de acelga (Beta vulgaris var. Cicla L.) en ambiente protegido*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Flores, S. (2021). *Iluminación LED para el crecimiento y desarrollo de plantas hortícolas*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Gonzales, Y., & Ramírez, E. (2016). *Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF)*. Ingeniería y Tecnologías (Inf. Téc.), 80(2), 111-120.
- Guillén, V. M., Pinzón, Y. P., Espinosa, W., Serrano, J. E., Rosales, H., Brandao, J. L., & González, G. (2017). *Efecto de las luces LED en la calidad nutricional, crecimiento y desarrollo de la lechuga en ambientes controlados*. CEPIA.
- Hernández, C., & Aguirre, H. (2024). *La luz y su efecto en las plantas*. Elementos, 1(136), 17-22. www.elementos.buap.mx
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2019). *Fábricas de plantas: Un sistema de agricultura vertical en interiores para una producción eficiente de alimentos de calidad (2.^a ed.)*. Academic Press.
- InfoAgro. (s. f.). *La iluminación LED en agricultura. Ventajas e inconvenientes*.
- Jiménez, L. (2016). *Efecto de la intensidad lumínica de lámparas LED en la producción de lechuga (Lactuca sativa)*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo.
- Luengo, F. (2023). *La iluminación artificial en la historia: un recorrido desde la prehistoria hasta la actualidad*. ArqueoTimes, 1, 42-45.

- Li, Q., & Kubota, C. (2009). *Efectos de la calidad de la luz suplementaria sobre el crecimiento y los fitoquímicos de la lechuga baby leaf*. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.011>
- Martínez, G., Lara, A., Padilla, L., Luna, M., Avelar, mária, & Llamas, J. (2015). *Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno*. Terra Latinoamericana, 33.
- Mulato, J. (2023). *Efecto de la iluminación LED en la producción hidropónica de lechuga (Lactuca sativa L.) bajo invernadero*. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Monteith, J. L., & Moss, C. J. (1977). *El clima y la eficiencia de la producción de cultivos en Gran Bretaña*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(980), 277–294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., & Goudriaan, J. (1998). *Modelización de la producción de biomasa y el rendimiento de cultivos hortícolas: Una revisión*. *Scientia Horticulturae*, 74(1-2), 83–111. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00083-1)
- Nájera, C. (2020). *Evaluación de algunos factores de calidad y cantidad de los espectros de radiación en las plantas*. Universidad de Almería.
- Osram, O. (2016). *Horticulture Lighting with LEDs*. Osram.
- Pérez, A. (2021). *Dosis de guano de islas y potasio en el rendimiento de lechuga (Lactuca sativa L.) var. Grandes Lagos. Canaán, 2750 msnm – Ayacucho*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Agronomía.
- Ramos, Y., & Ramírez, E. (2016). *Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF)*. *Informador Técnico*, 80(2), 111-120.
- Rangel, J. (2015). *La iluminación artificial, historia, evolución y la tecnología LED*. facultad de Estudios Superiores Aragón.
- Roldán, G., & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de liminología neotropical*. Universidad de Antioquia.
- Resh, H. M. (2013). *Producción de alimentos hidropónicos: Guía definitiva para el horticultor avanzado y el productor comercial de hidroponía (7.ª ed.)*. CRC Press.

- Sanz, D. (2016). *Características de un LED*. Actitud Ecológica.
- Stanghellini, C., van 't Ooster, B., & Heuvelink, E. (2019). *Greenhouse horticulture. Technology for Optimal Crop Production* (Wageningen Academic Publishers, Ed.).
- Talón, M., & Azcón-Bieto, J. (2013). *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (S. L. McGraw-Hill Interamericana de España, Ed.; 2.^a ed.). Universitat de Barcelona.
- Torre, J. (2014). *Iluminacion con LEDs*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial.
- Zambrano, F., Villafañe, R., & Figueroa, R. (2003). *Efecto de la profundidad del nivel freático sobre la producción de tomate en un suelo franco arenoso y bajo condiciones de invernadero*. Agronomía Tropical, 53(4).
- Zolezzi, M., Abarca, P., Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). *Manual de producción de lechuga* (Boletín INIA N° 374).

ANEXOS

Figura N°1 Área de invernadero estudiado en la noche



Figura N°2 Foco led color rojo utilizado en la investigación



Figura N°3 Peso seco de lechuga, pesado en balanza eléctrica



Figura N°4 Valle Peso seco de lechuga, pesado en balanza eléctrica



Figura N°5 Fotografía de almacigo de lechuga utilizando sustrato



Figura N°6 Fotografía de la medición en longitud de hoja



Figura N°7 Fotografía de foco led color rojo utilizado en la investigación



Figura N°8 Pesado en fresco de la lechuga con una balanza electrica

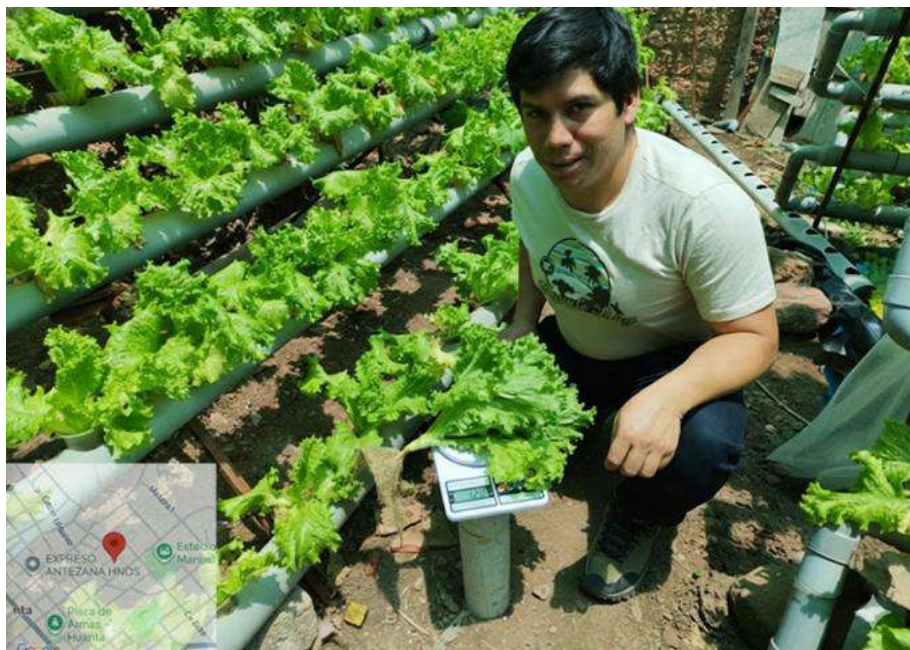


Figura N°9 Trasplante de lechuga en la etapa de plantula



Figura N°10 Fotografía de tanque de riego hidropónico



Figura N°11 Verificación de crecimiento de almácigos en etapa de germinación



Figura N°12 Instalación de hidropónico de lechugas



Figura N°13 Control fitosanitario de la lechuga en hidroponia



Figura N°14 Medición de tamaño de hojas de lechuga en hidropónico



Figura N°15 Trasplante de lechuga hacia los tubos hidropónicos



Tabla 1

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	28.3	42.5	26.5
Tasa crecimiento (cm/día)	0.96	1.19	0.84
Número de hojas final	11	16	14
Peso fresco (g/planta)	92.8	122.1	107.4

Tabla 2

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	29.8	43.5	27.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.01	1.24	0.89
Número de hojas final	12	17	15
Peso fresco (g/planta)	93.8	123.1	108.4

Tabla 3

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	30.8	44.5	28.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.06	1.29	0.94
Número de hojas final	13	18	16
Peso fresco (g/planta)	94.8	124.1	109.4

Tabla 4

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	31.8	45.5	29.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.08	1.31	0.96
Número de hojas final	13	18	16
Peso fresco (g/planta)	95.8	125.1	110.4

Tabla 5

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	32.8	46.5	30.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.10	1.33	0.98
Número de hojas final	14	19	17
Peso fresco (g/planta)	96.8	126.1	111.4

Tabla 6

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	33.3	47.5	31.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.11	1.34	0.99
Número de hojas final	14	19	17
Peso fresco (g/planta)	97.8	127.1	112.4

