



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE UNA INCUBADORA AUTOMATIZADA QUE  
POTENCIE EL CRECIMIENTO DE LACTUCA SATIVA (LECHUGA  
TIPO ICEBERG) MEDIANTE UN SISTEMA DE CONTROL DE  
ORIENTACIÓN E INTENSIDAD LUMÍNICA DE LÁMPARAS UV**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Sebastián David Martínez Murillo  
Raisa Judith Falconi Palacios  
DOCENTE: Christopher Rubén Reyes López

Guayaquil - Ecuador  
2025

20/02 - 2026

23/02/26

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Raisa Judith Falconi Palacios** con documento de identificación N° **0951971829** y **Sebastián David Martínez Murillo** con documento de identificación N° **0953657467**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

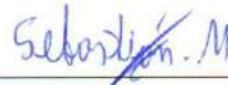
Guayaquil, 20 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

Raisa Judith Falconi Palacios  
0951971829



---

Sebastián David Martínez Murillo  
0953657467

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Raisa Judith Falconi Palacios** con documento de identificación N° **0951971829** y **Sebastián David Martínez Murillo** con documento de identificación N° **0953657467**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UNA INCUBADORA AUTOMATIZADA QUE POTENCIE EL CRECIMIENTO DE LACTUCA SATIVA (LECHUGA TIPO ICEBERG) MEDIANTE UN SISTEMA DE CONTROL DE ORIENTACIÓN E INTENSIDAD LUMÍNICA DE LÁMPARAS UV**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 20 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

Raisa Judith Falconi Palacios  
0951971829



---


Sebastián David Martínez Murillo  
0953657467

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Christopher Rubén Reyes López**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UNA INCUBADORA AUTOMATIZADA QUE POTENCIE EL CRECIMIENTO DE LACTUCA SATIVA (LECHUGA TIPO ICEBERG) MEDIANTE UN SISTEMA DE CONTROL DE ORIENTACIÓN E INTENSIDAD LUMÍNICA DE LÁMPARAS UV**, realizado por **Raisa Judith Falconi Palacios** con documento de identificación N° **0951971829** y por **Sebastián David Martínez Murillo** con documento de identificación N° **0953657467**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 20 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Christopher Rubén Reyes López, Mg.  
0923848691

## DEDICATORIA

En primer lugar, estoy agradecido con Dios por brindarme salud, la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para concluir este importante periodo de mi formación académica. Cada uno de los éxitos en mi vida se debe a que siempre está conmigo..

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi mamá, Ina Palacios Velasco, por su amor incondicional, su apoyo constante, amor y por ser el pilar fundamental en mi vida; siempre me impulsa a dar lo mejor de mí y no rendirme. Su esfuerzo y sacrificio han sido la base de cada uno de mis logros. A mi papá y mi abuelita, aunque ya no estén conmigo, han sido una fuerza muy importante para cada paso de mi vida, siempre apegado a los valores que me enseñaron. También a mis hermanos, que siempre me han acompañado en todas las etapas de mi vida, impulsándome a ser mejor persona y apoyándome en todo, siempre prestos a darme su ayuda. A mis cuñados, gracias por su apoyo, comprensión y palabras de aliento en los momentos más exigentes y estresantes de este proceso; su compañía y motivación fueron esenciales para poder seguir adelante.

Por último, expreso mi gratitud a todos aquellos que, de una forma u otra, con su apoyo y confianza, hicieron posible la finalización de este trabajo.

### **Raisa Judith Falconi Palacios**

Primero, dedico estas palabras a mi Padre, Jehová de los Ejércitos, quien me dio la vida y me sostuvo en cada paso de este camino de enseñanzas. Sin Él, nada de esto habría sido posible. Cada logro alcanzado es reflejo de su guía, su misericordia y su amor incondicional.

Dedico también este logro a todas aquellas personas que he conocido a través de este viaje del saber, a quienes considero verdaderos amigos: los que se acercan sin interés alguno, los que ayudan a levantarte sin mirar atrás, los que aconsejan para evitar errores ya vividos y los que brindan su confianza y hermandad sincera. Cada uno dejó una huella valiosa en este proceso.

De manera muy especial, dedico este logro a mi madre, Zoila Murillo Gómez, mi mayor fortaleza y el pilar fundamental de mi vida. Ella fue y seguirá siendo el mejor apoyo que pude haber tenido. En los momentos más difíciles de este largo camino académico, aun en medio de circunstancias adversas, nunca dejó de creer en mí. Su apoyo emocional, económico y, sobre todo, espiritual fue el impulso que me permitió continuar.

A todos los presentes, les dedico también estas palabras, como muestra de gratitud y del profundo significado que este momento representa en mi vida.

### **Sebastián David Martínez Murillo**

## AGRADECIMIENTO

Dedico este trabajo a Dios, por guiar mi camino y darme la fortaleza necesaria para superar cada desafío y no desfallecer en los momentos difíciles. A mi universidad, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, permitiéndome adquirir conocimientos, valores y experiencias que serán fundamentales para mi futuro.

A todos mis maestros, que contribuyeron de manera significativa a mi desarrollo académico, personal y profesional al compartir generosamente sus conocimientos, experiencia y orientación., en especial a mi tutor de tesis el Ing. Christopher Reyes, por siempre guiarnos en este proceso, su paciencia y su motivación a terminar este proyecto.

A todas las personas que forman parte de esta unidad educativa, por fomentar un ambiente de esfuerzo, disciplina y superación constante, motivándome a alcanzar mis metas. Este logro representa el resultado del esfuerzo conjunto, la perseverancia y el compromiso con la formación integral y el aprendizaje continuo.

**Raisa Judith Falconi Palacios**

En este apartado quiero agradecer a los docentes que me instruyeron a lo largo de toda la carrera, en especial a mi tutor, el Ing. Christopher Reyes, por haberme guiado en el desarrollo de mi trabajo de titulación. Gracias por su infinita paciencia en cada tutoría y por ese alto nivel de exigencia que me impulsó a dar siempre un paso más hacia la excelencia.

Asimismo, agradezco al Ing. David Cortez por ser un docente muy profesional y comprensivo ante cualquier duda, y por su labor al guiarnos a través de proyectos desafiantes que nos acercaron a la verdadera práctica profesional.

Finalmente, quisiera agradecer a los amigos que la vida universitaria me presentó, con quienes pude forjar valiosos lazos profesionales, en especial a Jose Cabrera, Jaime Daniel Rodriguez, Isaac Ponce.

**Sebastián David Martínez Murillo**

## RESUMEN

El proyecto actual se centró en crear y edificar una incubadora automatizada para cultivar *Lactuca sativa* en un entorno controlado. La meta primordial fue optimizar el crecimiento de las plantas a través de la automatización del monitoreo de factores ambientales, tales como la humedad del sustrato, la iluminación y las condiciones internas del microclima.

La estructura del prototipo fue elaborada con acero al carbono recubierto con un material anticorrosivo, lo que asegura resistencia mecánica, durabilidad en condiciones de humedad y protección para los elementos electrónicos. El diseño posibilita que se mantengan las condiciones internas estables, que los sistemas integrados estén protegidos y que las tareas de siembra, mantenimiento y cosecha sean más fáciles.

La iluminación está formado por tiras LED con espectro completo, cuya función es proporcionar la energía luminosa que el proceso fotosintético requiere. Estas luminarias se controlan de manera automática para normalizar los períodos de exposición a la luz, con el fin de asegurar condiciones propicias para el crecimiento de las plantas y evitar que haya carencias o excesos en la radiación.

El sistema de riego automatizado, a través de sensores, supervisa la humedad del sustrato y activa el suministro de agua cuando los niveles bajan por debajo del límite fijado. Este procedimiento garantiza una hidratación homogénea, disminuye la presión hídrica y mejora el aprovechamiento del recurso hídrico.

El sistema de control se fundamenta en la plataforma Arduino, que procesa las señales que llegan desde los sensores y lleva a cabo acciones sobre los actuadores del sistema, permitiendo mantener condiciones ambientales estables dentro de la cámara de cultivo.

**Palabras claves:** Incubadora Automatizada, Crecimiento controlado, Radiación UV, Control Ambiental, Riego Automático.

## ABSTRACT

The present project focused on the design and construction of an automated incubator for cultivating *Lactuca sativa* in a controlled environment. The primary objective was to optimize plant growth through automated monitoring of environmental factors such as substrate moisture, lighting, and internal microclimate conditions.

The prototype structure was built using carbon steel coated with an anticorrosive material, ensuring mechanical strength, durability under humid conditions, and protection of electronic components. The design enables stable internal conditions, safeguards integrated systems, and facilitates sowing, maintenance, and harvesting tasks.

The lighting system consists of full-spectrum LED strips that provide the luminous energy required for the photosynthetic process. These luminaires are automatically controlled to regulate light exposure periods, ensuring optimal growth conditions while preventing deficiencies or excess radiation.

The automated irrigation system uses sensors to monitor substrate moisture and activates water supply when levels fall below a predefined threshold. This procedure ensures uniform hydration, reduces water stress, and improves water-use efficiency.

The control system is based on the Arduino platform, which processes signals from sensors and executes actions through system actuators, allowing stable environmental conditions to be maintained within the cultivation chamber.

**Keywords:** Automated Incubator, Controlled Growth, UV Radiation, Environmental Control, Automatic Irrigation.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>Introducción</b>	1
<b>II.</b>	<b>Problema</b>	2
<b>III.</b>	<b>Justificación</b>	3
<b>IV.</b>	<b>Objetivos</b>	4
IV-A.	Objetivo general . . . . .	4
IV-B.	Objetivos específicos . . . . .	4
<b>V.</b>	<b>Marco Teórico</b>	5
V-A.	Importancia de la radiación UV: . . . . .	5
V-B.	Sistemas de cultivo controlado . . . . .	12
V-C.	Control de variables ambientales . . . . .	16
V-D.	Cultivo de lactuca sativa (lechuga tipo iceberg) . . . . .	21
<b>VI.</b>	<b>Marco Metodológico</b>	30
VI-A.	Sistema de control . . . . .	31
VI-A1.	Arduino UNO . . . . .	31
VI-A2.	DTH22 . . . . .	31
VI-A3.	ML8511 . . . . .	32
VI-A4.	Pantalla LCD . . . . .	35
VI-A5.	Módulo Lector de Tarjeta SD . . . . .	35
VI-B.	Sistema de riego . . . . .	36
VI-B1.	FC28 . . . . .	36
VI-B2.	Bomba de agua . . . . .	36
VI-B3.	Módulo 4 Relés . . . . .	37
VI-C.	Sistema eléctrico . . . . .	37
VI-C1.	LM2596 . . . . .	37
VI-C2.	Luces LED UV para cultivos . . . . .	38
VI-C3.	La fuente de alimentación de 3.3V . . . . .	38
VI-C4.	Protobard y Jumpers . . . . .	38
VI-C5.	Módulo 4 Relés . . . . .	39
VI-D.	Diseño mecánico . . . . .	39
VI-D1.	Análisis de cargas para la evaluación estructural la rejilla que sostiene la maceta . . . . .	41
VI-D2.	Análisis estructural de la base de soporte . . . . .	45
VI-E.	Automatización de las variables ambientales . . . . .	48
VI-E1.	Algoritmo de control del sistema . . . . .	48
VI-E2.	Condiciones de activación del riego . . . . .	49
VI-E3.	Control automático de iluminación UV . . . . .	49
VI-E4.	Gestión de alertas y estados del sistema . . . . .	50

VI-F.	Protocolo experimental . . . . .	51
VI-G.	Método tradicional de cultivo de lechuga. . . . .	52
VI-H.	Condiciones del cultivo experimental y variables evaluadas. . . . .	53
VI-I.	Cultivo tradicional vs incubadora automatizada. . . . .	54
VI-I1.	Periodo de monitoreo . . . . .	54
VI-I2.	Método de evaluación del desempeño . . . . .	55
VI-I3.	Indicadores de crecimiento vegetal . . . . .	55
VI-J.	Análisis de eficiencia del sistema. . . . .	55
VI-J1.	Análisis de variables del cultivo . . . . .	56
VI-J2.	Consumo energético del sistema . . . . .	56
VI-J3.	Uso eficiente del agua en el sistema . . . . .	57
<b>VII.</b>	<b>Resultados</b>	<b>58</b>
VII-A.	Diseño estructural de la incubadora . . . . .	58
VII-B.	Construcción del prototipo . . . . .	58
VII-C.	Construcción y montaje del sistema de cultivo y riego . . . . .	60
VII-D.	Pruebas del sistema automatizado de iluminación UV . . . . .	61
VII-E.	Pruebas de funcionamiento de las variables y activación de riego . . . . .	63
VII-F.	Evaluación del desempeño del crecimiento . . . . .	65
VII-F1.	Altura de la planta . . . . .	65
VII-F2.	Número de hojas . . . . .	70
VII-F3.	Coloración del follaje . . . . .	70
VII-F4.	Análisis comparativo del desempeño . . . . .	70
VII-G.	Justificación estructural de la iluminación fija y ausencia de orientación mecánica. . . . .	71
<b>VIII.</b>	<b>Cronograma</b>	<b>73</b>
<b>IX.</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>74</b>
	<b>Referencias</b>	<b>74</b>
<b>X.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>89</b>
<b>XI.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>91</b>
	<b>Anexo A: Planos</b>	<b>92</b>
	<b>Anexo B: Construcción del prototipo</b>	<b>98</b>
	<b>Anexo C: Algoritmo de cálculo del índice UV y clasificación según niveles de radiación.</b>	<b>103</b>
	<b>Anexo D: Programación del funcionamiento de la incubadora.</b>	<b>105</b>