Tabla 7

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	33.8	47.5 _x	31.5 _x
Tasa crecimiento (cm/día)	1.11 _x	1.35	1.00
Número de hojas final	14	19	17
Peso fresco (g/planta)	98.8	128.1	113.4

Tabla 8

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	34.8	49.5	33.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.14	1.37	1.02
Número de hojas final	15	20	18
Peso fresco (g/planta)	99.8	129.1	114.4

Tabla 9

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	35.8	50.5	34.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.16	1.39	1.04
Número de hojas final	15	20	18
Peso fresco (g/planta)	100.8	130.1	115.4

Tabla 10

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	36.8	51.5	35.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.21	1.44	1.09
Número de hojas final	16	21	19
Peso fresco (g/planta)	101.8	131.1	116.4

Tabla 11

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	37.8	52.5	36.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.26	1.49	1.14
Número de hojas final	17	22	20
Peso fresco (g/planta)	102.8	132.1	117.4

Tabla 12

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	32.8	46.5	30.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.10	1.33	0.98
Número de hojas final	13	18	16
Peso fresco (g/planta)	96.8	126.1	111.4

Tabla 13

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	33.3	47.5	31.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.11	1.34	0.99
Número de hojas final	14	19	17
Peso fresco (g/planta)	97.8	127.1	112.4

Tabla 14

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	33.8	48.5	32.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.12	1.35	1.00
Número de hojas final	14	19	17
Peso fresco (g/planta)	98.8	128.1	113.4

Tabla 15

Cálculo de parámetros de crecimiento

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	34.3	49.5	33.5
Tasa crecimiento (cm/día)	1.13	1.36	1.01
Número de hojas final	15	20	18
Peso fresco (g/planta)	99.8	129.1	114.4

Tabla 1 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	—	—
04/09/2025	Plántula	2.0	1.4	6.0	3	2.7	4.6	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	9.0	6.5	14.0	6	6.8	10.5	—
22/09/2025	Roseta	18.0	13.0	16.0	10	9.2	16.3	—
30/10/2025	Cosecha	30.0	20.0	17.0	12	11.5	20.1	92.8

Tabla 2 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	—	—
04/09/2025	Plántula	2.1	1.5	6.5	3	2.8	4.7	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	9.5	7.0	14.5	7	7.1	11.0	—
22/09/2025	Roseta	18.5	13.5	16.5	11	9.5	16.8	—
30/10/2025	Cosecha	30.5	20.5	17.5	13	11.8	20.6	93.8

Tabla 3 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.2	1.6	7.0	4	2.9	4.8	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	10.0	7.5	15.0	7	7.4	11.5	—
22/09/2025	Roseta	19.0	14.0	17.0	11	9.8	17.3	—
30/10/2025	Cosecha	31.0	21.0	18.0	13	12.1	21.1	94.8

Tabla 4 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.3	1.7	7.3	4	3.0	4.9	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	10.5	8.0	15.5	8	7.6	12.0	—
22/09/2025	Roseta	19.5	14.5	17.5	12	10.0	17.8	—
30/10/2025	Cosecha	31.5	21.5	18.5	14	12.3	21.6	95.8

Tabla 5 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.4	1.8	7.4	4	3.1	5.0	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	10.8	8.3	15.8	8	7.7	12.3	—
22/09/2025	Roseta	19.8	14.8	17.8	12	10.1	31.8	—
30/10/2025	Cosecha	31.8	21.8	18.8	14	12.4	21.9	96.8

Tabla 6 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	2.5 _x	—
04/09/2025	Plántula	2.5	1.8	7.5	4	3.2	5.1	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.0	8.5	16.0	8	7.8	12.5	—
22/09/2025	Roseta	20.0	15.0	18.0	12	10.2	18.3	—
30/10/2025	Cosecha	32.0	22.0	19.0	14	12.5	22.1	97.8

Tabla 7 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	Nº Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	2.6	1.9	7.6	4	3.3	5.2	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.2	8.7	16.2	8	7.9	12.7	-
22/09/2025	Roseta	20.2	15.2	18.2	12	10.3	18.5	-
30/10/2025	Cosecha	32.2	22.2	19.2	14	12.6	22.3	98.8

Tabla 8 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	Nº Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	2.7	2.0	7.8	5	3.4	5.3	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.5	9.0	16.5	9	8.1	13.0	-
22/09/2025	Roseta	20.5	15.5	18.5	13	10.5	18.8	-
30/10/2025	Cosecha	32.5	22.5	19.5	15	12.8	22.6	99.8

Tabla 7 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	2.6	1.9	7.6	4	3.3	5.2	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.2	8.7	16.2	8	7.9	12.7	-
22/09/2025	Roseta	20.2	15.2	18.2	12	10.3	18.5	-
30/10/2025	Cosecha	32.2	22.2	19.2	14	12.6	22.3	98.8

Tabla 8 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	2.7	2.0	7.8	5	3.4	5.3	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.5	9.0	16.5	9	8.1	13.0	-
22/09/2025	Roseta	20.5	15.5	18.5	13	10.5	18.8	-
30/10/2025	Cosecha	32.5	22.5	19.5	15	12.8	22.6	99.8

Tabla 11

Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.3	0.1	0.01	2	0.6	—	—
04/09/2025	Plántula	3.0	2.3	9.0	6	3.7	5.6	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.0	10.5	18.0	10	9.3	14.5	—
22/09/2025	Roseta	22.0	17.0	20.0	15	11.7	20.3	—
30/10/2025	Cosecha	34.0	24.0	21.0	17	14.0	24.1	102.8

Tabla 12

Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.6 _x	—	—
04/09/2025	Plántula	2.4	1.7	7.4	4	3.1	5.0	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	10.8	8.3	15.8	8	7.7	12.3	—
22/09/2025	Roseta	19.8	14.8	17.8	15	10.1	18.1	—
30/10/2025	Cosecha	31.8	21.8	18.8	17	12.4	21.9	96.8

Tabla 13

Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.5	1.8	7.5	4	3.2	5.1	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.0	8.5	16.0	8	7.8	12.5	—
22/09/2025	Roseta	20.0	15.0	18.0	12	10.2	18.3	—
30/10/2025	Cosecha	32.0	22.0	19.0	14	12.5	22.1	97.8

Tabla 14

Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	—	—
04/09/2025	Plántula	2.6	1.9	7.6	4	3.3	5.2	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.2	8.7	16.2	8	7.9	12.7	—
22/09/2025	Roseta	20.2	15.2	18.2	12	10.3	18.5	—
30/10/2025	Cosecha	32.2	22.2	19.2	14	12.6	22.3	98.8

Tabla 15 Registro semanal - Tratamiento A: Grupo A (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área follar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.7	2.0	7.7	5	3.4	5.3	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.5	9.0	16.5	9	8.0	13.0	—
22/09/2025	Roseta	20.5	15.5	18.5	13	10.4	18.8	—
30/10/2025	Cosecha	32.5	22.5	19.5	15	12.7	22.6	99.8

Tabla 1 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	-	-
04/09/2025	Plántula	3.3	1.9	10.6	4	4.3	6.4	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	14.2	9.5	27.8	9	9.5	16.2	-
22/09/2025	Roseta	26.5	17.8	33.2	14	13.2	23.8	-
30/10/2025	Cosecha	39.3	23.6	40.7	17	16.8	29.5	107.4

Tabla 2 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	-	-
04/09/2025	Plántula	3.4	2.0	11.1	4	4.4	6.5	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	14.7	10.0	28.3	10	9.8	16.7	-
22/09/2025	Roseta	27.0	18.3	33.7	15	13.5	24.3	-
30/10/2025	Cosecha	39.8	24.1	41.2	18	17.1	30.0	108.4

Tabla 3 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.5	2.1	11.6	5	4.5	6.6	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	15.2	10.5	28.8	10	10.1	17.2	—
22/09/2025	Roseta	27.5	18.8	34.2	15	13.8	24.8	—
30/10/2025	Cosecha	40.3	24.6	41.7	18	17.4	30.5	109.4