## I. INTRODUCCIÓN

El progreso de la tecnología en el sector agrícola durante los años recientes ha facilitado la creación de sistemas automatizados que son capaces de perfeccionar las condiciones de cultivo y aumentar el rendimiento productivo. La puesta en práctica de métodos de agricultura de precisión fundamentados en la regulación del microambiente ha sido estimulada por el requerimiento de generar alimentos sosteniblemente, particularmente en áreas urbanas o que presentan restricciones climáticas. En este marco, el cultivo de *Lactuca sativa* (lechuga tipo iceberg) constituye una opción factible por su breve ciclo vegetativo, su alta demanda en términos comerciales y su sensibilidad a las condiciones del entorno.

La temperatura, la humedad del sustrato, la disponibilidad de agua y la luz son componentes que influyen en el crecimiento y desarrollo de la lechuga. La variabilidad de estos parámetros en sistemas tradicionales tiene la capacidad de crear estrés abiótico, afectar los procesos fotosintéticos y disminuir la calidad del cultivo. Por esta razón, el control automatizado del microambiente es una táctica esencial para asegurar condiciones estables y óptimas que promuevan un desarrollo fisiológico homogéneo.

El desarrollo y el diseño de una incubadora automatizada para cultivar *Lactuca sativa* en un ambiente controlado fueron el enfoque principal de esta investigación. El sistema incorpora un armazón de acero al carbono con recubrimiento anticorrosivo, un sistema de iluminación LED que permite ajustar la intensidad en el espectro UV, una plataforma de control basada en tecnología Arduino y un sistema automatizado para regar que se basa en sensores de humedad. Esta integración de tecnología hace posible el monitoreo y la regulación de variables ambientales clave, garantizando así una estabilidad interna y disminuyendo la intervención manual.

El propósito principal del estudio fue crear una incubadora automatizada que, por medio de un sistema inteligente de riego y de la regulación de la dirección e intensidad de la luz, favoreciera el crecimiento de lechuga. Además, se intentó analizar el rendimiento del sistema en comparación con los métodos de cultivo convencionales, para establecer su efecto en la calidad, homogeneidad y duración del desarrollo del cultivo.

La investigación presenta una propuesta tecnológica que es accesible y adaptable, cuyo objetivo es optimizar el uso de recursos y reforzar prácticas agrícolas sostenibles. La puesta en marcha de sistemas automatizados en ambientes controlados mejora el desempeño vegetal y, al mismo tiempo, ayuda a la innovación de la agricultura urbana y a la seguridad alimentaria gracias a soluciones tecnológicas que son muy funcionales y tienen un bajo costo.

## II. PROBLEMA

A nivel mundial, las plantas constituyen una de las especies de seres vivos más abundantes, necesarias y representativas del planeta Tierra [1]. Se estima que cubren aproximadamente el 30 % de la superficie terrestre y generan alrededor del 80 % del oxígeno atmosférico [2] mediante el proceso de fotosíntesis [3]. Sin embargo, la sociedad no siempre considera si el ambiente en el que las plantas se desarrollan es adecuado para satisfacer sus necesidades y permitirles realizar una fotosíntesis apropiada. Según la FAO (2023) [4], la deforestación global avanza a un ritmo de 10 millones de hectáreas por año, lo que reduce la capacidad fotosintética de los ecosistemas [5]. Además, factores como la contaminación atmosférica y la disminución de radiación solar en ciertas regiones limitan la eficiencia del proceso fotosintético.

Existen diversas condiciones en las que la radiación solar no puede cumplir adecuadamente su función en el proceso de dotación de vitaminas y en la estimulación de los procesos fisiológicos de los organismos fotosintéticos [6]. Esto ocurre principalmente en entornos donde la intensidad lumínica es reducida o la reflexión de la luz es insuficiente, lo que limita la disponibilidad de radiación ultravioleta y visible necesaria para la síntesis de compuestos esenciales [7]. El cambio climático constituye otro de los principales desafíos que enfrenta la botánica en la actualidad [8]. Las variaciones extremas de temperatura y los fenómenos meteorológicos intensos, como el frío prolongado y las lluvias torrenciales, pueden ocasionar heladas o encharcamientos [9] que afectan significativamente el desarrollo y la productividad de los cultivos [10]. Del mismo modo, las condiciones de calor extremo, la escasez de precipitaciones y las elevadas temperaturas provocan estrés hídrico y deshidratación en las plantas, alterando sus procesos fisiológicos y reduciendo su capacidad de adaptación y supervivencia frente a entornos cambiantes.

El uso exclusivo de la luz ultravioleta (UV) [11] como fuente lumínica para el crecimiento vegetal genera una serie de limitaciones fisiológicas y bioquímicas que afectan al desarrollo de las plantas, dependiendo de la longitud de onda y el tiempo de exposición, si se proporciona prolongadamente puede ocasionar daños en el ADN, alteraciones anatómicas, inhibición del crecimiento y estrés oxidativo en los tejidos vegetales [12], reduciendo la viabilidad y el rendimiento de los cultivos. Los niveles altos de UV dañan el crecimiento de las plantas, dosis bajas de UV estimulan la síntesis y acumulación de compuestos saludables que absorben los UV y tiene efectos positivos sobre el valor nutricional y la productividad de diversos productos agrícolas [13].