Tabla 4 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.6	2.2	11.9	5	4.6	6.7	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	15.7	11.0	29.3	11	10.3	17.7	—
22/09/2025	Roseta	28.0	19.3	34.7	16	14.0	25.3	—
30/10/2025	Cosecha	40.8	25.1	42.2	19	17.6	31.0	110.4

Tabla 5 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.7	2.3	12.0	5	4.7	6.8	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.0	11.3	29.6	11	10.4	18.0	—
22/09/2025	Roseta	28.3	19.6	35.0	16	14.1	25.6	—
30/10/2025	Cosecha	41.1	25.4	42.5	19	17.7	31.3	111.4

Tabla 6 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.8	2.3	12.1	5	4.8	6.9	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.2	11.5	29.6	11	10.5	18.2	—
22/09/2025	Roseta	28.5	19.8	35.2	16	14.2	25.8	—
30/10/2025	Cosecha	41.3	25.6	42.7	19	17.8	31.5	112.4

Tabla 7 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.9	2.4	12.2	5	4.9	7.0	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.4	11.7	30.0	11	10.6	18.4	—
22/09/2025	Roseta	28.7	20.0	35.4	16	14.3	26.0	—
30/10/2025	Cosecha	41.5	25.8	42.9	19	17.9	31.7	113.4

Tabla 8 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	4.0	2.5	12.4	6	5.0	7.1	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.7	12.0	30.3	12	10.8	18.7	—
22/09/2025	Roseta	29.0	20.3	35.7	17	14.5	26.3	—
30/10/2025	Cosecha	41.8	26.1	43.2	20	18.1	32.0	114.4

Tabla 9 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	4.1	2.6	12.6	6	5.1	7.2	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	17.2	12.5	30.8	12	11.0	19.2	—
22/09/2025	Roseta	29.5	20.8	36.2	17	14.7	26.8	—
30/10/2025	Cosecha	42.3	26.6	43.7	20	18.3	32.5	115.4

Tabla 10 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.3	0.1	0.01	2	0.6	—	—
04/09/2025	Plántula	4.2	2.7	13.1	6	5.2	7.3	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	17.7	13.0	31.3	12	11.5	19.7	—
22/09/2025	Roseta	30.0	21.3	36.7	18	15.2	27.3	—
30/10/2025	Cosecha	42.8	27.1	44.2	21	18.8	33.0	116.4

Tabla 11 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.3	0.1	0.01	2	0.6	-	-
04/09/2025	Plántula	4.3	2.8	13.6	7	5.3	7.4	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	18.2	13.5	33.8	13	12.0	20.2	-
22/09/2025	Roseta	30.5	21.8	37.2	19	15.7	27.8	-
30/10/2025	Cosecha	43.3	27.6	44.7	22	19.3	33.5	117.4

Tabla 12 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	-	-
04/09/2025	Plántula	3.7	2.2	12.0	5	4.7	6.8	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.0	11.3	29.6	11	10.4	18.0	-
22/09/2025	Roseta	28.3	19.6	35.0	16	14.1	25.6	-
30/10/2025	Cosecha	41.1	25.4	42.5	19	17.7	31.3	111.4

Tabla 13 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.8	2.3	12.1	5	4.8	6.9	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.2	11.5	29.8	11	10.5	18.2	—
22/09/2025	Roseta	28.5	19.8	35.2	16	14.2	25.8	—
30/10/2025	Cosecha	41.3	25.6	42.7	19	17.8	31.5	112.4

Tabla 14 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	—	—
04/09/2025	Plántula	3.9	2.4	12.2	5	4.4	7.0	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.4	11.7	30.0	11	10.6	18.4	—
22/09/2025	Roseta	28.7	20.0	35.4	16	14.3	26.0	—
30/10/2025	Cosecha	41.5	25.8	42.9	19	17.9	31.7	113.4

Tabla 15 Registro semanal - Tratamiento B: Led Rojo (660 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	4.0	2.5	12.3	6	5.0	7.1	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	16.7	12.0	30.3	12	10.7	18.7	—
22/09/2025	Roseta	29.0	20.3	35.7	17	14.4	26.3	—
30/10/2025	Cosecha	41.8	26.1	43.2	20	18.0	32.0	114.4

Tabla 1

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	-	-
04/09/2025	Plántula	2.3	1.7	7.4	4	3.0	5.3	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	11.5	9.3	22.3	9	5.8	13.7	-
22/09/2025	Roseta	20.8	16.2	24.5	13	8.5	18.8	-
30/10/2025	Cosecha	33.2	22.3	36.9	15	10.8	24.3	122.1

Tabla 2

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	-	-
04/09/2025	Plántula	2.4	1.8	7.9	4	3.1	5.4	-
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	12.0	9.8	22.8	9	6.1	14.2	-
22/09/2025	Roseta	21.3	16.7	25.0	14	8.8	19.3	-
30/10/2025	Cosecha	33.7	22.8	37.4	16	11.1	24.8	123.1

Tabla 3

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	— ✓	— ✗
04/09/2025	Plántula	2.5	1.9	8.4	5	3.2	5.5	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	12.5	10.3	23.3	10	6.4	14.7	—
22/09/2025	Roseta	21.8	17.2	25.5	14	9.1	19.8	—
30/10/2025	Cosecha	34.2	23.3	37.9	16	11.4	25.3	124.1

Tabla 4

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.6	2.0	8.6	5	3.3	5.6	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.0	10.6	23.8	10	6.6	15.0	—
22/09/2025	Roseta	22.3	17.7	26.0	15	9.3	20.3	—
30/10/2025	Cosecha	34.7	23.8	38.4	17	11.6	25.8	125.1

Tabla 5

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.7	2.1	8.8	5	3.4	5.7	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.3	10.7	24.1	10	6.7	15.1	—
22/09/2025	Roseta	22.6	18.0	26.3	15	9.4	20.6	—
30/10/2025	Cosecha	35.0	24.1	38.7	17	11.7	26.1	126.1

Tabla 6

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.8	2.1	8.9	5	3.5	5.8	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.5	10.8	24.3	10	6.8	15.2	—
22/09/2025	Roseta	22.8	18.2	26.5	15	9.5	20.8	—
30/10/2025	Cosecha	35.2	24.3	38.9	17	11.8	26.3	127.1

Tabla 7

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.9	2.2	9.0	5	3.5	5.9	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.7	10.9	24.5	10	6.9	15.3	—
22/09/2025	Roseta	23.0	18.4	26.7	15	9.6	21.0	—
30/10/2025	Cosecha	35.4	24.5	17	17	11.9	26.5	128.1

Tabla 8

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.0	2.3	9.2	6	3.7	6.0	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	14.0	11.1	24.8	11	7.1	15.5	—
22/09/2025	Roseta	23.3	18.7	27.0	16	9.8	21.3	—
30/10/2025	Cosecha	35.7	24.8	39.4	18	12.1	26.8	129.1

Tabla 9

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.1	2.4	9.4	6	3.8	6.1	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	14.5	11.3	25.3	11	7.3	15.7	—
22/09/2025	Roseta	23.8	19.2	27.5	16	10.0	21.8	—
30/10/2025	Cosecha	36.2	25.3	39.9	18	12.3	27.3	130.1

Tabla 10

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.3	0.1	0.01	2	0.6	—	—
04/09/2025	Plántula	3.2	2.5	9.9	6	3.9	6.2	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	15.0	11.8	25.8	11	7.8	16.2	—
22/09/2025	Roseta	24.3	19.7	28.0	17	10.5	22.3	—
30/10/2025	Cosecha	36.7	25.8	40.4	19	12.8	27.8	131.1

Tabla 11

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.3	0.1	0.01	2	0.6	—	—
04/09/2025	Plántula	3.3	2.6	10.4	7	4.0	6.3	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	15.5	12.3	26.3	12	8.3	16.7	—
22/09/2025	Roseta	24.8	20.2	28.5	18	11.0	22.8	—
30/10/2025	Cosecha	37.2	26.3	40.9	20	13.3	28.3	132.1

Tabla 12

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.7	2.0	8.8	5	3.4	5.7	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.3	10.7	24.1	10	6.7	15.3	—
22/09/2025	Roseta	22.6	18.0	26.3	14	9.4	20.6	—
30/10/2025	Cosecha	35.0	24.1	38.7	16	11.7	26.1	126.1