Adicionalmente, desde una perspectiva tecnológica, la mayoría de los dispositivos que se encuentra hoy en día en el mercado tienen un costo de adquisición muy alto, y los dispositivos actuales no vienen incorporados con medidores de clorofila (sensor SPAD) [14] o controladores, que permitan el diagnóstico continuo de la planta. Asimismo, los ejemplares comerciales existentes no cuentan con sistemas capaces de regular, direccionar o controlar de manera precisa la radiación ultravioleta (UV) que incide sobre los cultivos, lo cual limita su eficacia en experimentos de iluminación controlada y en la optimización de la fotosíntesis bajo condiciones artificiales.

### III. JUSTIFICACIÓN

A nivel global, las plantas constituyen al 81,2% de la biomasa en el planeta, es un pilar fundamental en los procesos vitales que afectan a la vida del ser humano [15]. Además de ser un elemento que está estrechamente ligado a la supervivencia de los seres vivos por sus recursos naturales como proveedor de alimento, vestimenta, medicina, etc. En la actualidad, la ciencia ha reconocido aproximadamente 390.000 especies distintas de plantas [16], su conservación es importante, ya que estas son esenciales para el equilibrio y protección de ecosistemas.

La naturaleza de las plantas, por su delicadeza, hace que su manejo en las etapas de crecimiento requiera de especial cuidado y condiciones. Estudios recientes demuestran que, la luz UV emerge como una opción potencial, debido a que induce a las plantas a respuestas morfológicas y fisiológicas que fortalecen la tolerancia ambiental y su estructura en dosis controladas [17], permitiendo el estudio y adopción de nuevas tecnologías aplicables de sistemas basados en control automatizado que, mediante control preciso, se utilice la radiación ultravioleta de bajo costo como medio de estimulación para el crecimiento, floración y fructificación de las plantas. Estos sistemas pueden llegar a potenciar la adaptabilidad y sus beneficios [18].

De esta forma, se incrementa la necesidad de incorporar tecnologías que permitan automatizar el controlar el cambio de orientación e intensidad de la radiación UV mediante algoritmos de comparación y medición de tasas de crecimiento [19], por medio del uso de parámetros óptimos de exposición de radiación, para así evaluar de manera objetiva las características y cambios de las plantas [20], y a su vez reduciendo significativamente el margen de error por procesamiento de los datos obtenidos [21].

Actualmente, en el mercado agrícola los ambientes controlados de plantas son herramientas tecnológicas que presentan un alto costo de adquisición debido a su tecnología avanzada, por lo cual se propone una alternativa de bajo presupuesto con materiales que sean óptimos para garantizar las condiciones adecuadas del crecimiento de las plantas, con un sistema eficiente y accesible sin afectar la precisión y efectividad, además de controlar y monitorear la radiación UV para su crecimiento, ofreciendo una alternativa mucho más económica que las soluciones tecnológicas actuales disponibles en el mercado.

## IV. OBJETIVOS

### *IV-A. Objetivo general*

Desarrollar una incubadora automatizada que potencie el crecimiento de *Lactuca sativa* (lechuga tipo iceberg) mediante un sistema de control de orientación e intensidad lumínica de lámparas UV.

### *IV-B. Objetivos específicos*

- Diseñar la estructura de una incubadora con riego controlado, empleando materiales de bajo costo que garantice las condiciones adecuadas para el crecimiento de la planta.
- Implementar un sistema automatizado que permita el cambio de orientación y regulación de la intensidad lumínica de las lámparas UV.
- Evaluar el desempeño de la incubadora comparando si existe reducción del tiempo de crecimiento de la lechuga en condiciones controladas frente a las tradicionales.

## V. MARCO TEÓRICO

Para este proyecto se desarrollo una incubadora automatizada para el cultivo de *Lactuca sativa* (lechuga tipo Iceberg), basada en el control de la intensidad y exposición lumínica mediante radiación UV-A y un sistema de riego automatizado. La iniciativa se sustenta en principios biológicos y físicos relacionados con la radiación electromagnética y el manejo de variables ambientales. Su implementación busca optimizar el crecimiento del cultivo mediante una solución de bajo costo y consumo energético.

### V-A. Importancia de la radiación UV:

La radiación ultravioleta, especialmente la UV-A, influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas al regular procesos fisiológicos y morfológicos. En dosis controladas, estimula la aclimatación, la producción de biomasa y la síntesis de compuestos protectores, mientras que una exposición [22] excesiva puede causar estrés. Por ello, su aplicación controlada en sistemas de cultivo permite aprovechar sus beneficios sin afectar negativamente a la planta [23]. A base de este contexto, resulta pertinente analizar las respuestas fisiológicas de la *Lactuca sativa* frente a los diferentes tipos de radiación UV.

En el caso de la *Lactuca sativa*, la exposición controlada a la radiación ultravioleta puede inducir respuestas adaptativas que fortalecen los mecanismos de defensa de la planta. La radiación UV influye en la actividad fotosintética y en la regulación metabólica [24], modificando la estructura y función de los tejidos vegetales. Particularmente, la radiación UV-B, en niveles elevados, puede alterar la estructura del ADN, reducir la eficiencia fotosintética y disminuir la producción de clorofila [25]; sin embargo, en dosis bajas y bien dosificadas, es capaz de promover la producción de metabolitos secundarios, como antocianinas y flavonoides, los cuales actúan como filtros naturales frente al exceso de radiación y contribuyen a la protección celular.

La radiación UV-A es la más adecuada para sistemas de cultivo controlados, ya que participa en la señalización fisiológica de la lechuga sin causar daños severos. En cambio, la radiación UV-B, aunque puede estimular mecanismos de defensa en dosis bajas, en exposiciones elevadas reduce la fotosíntesis y daña el ADN vegetal [26]. La radiación UV-C resulta altamente perjudicial para la *Lactuca sativa*, provocando daños celulares graves [27], por lo que no es viable para su crecimiento y solo se emplea con fines de desinfección [28].

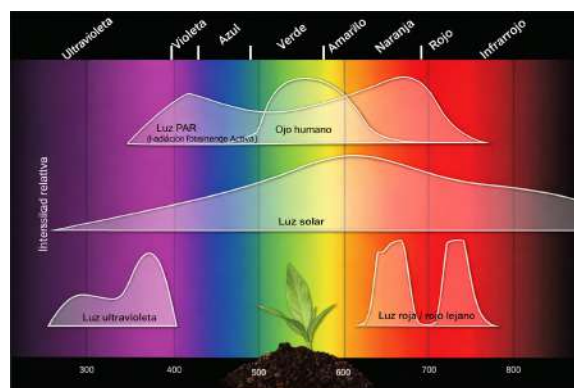


Figura 1. Respuestas fisiológicas de la radiación solar en la producción de plántulas. [29]

La figura 1 muestra el espectro de la radiación solar y la franja de luz fotosintéticamente activa, fundamental para el crecimiento de la lechuga. Evidencia cómo las longitudes de onda visibles favorecen la fotosíntesis y el desarrollo foliar. Asimismo, permite comprender el efecto diferencial de la radiación ultravioleta en la fisiología y producción de plántulas.

En este sentido, es relevante estudiar en profundidad la interacción entre la radiación UV-A y el crecimiento de *Lactuca sativa* tipo iceberg. La inducción de ciertas respuestas fisiológicas asociadas al crecimiento y la acumulación de biomasa aérea en *Lactuca sativa* tipo iceberg es posible gracias a la aplicación de radiación UV-A de banda estrecha en dosis bajas durante períodos concretos del ciclo vital.[30]. Diversos estudios han demostrado que las lechugas son capaces de aclimatarse a longitudes de onda UV-A más largas, manifestando un aumento en la producción de biomasa, sin que ello represente alteraciones significativas en los procesos de senescencia foliar ni en el índice de vegetación de diferencia normalizada. En el caso particular de la lechuga iceberg, caracterizada por su estructura compacta y hojas internas protegidas, estas respuestas pueden favorecer un desarrollo más uniforme y controlado del cultivo.

Las reacciones luminosas de la fotosíntesis desempeñan un papel fundamental en la conversión de la energía luminosa en energía química, la cual posteriormente se traduce en crecimiento vegetal [31]. Sin embargo, no toda la radiación incidente es utilizada directamente para impulsar estas reacciones, por lo que las plantas han desarrollado mecanismos especializados para manejar el exceso de energía luminosa. Las plantas superiores, incluida *Lactuca sativa*, cuentan con sistemas de disipación que permiten liberar el exceso de energía en forma de calor o fluorescencia, reduciendo así el riesgo de fotoinhibición y protegiendo la integridad del aparato fotosintético.

Tradicionalmente, la luz azul y roja han sido reconocidas como las longitudes de onda más eficientes para estimular la fotosíntesis, debido a su alta absorción por los pigmentos fotosintéticos [32]. La percepción de la luz azul, a través de fotorreceptores específicos, permite a las plantas regular procesos morfogenéticos y adaptarse a condiciones de competencia lumínica. Asimismo, las variaciones en la intensidad de la luz azul influyen en el balance energético de la planta y en la dinámica del intercambio gaseoso, principalmente a través del control estomático, lo cual repercute directamente en la transpiración y la asimilación de carbono.

En relación con otras regiones del espectro, la radiación UV-A ha sido menos estudiada, por lo que aún existen datos limitados sobre sus efectos específicos en las plantas. No obstante, se ha observado que la exposición controlada a UV-A puede influir en la morfología vegetal, en los procesos fotosintéticos y en las respuestas metabólicas [33], siendo estos efectos altamente dependientes de la dosis aplicada, la duración de la exposición, la etapa fenológica del cultivo y los antecedentes genéticos de la especie. En la lechuga iceberg, una aplicación controlada de UV-A puede contribuir a optimizar el crecimiento sin comprometer la calidad fisiológica del cultivo. [34]

El uso de dosis bajas de radiación UV-A de banda estrecha [35], integradas dentro de un sistema automatizado de control lumínico, representa una estrategia viable para potenciar el desarrollo de *Lactuca sativa* tipo iceberg. Al aplicar la radiación en momentos clave del ciclo de crecimiento, es posible estimular la producción de biomasa aérea y favorecer un desarrollo más eficiente del cultivo, manteniendo condiciones lumínicas seguras y controladas

que se alinean con los objetivos de un sistema de incubación automatizado de bajo consumo energético.

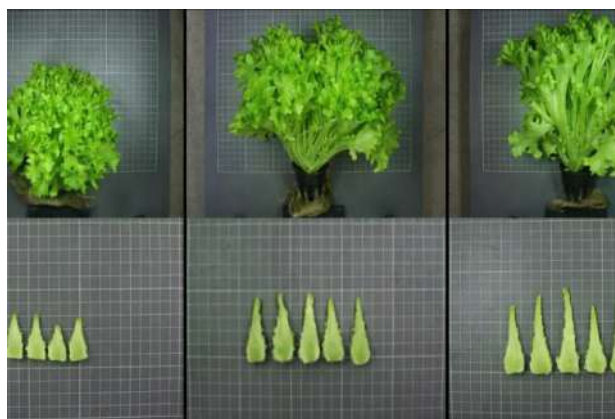


Figura 2. Exposición de energía lumínica artificial UV-A en lechugas. [36]

La figura 2 muestra una comparación del crecimiento y la evolución de plantas de lechuga que fueron expuestas a energía lumínica artificial UV-A en condiciones controladas. En la fila de arriba se pueden ver las plantas enteras, en las que se notan variaciones en el volumen, la densidad de las hojas y la fuerza vegetativa dependiendo del tratamiento de luz que se les aplicó.

Desde una perspectiva aplicada, es relevante examinar el uso de radiación UV en sistemas de horticultura interna de *Lactuca sativa*. En la horticultura interna, la ausencia de radiación solar directa hace necesaria la implementación de fuentes de iluminación artificial capaces de reproducir, de manera selectiva, componentes específicos del espectro lumínico [37]. En este contexto, la radiación ultravioleta se integra como un complemento a la iluminación convencional, permitiendo influir en la aclimatación de las plantas al entorno controlado [38], así como en la calidad estructural y funcional del cultivo de *Lactuca sativa*. Su aplicación debe realizarse de forma cuidadosamente regulada, considerando parámetros como la intensidad lumínica, el tiempo de exposición y la etapa fenológica de la planta, con el fin de evitar efectos adversos asociados a una sobreexposición [39].

Tradicionalmente, el manejo de la iluminación en sistemas de cultivo interno se ha llevado a cabo mediante procesos manuales [40], en los cuales el operador controla directamente el encendido, apagado y duración de la exposición lumínica [41]. Este tipo de manejo se basa principalmente en la observación del estado del cultivo y en la experiencia del usuario, lo que puede generar variabilidad en el crecimiento y limitar la repetibilidad de los resultados [42]. A pesar de su simplicidad, el control manual requiere supervisión constante para garantizar condiciones adecuadas y minimizar riesgos de estrés lumínico en la lechuga.