Tabla 13

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	2.8	2.1	8.9	5	3.5	5.8	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.5	10.8	24.3	10	6.8	15.2	—
22/09/2025	Roseta	22.8	18.2	26.5	15	9.5	20.8	—
30/10/2025	Cosecha	35.2	24.3	38.9	17	11.8	26.3	127.1

Tabla 14

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm ²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.1	0.1	0.01	2	0.4	—	—
04/09/2025	Plántula	2.9	2.2	9.0	5	3.6	5.9	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	13.7	10.9	24.5	10	6.9	15.3	—
22/09/2025	Roseta	23.0	18.4	26.7	15	9.6	21.0	—
30/10/2025	Cosecha	35.4	24.5	39.1	17	11.9	26.5	128.1

Tabla 15

Registro semanal - Tratamiento C: Led Azul (450 nm)

Fecha	Fase Fenológica	Largo hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	Área foliar Prom. (cm²)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/09/2025	Germinación	0.2	0.1	0.01	2	0.5	—	—
04/09/2025	Plántula	3.0	2.3	9.1	6	3.7	6.0	—
15/09/2025	Crecimiento vegetativo	14.0	11.0	24.8	11	7.8	15.4	—
22/09/2025	Roseta	23.3	18.7	27.0	16	9.7	21.3	—
30/10/2025	Cosecha	35.7	24.8	39.4	18	12.0	26.8	129.1

01. REGISTRO SEMANAL DIGITALIZADO

Cada fila corresponde a una medición realizada en campo. Estos registros son la base directa de las Tablas 7, 8 y 9 del Capítulo III.

Lectura sencilla: identifique primero el tratamiento y la réplica; luego siga la evolución por fecha. Las filas amarillas corresponden a luz natural, las naranjas a LED rojo y las azules a LED azul.

Tratamiento real	Código	Fecha	Fase fenológica	Largo hoja (cm)	Ancho hoja (cm)	Área foliar (cm²)	N.º hojas	Altura (cm)	Diámetro roseta (cm)	Peso fresco (g)
Luz Natural	LN	9/1/2025	Germinación	0.20	0.10	0.01	2	0.50		
Luz Natural	LN	9/4/2025	Plántula	2.50	1.80	7.50	4	3.20	5.10	
Luz Natural	LN	9/15/2025	Crecimiento vegetativo	11.00	8.50	16.00	8	7.80	12.50	
Luz Natural	LN	9/22/2025	Roseta	20.00	15.00	18.00	12	10.20	18.30	
Luz Natural	LN	10/30/2025	Cosecha	32.00	22.00	19.00	14	12.50	22.10	97.80
LED Azul	LA	9/1/2025	Germinación	0.20	0.10	0.01	2	0.50		
LED Azul	LA	9/4/2025	Plántula	3.80	2.30	12.10	5	4.80	6.90	
LED Azul	LA	9/15/2025	Crecimiento vegetativo	16.20	11.50	29.80	11	10.50	18.20	
LED Azul	LA	9/22/2025	Roseta	28.50	19.80	35.20	16	14.20	25.80	
LED Azul	LA	10/30/2025	Cosecha	41.30	25.60	42.70	19	17.80	31.50	112.40
LED Rojo	LR	9/1/2025	Germinación	0.20	0.10	0.01	2	0.50		
LED Rojo	LR	9/4/2025	Plántula	2.80	2.10	8.90	5	3.50	5.80	
LED Rojo	LR	9/15/2025	Crecimiento vegetativo	13.50	10.80	24.30	10	6.80	15.20	
LED Rojo	LR	9/22/2025	Roseta	22.80	18.20	26.50	15	9.50	20.80	
LED Rojo	LR	10/30/2025	Cosecha	35.20	24.30	38.90	17	11.80	26.30	127.10

LED Azul	LA
LED Azul	LA
LED Azul	LA
LED Azul	LA
LED Azul	LA

LED Rojo	LR
LED Rojo	LR
LED Rojo	LR
LED Rojo	LR
LED Rojo	LR

02. DATOS FINALES DE LAS 15 PLANTAS POR TRATAMIENTO

Esta hoja contiene las 45 observaciones finales utilizadas para calcular promedios reales. No se debe confundir una réplica individual con el promedio de todo el tratamiento.

Réplica	Tratamiento	Altura final (cm)	Tasa de crecimiento (cm/día)	N.º hojas final	Peso fresco (g/planta)
1	LED Rojo	42.50	1.19	16	122.1
2	LED Rojo	43.50	1.24	17	123.1
3	LED Rojo	44.50	1.29	18	124.1
4	LED Rojo	45.50	1.31	18	125.1
5	LED Rojo	46.50	1.33	19	126.1
6	LED Rojo	47.50	1.34	19	127.1
7	LED Rojo	47.50	1.35	19	128.1
8	LED Rojo	49.50	1.37	20	129.1
9	LED Rojo	50.50	1.39	20	130.1
10	LED Rojo	51.50	1.44	21	131.1
11	LED Rojo	52.50	1.49	22	132.1
12	LED Rojo	46.50	1.33	18	126.1
13	LED Rojo	47.50	1.34	19	127.1
14	LED Rojo	48.50	1.35	19	128.1
15	LED Rojo	49.50	1.36	20	129.1

RESUMEN

Tratamiento	N.º plantas	Altura media	Hojas medias	Peso medio
Luz Natural	15	33.33	14.00	97.93
LED Rojo	15	47.57	19.00	127.23
LED Azul	15	31.57	17.00	112.53

03. CÁLCULOS — CÓMO SE OBTIENE CADA RESULTADO

Las celdas de resultados contienen fórmulas. Así, cualquier corrección en los datos de campo se refleja automáticamente en las tablas y gráficas.

A. FÓRMULAS BÁSICAS EXPLICADAS

Indicador	Explicación sencilla	Fórmula matemática	Ejemplo en Excel
Promedio	Suma todos los valores y divide entre el número de plantas.	$\Sigma \text{ valores} / n$	=SUM(rango)/COUNT(rango)
Tasa de crecimiento	Divide el aumento de altura entre los días transcurridos.	$(\text{Altura final} - \text{inicial}) / \text{días}$	=(Altura_final-Altura_inicial)/Días
Producción por ciclo	Multiplica plantas por el peso promedio y convierte gramos a kilogramos.	$\text{Plantas} \times \text{peso} / 1000$	=Plantas*Peso/1000
Producción anual	Multiplica la producción por ciclo por el número de ciclos anuales.	$\text{Producción/ciclo} \times \text{ciclos}$	=Producción_ciclo*Ciclos

B. PROMEDIO REAL DE LAS 15 PLANTAS

Tratamiento	N.º plantas	Altura media (cm)	Tasa media (cm/día)	Hojas medias	Peso medio (g)
Luz Natural	15	33.333	1.111	14.000	97.933
LED Rojo	15	47.567	1.341	19.000	127.233
LED Azul	15	31.567	0.991	17.000	112.533

D. PRODUCTIVIDAD POR TUBERÍA

Parámetro productivo	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Plantas/tubería	25.00	25.00	25.00
Peso promedio/planta (g)	97.80	127.10	112.40
Producción/tubería/ciclo (kg)	2.45	3.18	2.81
Ciclos por año	11.00	11.00	11.00
Producción anual/tubería (kg)	26.90	34.95	30.91

C. COMPARACIÓN: RÉPLICA 6 VS. PROMEDIO REAL

Tratamiento	Altura	Altura promedio	Peso	Peso promedio
Luz Natural	33.300	33.333	97.800	97.933
LED Rojo	47.500	47.567	127.100	127.233
LED Azul	31.500	31.567	112.400	112.533

E. TASAS REPORTADAS EN EL TEXTO

Etap	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Germinación	0.25	0.40	0.28
Plántula	0.95	1.25	0.90
Crecimiento vegetativo	1.29	1.71	1.24
Maduración	1.50	2.00	1.55

04. TABLAS DEL CAPÍTULO III — RECONSTRUIDAS Y CORREGIDAS

Las tablas siguientes están enlazadas a los datos digitalizados. Los rótulos LED rojo y LED azul se presentan de acuerdo con el origen real de los registros escaneados.