La evolución hacia procesos automatizados ha permitido optimizar el uso de la radiación ultravioleta dentro de la horticultura interna [43]. Mediante la incorporación de tecnologías de control lumínico, es posible regular de manera precisa la intensidad, orientación y duración de la iluminación [44], adaptándola dinámicamente a las necesidades del cultivo. Esta capacidad de ajuste favorece la uniformidad del crecimiento, optimiza el desarrollo foliar y asegura una distribución homogénea de la energía luminosa sobre las plantas, aspectos fundamentales en

la producción de lechuga [45] destinada al consumo.

Asimismo, la automatización contribuye a mejorar la eficiencia del sistema productivo al reducir la intervención humana directa y permitir un uso más racional de los recursos energéticos [46]. La regulación precisa de la radiación ultravioleta, integrada con otros parámetros ambientales del cultivo, facilita la creación de condiciones estables y reproducibles [47], lo que resulta especialmente relevante en proyectos orientados al desarrollo de sistemas de cultivo inteligentes y de bajo consumo energético [48].

En términos generales, la radiación ultravioleta, cuando es gestionada de manera controlada dentro de sistemas de horticultura interna, representa un elemento estratégico para el diseño de ambientes de cultivo optimizados [49]. Su correcta integración, ya sea mediante procesos manuales supervisados o sistemas automatizados de control [50], permite potenciar el desarrollo de *Lactuca sativa*, asegurar la consistencia de los resultados productivos y reducir los riesgos asociados a exposiciones lumínicas inadecuadas, contribuyendo a sistemas de producción más eficientes y sostenibles [51].



Figura 3. Sistema de horticultura interna. [52]

La figura 3 muestra un sistema de horticultura interna diseñado para el cultivo de plantas en un ambiente completamente controlado. Se aprecian bandejas de cultivo dispuestas en una estructura elevada, que están alumbradas por lámparas artificiales que brindan la energía lumínica que se requiere para el crecimiento de las plantas, sin importar las condiciones externas.

En este marco conceptual, resulta necesario definir la irradiancia ( $I$ ) como parámetro radiométrico clave en la gestión de la radiación ultravioleta. Es la magnitud radiométrica fundamental que permite describir la energía de la radiación electromagnética [53] que incide sobre una superficie determinada. En el contexto de la horticultura en ambientes controlados, esta magnitud adquiere especial relevancia, ya que posibilita caracterizar de manera precisa el régimen de iluminación artificial aplicado al cultivo de *Lactuca sativa*. Su adecuada gestión resulta esencial para establecer condiciones lumínicas estables, homogéneas y reproducibles, especialmente en sistemas de producción interna donde la radiación solar directa no está presente.

En el cultivo interno de lechuga, la irradiancia influye directamente en la forma en que la energía luminosa se distribuye sobre el dosel vegetal, afectando procesos fisiológicos asociados al crecimiento vegetativo [54], como la expansión foliar, la arquitectura de la planta y la acumulación de biomasa aérea. Un control apropiado de esta magnitud contribuye a reducir desigualdades en la iluminación dentro del área de cultivo, favoreciendo un desarrollo uniforme del cultivo y mejorando la calidad estructural del producto final.

Desde una perspectiva física, la irradiancia se entiende como una relación entre la energía lumínica incidente y la superficie receptora, lo que proporciona una base conceptual sólida para analizar la interacción entre la luz artificial [55] y los tejidos vegetales. Esta definición permite establecer criterios técnicos para el diseño de sistemas de iluminación en horticultura interna, así como para la evaluación de su desempeño y su adaptación a las necesidades específicas del cultivo de *Lactuca sativa*.

La ecuación (1) representa como se calcula el índice de irradiancia.

Fórmula:

$$I = \frac{P (W)}{A (m^2)} = \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (1)$$

**Donde:**

P: Es la potencia incidente.

A: Área superficial donde la onda hace contacto.

W= Vatios.

m<sup>2</sup>= metros cuadrados.

La incorporación de este concepto en el análisis del sistema lumínico facilita su integración con otras condiciones ambientales propias de los cultivos en espacios cerrados, como el fotoperíodo y la distribución espacial de la luz [56]. De este modo, se posibilita una regulación más precisa de la iluminación, tanto en esquemas de manejo manual como en sistemas automatizados, orientados a mantener un crecimiento equilibrado y continuo del cultivo.

Asimismo, la consideración de la irradiancia en la planificación del cultivo permite evaluar la eficiencia con la que la energía luminosa es aprovechada por la planta, así como optimizar la disposición y orientación de las fuentes de luz [57]. Este enfoque resulta especialmente relevante en sistemas de producción intensiva de *Lactuca sativa*, donde la uniformidad del crecimiento y la repetibilidad de los resultados productivos constituyen criterios clave de calidad.

Además, se emplea para determinar la constante solar, que es el volumen de energía solar que alcanza a la atmósfera superior de la Tierra por unidad de tiempo y superficie. Según el Centro Mundial de Referencia de Radiación (WRRC), su valor es 1367 W/m<sup>2</sup>; de acuerdo con la Organización Mundial de Meteorología (OMM), es 1373 W/m<sup>2</sup>; y según la NASA, es 1353 W/m<sup>2</sup>. [58].

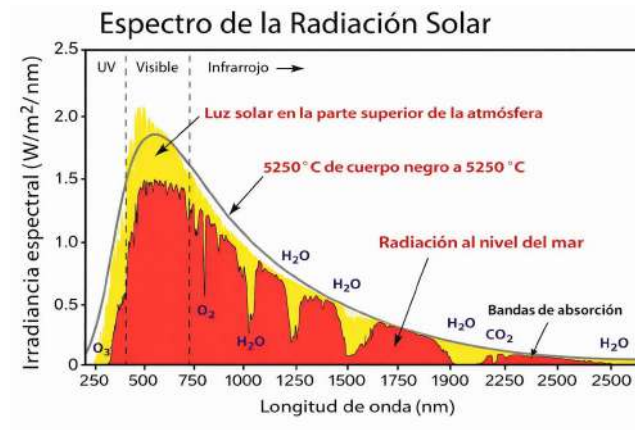


Figura 4. Escala de radiación solar de la Tierra ún el WRRC. [59]

El espectro de la radiación solar se muestra en la figura 4, y allí se puede ver cómo el Sol distribuye su energía a través de diferentes longitudes de onda. En el eje vertical se presenta la irradiancia espectral, que es la cantidad de energía que recibe cada unidad de superficie y longitud de onda. En el eje horizontal se muestra la longitud de onda (en nanómetros).

En complemento a la irradiancia, resulta fundamental considerar la dosis energética o energía acumulada (E) como parámetro asociado a la exposición radiativa. Se refiere a la cantidad total de energía absorbida por un material o tejido al exponerse a una fuente de radiación. En términos físicos, corresponde a la dosis absorbida, que representa la energía transferida por unidad de masa del cuerpo irradiado [60].

La energía acumulada puede calcularse mediante la relación entre la irradiancia y el tiempo de exposición, según la expresión (2).

Fórmula:

$$E = I \left( \frac{W}{m^2} \right) \cdot t(s) = \left( \frac{J}{m^2} \right) \quad (2)$$

**Donde:**

t: Tiempo de exposición a la radiación (segundos).

J= Joules.

En el desarrollo de una incubadora automatizada destinada al cultivo de Lactuca sativa tipo Iceberg, la dosis energética se plantea un concepto fundamental para vincular la intensidad de la radiación ultravioleta suministrada por las lámparas con el periodo de exposición del cultivo [61]. Esta relación permite analizar el efecto acumulativo de la energía luminosa sobre la planta y comprender su influencia en los procesos fisiológicos que se desarrollan dentro de un ambiente de cultivo controlado [62].

Una administración adecuada de la dosis energética resulta indispensable para garantizar que la radiación aplicada tenga un efecto estimulante sobre la planta y no se convierta en una fuente de estrés [63]. En sistemas de cultivo asistidos, una dosificación controlada contribuye a la adaptación del cultivo, al desarrollo de la superficie foliar y a la producción de biomasa, mientras que valores excesivos pueden provocar desequilibrios metabólicos y afectar negativamente el crecimiento vegetal [64]. En este sentido, la regulación conjunta de la irradiancia y del tiempo de exposición se establece como un factor determinante para optimizar el rendimiento del cultivo dentro de la incubadora.

A diferencia de otros parámetros lumínicos que describen estados instantáneos, la dosis energética considera de forma integrada la intensidad de la radiación y la duración de su aplicación [65]. Esta característica cobra especial importancia en la horticultura interna basada en iluminación artificial, donde un control preciso del régimen lumínico es esencial para prevenir tanto carencias energéticas [66] como exposiciones excesivas que puedan desencadenar respuestas fisiológicas desfavorables en la planta.

Desde la perspectiva del sistema automatizado propuesto, la dosis energética funciona como una variable de control que guía los ajustes dinámicos de la orientación e intensidad de las lámparas UV, en función de los requerimientos del cultivo y de su fase fenológica. En el cultivo interno de lechuga, este enfoque permite adecuar la iluminación a cada etapa del desarrollo [67], promoviendo un crecimiento foliar uniforme, una acumulación de biomasa controlada y condiciones ambientales estables y repetibles [68]. De esta manera, la dosificación energética se consolida como un componente estratégico para incrementar la eficiencia del proceso de incubación y potenciar los beneficios de la radiación aplicada.



Figura 5. Detección de energía radiactiva acumulada en viveros industriales. [69]

La figura 5 presenta la medición de energía radiactiva acumulada en un ambiente agrícola, más concretamente en una plantación que se encuentra dentro de un vivero o sistema de producción vegetal. Un trabajador está usando un dispositivo portátil de detección radiométrica, que se utiliza para medir los niveles de radiación en el ambiente y sobre las plantas. Esta clase de monitoreo posibilita el análisis de la exposición energética acumulada en los cultivos, garantizando que los niveles de radiación permanezcan dentro de límites apropiados y seguros para el crecimiento vegetal. La medición radiométrica también ayuda a optimizar las condiciones medioambientales en sistemas agrícolas tecnificados, a gestionar los riesgos y a controlar la calidad del entorno productivo.

### V-B. *Sistemas de cultivo controlado*

La agricultura de ambiente controlado (CEA) [70] se posiciona como una alternativa tecnológica frente a los desafíos climáticos actuales. Los efectos del cambio climático han reducido progresivamente la productividad de los sistemas agrícolas convencionales, afectando de manera directa la seguridad alimentaria a nivel global [71]. Identificar las variaciones climáticas extremas y la proliferación de plagas como factores que evidencian la necesidad de implementar estrategias productivas alternativas capaces de garantizar la estabilidad y continuidad de la producción agrícola [72]. Considerar a la agricultura de ambiente controlado (Controlled Environment Agriculture, CEA) como una solución tecnológica orientada a disminuir la dependencia de las condiciones ambientales externas y a mejorar la eficiencia de los sistemas de cultivo [73].

Examinar el rendimiento de la agricultura de ambiente controlado en relación con la producción de lechuga, al tratarse de un cultivo de alto valor con elevada adaptabilidad a entornos controlados. Evidenciar, a partir de la revisión de literatura científica especializada, que estos sistemas permiten incrementar el rendimiento productivo en comparación con la agricultura a campo abierto [74], así como reducir de forma significativa los ciclos de cultivo. Atribuir estos beneficios a la capacidad de regular variables ambientales como la iluminación, la temperatura, la humedad y la nutrición vegetal [75], lo que favorece un crecimiento uniforme y predecible del cultivo.

Incorporar sistemas de cultivo vertical dentro de la agricultura de ambiente controlado para optimizar el uso del espacio disponible mediante la disposición del cultivo en múltiples niveles [76]. Destacar la relevancia de este enfoque en entornos urbanos o en regiones con limitaciones de superficie agrícola, donde maximizar la producción por unidad de área resulta fundamental [77].

Evaluar el papel de la iluminación artificial como un factor determinante en el rendimiento y la calidad del cultivo dentro de sistemas de ambiente controlado. Identificar configuraciones lumínicas basadas en combinaciones específicas del espectro visible, así como el uso de luz de espectro completo [78], como alternativas eficaces para el desarrollo de la lechuga. Priorizar la adopción de tecnologías de iluminación LED debido a su elevada eficiencia energética [79], su capacidad de ajuste espectral y su bajo aporte térmico, contribuyendo a la reducción del consumo energético [80], la disminución de pérdidas de agua y la mejora de la sostenibilidad del sistema productivo.