TABLA 7. LUZ NATURAL (CONTROL) — RÉPLICA 13

Fecha	Fase fenológica	Largo hoja	Ancho hoja	Área foliar	N.º hojas	Altura	Diámetro roseta	Peso fresco
9/1/2025	Germinación	0.20	0.10	0.01	2.00	0.50	0.00	0.00
9/4/2025	Plántula	2.50	1.80	7.50	4.00	3.20	5.10	0.00
9/15/2025	Crecimiento vegetativo	11.00	8.50	16.00	8.00	7.80	12.50	0.00
9/22/2025	Roseta	20.00	15.00	18.00	12.00	10.20	18.30	0.00
10/30/2025	Cosecha	32.00	22.00	19.00	14.00	12.50	22.10	97.80

TABLA 8. LED ROJO (660 nm) — RÉPLICA 6

Fecha	Fase fenológica	Largo hoja	Ancho hoja	Área foliar	N.º hojas	Altura	Diámetro roseta	Peso fresco
9/1/2025	Germinación	0.20	0.10	0.01	2.00	0.50	0.00	0.00
9/4/2025	Plántula	3.80	2.30	12.10	5.00	4.80	6.90	0.00
9/15/2025	Crecimiento vegetativo	16.20	11.50	29.80	11.00	10.50	18.20	0.00
9/22/2025	Roseta	28.50	19.80	35.20	16.00	14.20	25.80	0.00
10/30/2025	Cosecha	41.30	25.60	42.70	19.00	17.80	31.50	112.40

TABLA 9. LED AZUL (450 nm) — RÉPLICA 6

Fecha	Fase fenológica	Largo hoja	Ancho hoja	Área foliar	N.º hojas	Altura	Diámetro roseta	Peso fresco
9/1/2025	Germinación	0.20	0.10	0.01	2.00	0.50	0.00	0.00
9/4/2025	Plántula	2.80	2.10	8.90	5.00	3.50	5.80	0.00
9/15/2025	Crecimiento vegetativo	13.50	10.80	24.30	10.00	6.80	15.20	0.00
9/22/2025	Roseta	22.80	18.20	26.50	15.00	9.50	20.80	0.00
10/30/2025	Cosecha	35.20	24.30	38.90	17.00	11.80	26.30	127.10

TABLA 10A. VALORES USADOS EN EL CAPÍTULO (RÉPLICA 6)

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	33.30	47.50	31.50
Tasa crecimiento (cm/día)	1.11	1.34	0.99
N.º hojas final	14.00	19.00	17.00
Peso fresco (g/planta)	97.80	127.10	112.40

TABLA 10B. PROMEDIO RECOMENDADO DE 15 PLANTAS

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Altura final (cm)	33.333	47.567	31.567
Tasa crecimiento (cm/día)	1.111	1.341	0.991
N.º hojas final	14.000	19.000	17.000
Peso fresco (g/planta)	97.933	127.233	112.533

TABLA 11. PRODUCTIVIDAD POR TUBERÍA

Parámetro	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Plantas/tubería	25.00	25.00	25.00
Peso promedio/planta (g)	97.80	127.10	112.40
Producción/tubería/ciclo (kg)	2.45	3.18	2.81
Ciclos por año	11.00	11.00	11.00
Producción anual/tubería (kg)	26.90	34.95	30.91

05. GRÁFICAS — RESULTADOS VISUALES Y SU INTERPRETACIÓN

Cada gráfica está vinculada a una tabla de datos visible. Esto permite verificar de dónde sale cada barra o línea.

FIGURA 45. ALTURA POR FASE FENOLÓGICA

Fase	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Germinación	0.50	0.50	0.50
Plántula	3.20	4.80	3.50
Crecimiento vegetativo	7.80	10.50	6.80
Roseta	10.20	14.20	9.50
Cosecha	12.50	17.80	11.80

Lectura: el LED rojo presenta las mayores alturas en todas las etapas. La luz azul produce plantas más compactas que el LED rojo y, en varios momentos, similares al control.



FIGURA 47. DIÁMETRO DE ROSETA

Fase	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Plántula	5.10	6.90	5.80
Crecimiento vegetativo	12.50	18.20	15.20
Roseta	18.30	25.80	20.80
Cosecha	22.10	31.50	26.30

Lectura: el diámetro aumenta progresivamente. El mayor valor final corresponde al LED rojo, seguido del LED azul y luego la luz natural.

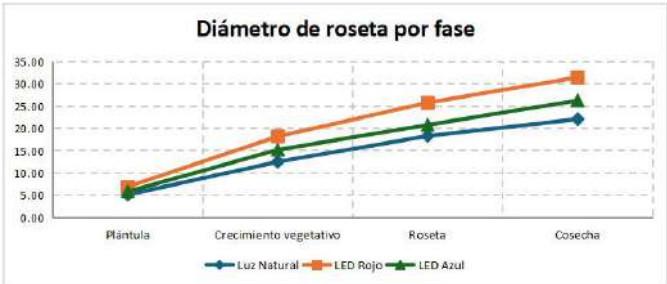


FIGURA 46. PESO FRESCO EN COSECHA

Indicador	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Peso fresco (g/planta)	97.8	127.1	112.4

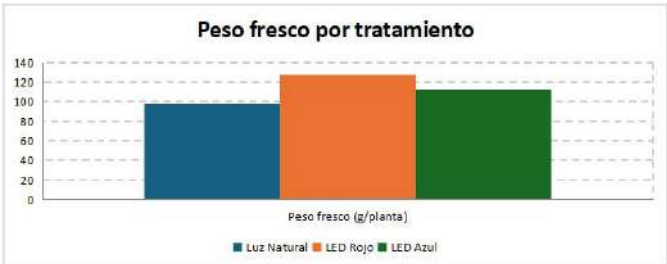


FIGURA 50. PRODUCCIÓN ANUAL POR TUBERÍA

Indicador	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Producción anual (kg/tubería)	26.895	34.9525	30.91

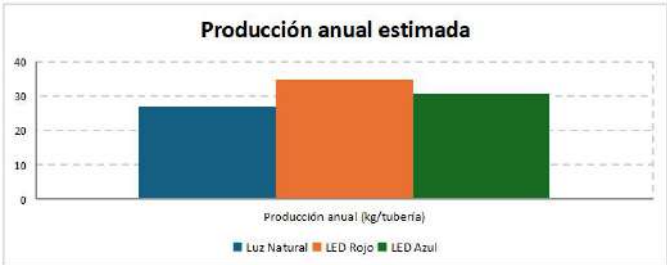
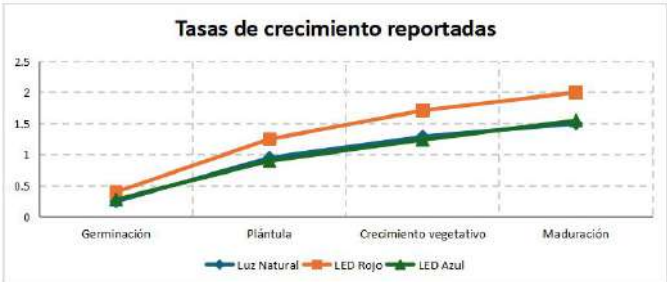


FIGURA 48. TASAS DE CRECIMIENTO REPORTADAS

Etapas	Luz Natural	LED Rojo	LED Azul
Germinación	0.25	0.4	0.28
Plántula	0.95	1.25	0.9
Crecimiento vegetativo	1.29	1.71	1.24
Maduración	1.5	2	1.55



**UNSCH**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. ARTURO BAUTISTA ORELLANA
R.D. N° 309-2026-UNSCH-FCA-D

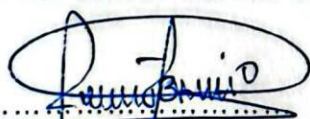
En la ciudad de Ayacucho, a los veintiún días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las dieciséis horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Dr. Rolando Bautista Gómez, M.Sc. Federico Quicaño Suárez como asesor, Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquén y el Ing. John Samuel Cazorla Orihuela; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Evaluación del impacto de la iluminación LED en el rendimiento y desarrollo de cultivos de lechuga en invernadero en Huanta, Ayacucho - 2025**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **ARTURO BAUTISTA ORELLANA**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

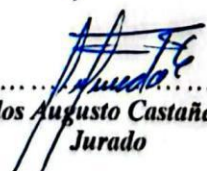
Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Dr. Rolando Bautista Gómez	14	13	14	14
M.Sc. Federico Quicaño Suárez	15	14	15	15
Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquén	13	12	13	13
Ing. John Samuel Cazorla Orihuela	14	15	16	15
PROMEDIO GENERAL				14

Observaciones: Por acuerdo unánime de los miembros del jurado, el título del trabajo de investigación debe ser: **Influencia de la iluminación LED en el desarrollo y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de invernadero, Huanta, Ayacucho - 2025**

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


.....
Dr. Rolando Bautista Gómez
Presidente


.....
M.Sc. Federico Quicaño Suárez
Asesor


.....
Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquén
Jurado


.....
Ing. John Samuel Cazorla Orihuela
Jurado


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de TESIS de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo titulado:

Influencia de la iluminación LED en el desarrollo y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de invernadero, Huanta, Ayacucho – 2025

Autor : Arturo Bautista Orellana
Asesor : Federico Quicafío Suarez

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobado mediante RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de ~~slote~~ (7%) de Índice de similitud, con exclusión de citas y bibliografía, y de coincidencias menores de 30 palabras.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 3010768824

Ayacucho, 10 de Agosto de 2026

Atentamente,



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Prof. Dr. Eleazar Chuchón Angulo
DNI 42682714

Influencia de la iluminación LED en el desarrollo y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de invernadero, Huanta, Ayacucho – 2025

por Arturo BAUTISTA ORELLANA

Influencia de la iluminación LED en el desarrollo y rendimiento de la lechuga (Lactuca sativa L.) bajo condiciones de invernadero, Huanta, Ayacucho – 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

7 %	7 %	1 %	1 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe	1 %
	Fuente de Internet	
2	repositorio.utp.edu.co	<1 %
	Fuente de Internet	
3	repositorio.utc.edu.ec	<1 %
	Fuente de Internet	
4	www.horti-growlight.com	<1 %
	Fuente de Internet	
5	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	<1 %
	Trabajo del estudiante	
6	repositorio.uta.edu.ec	<1 %
	Fuente de Internet	
7	actitudecologica.com	<1 %
	Fuente de Internet	
8	ojs.agro.umsa.bo	<1 %
	Fuente de Internet	
9	revistas.sena.edu.co	<1 %
	Fuente de Internet	
10	www.campustudionline.com	<1 %
	Fuente de Internet	
11	Submitted to Elmarmarel Escuelas, S.L.	<1 %
	Trabajo del estudiante	
12	repositorio.ual.es	<1 %
	Fuente de Internet	
13	alicia.concytec.gob.pe	<1 %
	Fuente de Internet	
14	repositorio.uncp.edu.pe	<1 %
	Fuente de Internet	
15	dspace.unitru.edu.pe	<1 %
	Fuente de Internet	

16	Submitted to Universidad Católica Boliviana "San Pablo"	<1 %
	Trabajo del estudiante	
17	www.dspace.uce.edu.ec	<1 %
	Fuente de Internet	
18	biblioteca.ucf.edu.cu	<1 %
	Fuente de Internet	
19	patents.google.com	<1 %
	Fuente de Internet	
20	repositorio.chapingo.edu.mx	<1 %
	Fuente de Internet	
21	repositorio.uchile.cl	<1 %
	Fuente de Internet	
22	dokumen.pub	<1 %
	Fuente de Internet	
23	idoc.pub	<1 %
	Fuente de Internet	
24	Ciencia y Tecnología. "IX Jornadas de Ciencia y Tecnología – III Reunión Argentina-Chile 2024", Ciencias Agronómicas, 2024	<1 %
	Publicación	

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Evaluación del impacto de la iluminación LED en el rendimiento y desarrollo de cultivos de lechuga en invernadero en Huanta, Ayacucho - 2025

Evaluation of the impact of LED lighting on the performance and development of greenhouse lettuce crops in Huanta, Ayacucho – 2025

Arturo Bautista Orellana¹ arturo.bautista.21@unsch.edu.pe

Federico Quicaño Suarez² federico.quicano@unsch.edu.pe

Área de investigación: Ciencias Agrícolas

Línea de investigación: Agricultura, Silvicultura, Pesquería

RESUMEN

La investigación tuvo como propósito analizar el efecto de la iluminación LED roja (660 nm) y azul (450 nm) sobre el crecimiento y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Green Leaf, en comparación con la iluminación natural, en un invernadero ubicado en Huanta, Ayacucho. Se aplicó un enfoque experimental cuantitativo utilizando 150 plantas distribuidas en tres tratamientos (n=50): luz natural como control, iluminación LED azul e iluminación LED roja. Las condiciones de trabajo incluyeron una intensidad lumínica de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, una potencia de 48 W y un fotoperiodo nocturno de 12 horas.

Los resultados evidenciaron que la iluminación LED roja favoreció significativamente el desarrollo del cultivo, alcanzando una altura final de 47,5 cm y una velocidad de crecimiento de 1,34 cm/día, valores superiores al tratamiento control (33,3 cm y 1,11 cm/día) y al tratamiento con LED azul, el cual produjo plantas más compactas (31,5 cm y 0,99 cm/día). En relación con la productividad, el peso fresco final bajo iluminación roja fue de 127,1 g, mostrando un incremento significativo del 30% ($p < 0,01$) respecto al control, que obtuvo 97,8 g; mientras que el LED azul registró 112,4 g, equivalente a un aumento

del 15%. Asimismo, el espectro rojo incrementó el diámetro de la roseta (31,5 cm frente a 22,1 cm) y el número de hojas (19 frente a 14). A nivel del sistema de producción, la proyección anual por tubería con LED rojo alcanzó 34,98 kg, superando en 8,03 kg al sistema con luz natural.

Se concluye que la iluminación LED ejerce un efecto favorable en el cultivo de lechuga, destacándose el espectro rojo como la opción tecnológica más eficiente para incrementar la biomasa comercial y reducir el tiempo del ciclo vegetativo en los invernaderos de la región.

Palabras clave: iluminación LED; *Lactuca sativa*; invernadero; productividad; Huanta.

ABSTRACT

The aim of this research was to assess the effect of red (660 nm) and blue (450 nm) LED lighting on the growth and yield of Green Leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) compared to natural light conditions in a greenhouse located in Huanta, Ayacucho. A quantitative experimental design was implemented using 150 plants distributed into three treatments (n=50): natural light as control, blue LED lighting, and red LED lighting. The experimental conditions included a light intensity of 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a power of 48 W, and a 12-hour nocturnal photoperiod.

The findings revealed that red LED lighting significantly enhanced crop development, achieving a final plant height of 47.5 cm and a growth rate of 1.34 cm/day, outperforming

both the control treatment (33.3 cm and 1.11 cm/day) and the blue LED treatment, which generated more compact plants (31.5 cm and 0.99 cm/day). In terms of productivity, the final fresh weight under red LED lighting reached 127.1 g, representing a significant increase of 30% ($p < 0.01$) compared to the control group with 97.8 g, while blue LED lighting produced 112.4 g, corresponding to a 15% increase. Likewise, the red spectrum improved rosette diameter (31.5 cm versus 22.1 cm) and leaf number (19 versus 14). At the production system level, the estimated annual yield per pipe under red LED lighting reached 34.98 kg, exceeding natural light production by 8.03 kg.

It is concluded that LED lighting positively affects lettuce cultivation, with the red spectrum representing the most effective technological alternative to maximize commercial biomass and accelerate the vegetative cycle in greenhouse production systems in the region.

Keywords: LED lighting; *Lactuca sativa*; greenhouse; productivity; Huanta.

I. INTRODUCCIÓN

La luz constituye un factor esencial en la producción agrícola, debido a que participa de manera directa en procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis, la fotomorfogénesis y el control de la floración. A través de la energía lumínica, las plantas convierten el agua y el dióxido de carbono en glucosa y oxígeno, permitiendo así su crecimiento, desarrollo y permanencia (Rangel, 2015).

Además de su función energética, la luz influye en la regulación morfológica de las plantas mediante la fotomorfogénesis, interviniendo en procesos como la germinación, el alargamiento de tallos y la formación de hojas. En los sistemas de agricultura protegida, especialmente en invernaderos, la iluminación artificial cumple la función de complementar o

reemplazar la luz natural en zonas con limitada radiación solar o durante estaciones con menor disponibilidad lumínica. En este contexto, las lámparas tradicionales fluorescentes y de sodio de alta presión han sido gradualmente sustituidas por la tecnología de diodos emisores de luz (LED), reconocida por su mayor eficiencia (Flores, 2021).

La iluminación LED ha generado importantes avances en la agricultura moderna gracias a su bajo consumo energético y a la posibilidad de adaptar el espectro de luz según las necesidades fisiológicas de los cultivos en cada etapa de desarrollo. A diferencia de otros sistemas de iluminación, los LEDs producen escaso calor, reduciendo el estrés térmico en las plantas y disminuyendo la necesidad de mecanismos adicionales de enfriamiento, lo que favorece un uso más eficiente de los recursos (Gonzales & Ramírez, 2016). Diversos estudios han demostrado que esta tecnología favorece el crecimiento vegetativo y mejora la calidad nutricional de hortalizas de hoja, como la lechuga, incrementando compuestos beneficiosos para la salud.

Sin embargo, para lograr resultados óptimos en el uso de iluminación LED es necesario realizar una adecuada planificación técnica, considerando la selección del espectro lumínico más apropiado según la etapa fenológica del cultivo. Asimismo, esta tecnología debe complementarse con un manejo adecuado de variables ambientales, tales como temperatura, humedad y nutrición mineral, a fin de asegurar un desarrollo vegetal eficiente y saludable (Mulato, 2023).

En la región Ayacucho, el cultivo de lechuga está orientado principalmente al abastecimiento local y al autoconsumo, destacando iniciativas hidropónicas con producción relevante de variedades como crespa (60 %), seda (30 %) y morada (10 %). Actualmente, diversas iniciativas regionales promueven la implementación de microreservorios e invernaderos familiares

en provincias como Huanta, Huamanga y La Mar, con el propósito de fortalecer la seguridad alimentaria y enfrentar la limitada disponibilidad hídrica. Estas acciones impulsan el desarrollo de una agricultura sostenible y autosuficiente dentro de programas de agricultura familiar (Pérez, 2021).

II. METODOLOGÍA

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño experimental y tratamientos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y diseño experimental, con el propósito de evaluar la influencia de la iluminación LED sobre el crecimiento y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Green Leaf, bajo condiciones de invernadero en Huanta, Ayacucho. Se establecieron tres tratamientos de iluminación: luz natural como tratamiento control, LED azul con longitud de onda de 450 nm y LED rojo de 660 nm. El estudio utilizó 150 plantas, distribuidas equitativamente entre los tres tratamientos (50 plantas por tratamiento).

2.2 Manejo del cultivo

Las semillas fueron germinadas en bandejas utilizando un sustrato compuesto por turba y perlita en proporción 1:1. Posteriormente, las plántulas fueron trasplantadas al invernadero y distribuidas según los tratamientos, manteniendo condiciones uniformes de manejo agronómico. El riego y la fertirrigación se realizaron mediante un sistema automatizado, ajustando la frecuencia y duración según la fase fenológica del cultivo.

El tratamiento con iluminación artificial se estableció mediante lámparas LED, con un fotoperiodo nocturno de 12 horas. Las condiciones experimentales contemplaron una intensidad lumínica de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una potencia de 48 W.

Durante el experimento se monitorearon las condiciones ambientales del invernadero, principalmente temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica. La temperatura se mantuvo entre 18 y 24 °C y la humedad relativa entre 65 y 80 %, procurando condiciones homogéneas para el desarrollo del cultivo.

2.3 Evaluación de las variables

Para evaluar el crecimiento se seleccionaron aleatoriamente 15 plantas por tratamiento, constituyendo una muestra de 45 plantas para las mediciones periódicas. Las evaluaciones se realizaron durante el ciclo del cultivo, considerando los días 0, 7, 14, 21 y 30 después del trasplante. En la cosecha se evaluaron las 150 plantas para determinar la biomasa y productividad final.

Las variables evaluadas fueron altura de planta, número de hojas, diámetro de roseta, peso fresco y peso seco. La altura se midió desde la base del tallo hasta la hoja más apical; el peso fresco se determinó mediante una balanza digital de precisión y el peso seco mediante secado en estufa hasta alcanzar peso constante. También se realizaron registros fotográficos durante las diferentes fases fenológicas.

La tasa de crecimiento se determinó a partir de la variación de la altura y de los parámetros de biomasa registrados durante el periodo experimental. Asimismo, la productividad se estimó considerando el peso promedio de las plantas y la producción por tubería del sistema de cultivo.

2.4 Análisis de datos

Los datos fueron procesados mediante estadística descriptiva, calculándose la media, desviación estándar y coeficiente de variación para las variables evaluadas. El procesamiento y análisis se realizaron utilizando Jupyter, complementado con Microsoft Excel para la elaboración de tablas y gráficos comparativos.

Finalmente, se comparó el comportamiento de las plantas sometidas a iluminación LED azul y roja frente al tratamiento control con luz natural, considerando indicadores de crecimiento, biomasa y productividad para determinar el tratamiento con mayor respuesta productiva.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados evidenciaron diferencias en el crecimiento y rendimiento de Lactuca sativa según el tipo de iluminación aplicado. El tratamiento con LED rojo (660 nm) presentó la mayor respuesta durante el ciclo experimental, alcanzando una altura final de 47,5 cm y una tasa promedio de crecimiento de 1,34 cm/día, frente a 33,3 cm y 1,11 cm/día con luz natural y 31,5 cm y 0,99 cm/día con LED azul (450 nm). Durante las diferentes etapas fenológicas, el LED rojo mantuvo las mayores tasas de crecimiento, alcanzando 2,00 cm/día durante la etapa de maduración.

En cuanto a la productividad, el LED rojo produjo el mayor peso fresco por planta, con 127,1 g, seguido del LED azul con 112,4 g y la luz natural con 97,8 g. Esto representó incrementos de 30 % y 15 %, respectivamente, respecto al tratamiento control. Asimismo, el número de hojas aumentó de 14 en luz natural a 19 con LED rojo y 17 con LED azul. El diámetro de la roseta también fue superior bajo iluminación LED, alcanzando 31,5 cm con LED rojo, 26,3 cm con LED azul y 22,1 cm con luz natural.

La proyección productiva mostró que, considerando 25 plantas por tubería y 11 ciclos anuales, el tratamiento con LED rojo alcanzaría 34,98 kg/tubería/año, frente a

30,91 kg con LED azul y 26,95 kg con luz natural. Estos resultados muestran una ventaja productiva de la iluminación LED, particularmente del espectro rojo.

La tendencia del crecimiento fue respaldada mediante regresión lineal, observándose asociaciones positivas y fuertes entre los días después del trasplante y la altura de las plantas. El tratamiento LED rojo presentó la mayor pendiente, con 1,598 cm/día, además de un coeficiente de correlación de 0,991 y un R² de 0,982, evidenciando una tendencia de crecimiento consistente durante el periodo evaluado.

Tabla 6
Grupo de Tratamientos

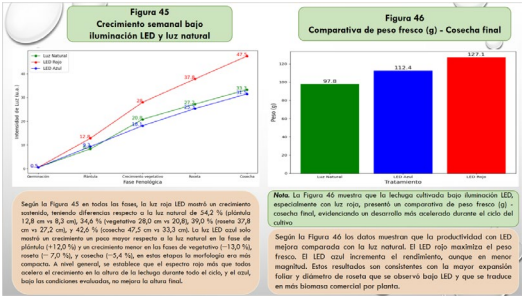
Grupo	Tratamiento	Intensidad LED	Potencia	Fotoperiodo	N° Plantas	Horario
B	Control (Luz Natural)	-	-	Natural	50	-
A	Luz Natural + LED Azul	200 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	48W	12 h/día	50	6:00 pm - 6:00 am
C	Luz Natural + LED Rojo	200 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	48W	12 h/día	50	6:00 pm - 6:00 am

Según la Tabla 6 se observa que con n = 150 plantas. Se aprecia que el diseño es capaz de comparar el efecto que el uso de diferentes luces espectrales puede tener sobre el crecimiento y rendimiento de las plantas bajo un fotoperiodo y con intensidad de luz actínica todo el tiempo.

Tabla 7
Registro semanal - Tratamiento B: Grupo B (Control)

Fecha	Fase Fenológica	Longitud hoja Prom. (cm)	Ancho hoja Prom. (cm)	N° Hojas Prom.	Altura Prom. (cm)	Diámetro roseta Prom. (cm)	Peso fresco Prom. (g)
01/08/2025	Germinación	0,2	0,1	0,01	2	0,5	-
04/08/2025	Plántula	2,5	1,8	7,5	4	3,2	5,1
15/08/2025	Vegetativo	11	8,5	16	8	7,8	12,5
22/08/2025	Roseta	20	15	18	12	10,2	18,3
30/10/2025	Cosecha	32	22	19	14	12,5	22,1

Según la Tabla 7 se ve que, bajo condiciones de luz natural, el crecimiento de las plantas desde la fase de germinación hasta la cosecha se acompañó de aumentos progresivos en la longitud y el ancho de las hojas, el área foliar, el número de hojas, el diámetro de la roseta, y el peso fresco obtenido al final del ciclo se registró. El patrón ilustra una dinámica de control vegetativo estable, que sirve como línea base para contrastar el efecto del aporte de la iluminación LED.



Los resultados se interpretan como evidencia de que el espectro rojo favoreció el crecimiento vegetativo y la acumulación de biomasa de la lechuga bajo las condiciones del estudio. La tesis relaciona esta respuesta con la influencia del espectro rojo sobre procesos fisiológicos asociados con la fotosíntesis y la expansión foliar. En contraste, el LED azul produjo plantas de menor altura que el control al finalizar el ciclo, aunque mantuvo un peso fresco superior al tratamiento con luz natural.

Estos resultados son concordantes con los antecedentes considerados en la investigación, particularmente con Mulato (2023) y Ángeles (2023), quienes reportaron efectos favorables de la iluminación LED sobre características morfológicas y productivas de la lechuga. Sin embargo, la

biomasa obtenida en el presente estudio fue menor que la reportada por Mulato en sistemas hidropónicos, lo que la tesis atribuye a posibles diferencias en las condiciones ambientales y en la variedad utilizada.

En conjunto, los resultados indican que, bajo las condiciones experimentales evaluadas en Huanta, la iluminación LED roja de 660 nm fue el tratamiento que presentó el mejor comportamiento agronómico, al favorecer simultáneamente el crecimiento en altura, número de hojas, diámetro de roseta, peso fresco y productividad proyectada del cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángeles, G. (2023). *Producción de lechuga con luz LED suplementaria en dos sistemas hidropónicos cerrados* [Tesis de Maestría en Ciencias]. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia.
- Casierra, F., Peña, J., & Ulrichs, C. (2011). *Crecimiento y eficiencia fotoquímica del fotosistema ii en plantas de fresa (fragaria sp.) afectadas por la calidad de la luz. implicaciones agronómicas.*
- Cedillo, E., Martínez, P., Casiano, H., Hernández, L., Padilla, M., & Rodríguez, A. (2021). *Manual de producción de lechuga bajo invernadero.*
- DOF. (1984). *Ley sobre el escudo, la bandera y el himno nacionales. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos.* Diario Oficial de la Federación.
- Duffetel, D. (2008). *Panorama de México a Puebla. Mapa de Balbuena.* (X. Artes de México, Ed.). Secretaría de Cultura-INAH.
- Ehow. (2021). *¿Qué tipo de luz hace que las plantas crezcan más: fluorescente o incandescente?* Ehow.com.
- Espinal, J. (2021). *Efecto de la iluminación LED en un sistema vertical de producción con lechuga (Lactuca sativa L.) bajo ambiente controlado.* Universidad Mayor de San Andrés.
- Flores, A. (2007). *Efecto de frecuencias de poda en dos variedades de acelga (Beta vulgaris var. Cicla L.) en ambiente protegido.* Universidad Mayor de San Andrés.
- Flores, S. (2021). *Iluminación LED para el crecimiento y desarrollo de plantas hortícolas.* Universidad Autónoma Chapingo.
- Gonzales, Y., & Ramírez, E. (2016). *Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF).* Ingeniería y Tecnologías (Inf. Téc.), 80(2), 111-120.
- Guillén, V. M., Pinzón, Y. P., Espinosa, W., Serrano, J. E., Rosales, H., Brandao, J. L., & González, G. (2017). *Efecto de las luces LED en la calidad nutricional, crecimiento y desarrollo de la lechuga en ambientes controlados.* CEPIA.
- Hernández, C., & Aguirre, H. (2024). *La luz y su efecto en las plantas.* Elementos, 1(136), 17-22. www.elementos.buap.mx
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2019). *Fábricas de plantas: Un sistema de agricultura vertical en interiores para una producción eficiente de alimentos de calidad* (2.ª ed.). Academic Press.
- InfoAgro. (s. f.). *La iluminación LED en agricultura. Ventajas e inconvenientes.*
- Jiménez, L. (2016). *Efecto de la intensidad lumínica de lámparas LED en la producción de lechuga (Lactuca sativa).* Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo.

- Luengo, F. (2023). *La iluminación artificial en la historia: un recorrido desde la prehistoria hasta la actualidad*. *ArqueoTimes*, 1, 42-45.
- Li, Q., & Kubota, C. (2009). *Efectos de la calidad de la luz suplementaria sobre el crecimiento y los fitoquímicos de la lechuga baby leaf*. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 59–64.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.011>
- Martínez, G., Lara, A., Padilla, L., Luna, M., Avelar, mária, & Llamas, J. (2015). *Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno*. *Terra Latinoamericana*, 33.
- Mulato, J. (2023). *Efecto de la iluminación LED en la producción hidropónica de lechuga (Lactuca sativa L.) bajo invernadero*. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Monteith, J. L., & Moss, C. J. (1977). *El clima y la eficiencia de la producción de cultivos en Gran Bretaña*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(980), 277–294.
<https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., & Goudriaan, J. (1998). *Modelización de la producción de biomasa y el rendimiento de cultivos hortícolas: Una revisión*. *Scientia Horticulturae*, 74(1-2), 83–111.
[https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00083-1)
- Nájera, C. (2020). *Evaluación de algunos factores de calidad y cantidad de los espectros de radiación en las plantas*. Universidad de Almería.
- Osram, O. (2016). *Horticulture Lighting with LEDs*. Osram.
- Pérez, A. (2021). *Dosis de guano de islas y potasio en el rendimiento de lechuga (Lactuca sativa L.) var. Grandes Lagos*. Canaán, 2750 msnm – Ayacucho. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Agronomía.
- Ramos, Y., & Ramírez, E. (2016). *Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF)*. *Informador Técnico*, 80(2), 111-120.
- Rangel, J. (2015). *La iluminación artificial, historia, evolución y la tecnología LED*. facultad de Estudios Superiores Aragón.
- Roldán, G., & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de liminología neotropical*. Universidad de Antioquia.
- Resh, H. M. (2013). *Producción de alimentos hidropónicos: Guía definitiva para el horticultor avanzado y el productor comercial de hidroponía (7.ª ed.)*. CRC Press.
- Sanz, D. (2016). *Características de un LED*. Actitud Ecológica.
- Stanghellini, C., van 't Ooster, B., & Heuvelink, E. (2019). *Greenhouse horticulture. Technology for Optimal Crop Production* (Wageningen Academic Publishers, Ed.).
- Talón, M., & Azcón-Bieto, J. (2013). *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (S. L. McGraw-Hill Interamericana de España, Ed.; 2.ª ed.). Universitat de Barcelona.
- Torre, J. (2014). *Iluminacion con LEDs*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial.
- Zambrano, F., Villafañe, R., & Figueroa, R. (2003). *Efecto de la profundidad del nivel freático sobre la producción de tomate en un suelo franco arenoso y bajo condiciones de invernadero*. *Agronomía Tropical*, 53(4).
- Zolezzi, M., Abarca, P., Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., &

Sepúlveda, P. (2017). *Manual de producción de lechuga* (Boletín INIA N° 374).