Figura 6. Observación y desempeño de CEA en el cultivo de lechuga. [81]

La figura 6 ilustra la evaluación y el monitoreo del rendimiento de un sistema de Agricultura en Ambiente Controlado (CEA) que se utiliza para cultivar lechuga. Un técnico que supervisa el crecimiento de las plantas a través de una tableta electrónica se puede ver en una instalación que tiene estanterías para cultivo y luz artificial. Sistemas como este posibilitan un control exacto de factores como la luz, la humedad, la temperatura y los nutrientes, lo que propicia un crecimiento eficaz y uniforme. En sistemas contemporáneos de cultivo protegido, supervisar y registrar datos de manera constante ayuda a tomar decisiones, optimizar las condiciones del ambiente y mejorar la productividad.

En este marco de optimización ambiental y lumínica, es pertinente considerar el papel de los invernaderos y las cámaras de crecimiento como infraestructuras clave dentro de los sistemas de ambiente controlado. En los sistemas de producción vegetal bajo ambientes controlados, como invernaderos tecnificados y cámaras de crecimiento, las variables ambientales ejercen una influencia determinante sobre el comportamiento fisiológico de las plantas [82]. Entre estas variables, la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono destacan por su impacto directo en procesos esenciales como la fotosíntesis, la transpiración, el crecimiento y el desarrollo fenológico [83]. Cada especie vegetal presenta rangos específicos de tolerancia y valores óptimos para estas condiciones, fuera de los cuales los procesos metabólicos pueden verse limitados o incluso detenerse.

La temperatura no solo actúa como un factor aislado, sino que su efecto depende de la interacción entre los períodos diurnos y nocturnos, así como de las diferencias térmicas entre el sistema radicular y la parte aérea de la planta. En cultivos hortícolas como *Lactuca sativa*, estas relaciones térmicas influyen en la velocidad de crecimiento, la expansión foliar y la eficiencia fisiológica general [84]. De manera complementaria, la humedad ambiental regula el comportamiento estomático, condicionando las tasas de transpiración y el intercambio gaseoso, lo que repercute directamente en la productividad del cultivo [85]. Asimismo, la disponibilidad de dióxido de carbono afecta la actividad enzimática asociada a la fijación del carbono, siendo un factor clave en la eficiencia fotosintética.

Debido a la interdependencia de estas variables, resulta complejo analizar el efecto individual de cada una en condiciones de campo abierto o incluso en invernaderos convencionales con iluminación natural [86]. En este contexto, las cámaras de ambiente controlado también conocidas como fitotrones, surgen como herramientas fundamentales para el estudio y la optimización del crecimiento vegetal, ya que permiten regular de manera simultánea y precisa múltiples factores ambientales. A diferencia de los invernaderos tradicionales, donde el control de la radiación solar y del fotoperíodo está limitado por la ubicación geográfica y la estacionalidad, las cámaras de crecimiento emplean iluminación artificial [87], lo que posibilita definir de forma exacta la duración del período lumínico, la intensidad y la composición espectral de la luz.

Este enfoque resulta especialmente relevante para el desarrollo de incubadoras automatizadas orientadas al cultivo de *Lactuca sativa*, donde la integración de sistemas de control lumínico, térmico y de riego permite reproducir condiciones ambientales estables y reproducibles [88]. La posibilidad de regular la iluminación mediante lámparas UV con control de orientación e intensidad, junto con la gestión precisa del riego, facilita la creación de un entorno optimizado que favorece el crecimiento equilibrado del cultivo [89] y reduce la variabilidad asociada a factores externos.

En este tipo de sistemas, la automatización adquiere un papel central, ya que permite ajustar dinámicamente las condiciones ambientales en función de las necesidades fisiológicas de la planta y de su etapa de desarrollo [90]. De este modo, las cámaras de crecimiento y las incubadoras automatizadas se consolidan como plataformas tecnológicas avanzadas para la horticultura interna, ofreciendo ventajas significativas frente a los métodos tradicionales [91], tanto en términos de eficiencia productiva como de control y repetibilidad de los resultados.



Figura 7. Sistema de invernadero automatizado mediante luz UV. [92]

La figura 7 presenta el interior de un invernadero automatizado que tiene sistemas de luz artificial, entre ellos la UV, con el fin de mejorar el crecimiento de los cultivos en ambientes controlados. Se pueden observar estanterías con bandejas de plantas, dispuestas en diferentes niveles y iluminadas por lámparas que emiten un espectro lumínico particular para favorecer el desarrollo vegetal.

Derivado de lo anterior, el control ambiental en invernaderos se posiciona como un elemento estratégico dentro de estos sistemas de producción. La implementación de invernaderos y cámaras de crecimiento se ha consolidado como una alternativa esencial en la horticultura contemporánea, al posibilitar la generación de entornos de cultivo con condiciones ambientales reguladas de forma precisa [93]. Estos sistemas permiten minimizar la influencia de factores climáticos externos y mantener parámetros estables que resultan determinantes para el desarrollo fisiológico de las plantas, tales como la temperatura, la humedad relativa, el suministro de agua y el régimen de iluminación [94].

El control ambiental en la horticultura interna no solo busca incrementar el rendimiento del cultivo, sino también optimizar el uso de los recursos disponibles. La gestión eficiente del agua, la energía y la iluminación reduce pérdidas asociadas a manejos poco precisos y favorece la sostenibilidad del sistema productivo [95]. Asimismo, el ambiente protegido limita la exposición a agentes externos, facilitando el manejo sanitario del cultivo y disminuyendo la necesidad de intervenciones correctivas [96].

Los sistemas automatizados de control ambiental se posicionan como elementos fundamentales para el diseño de espacios de cultivo tecnificados [97]. Su aplicación permite reproducir de forma constante condiciones óptimas para el crecimiento vegetal, fortaleciendo el desarrollo controlado de cultivos hortícolas y proporcionando una base

técnica sólida para proyectos orientados a la mejora del crecimiento de *Lactuca sativa* [98] mediante la regulación precisa del entorno de producción.



Figura 8. Ventajas del control hídrico en la cultivación de lechuga. [99]

En la figura 8 se observa un sistema de riego localizado, que se utiliza para el cultivo de lechuga. Este tipo de riego consiste en una línea de goteo que aporta agua directamente al sustrato cercano a las raíces vegetales. Este método posibilita una distribución equitativa y supervisada del recurso hídrico, previniendo que se pierda por evaporación o escorrentía.

Desde una perspectiva de escalabilidad del sistema, resulta pertinente ampliar el enfoque hacia la agricultura urbana y doméstica como extensión de los sistemas de cultivo controlado. Ampliar el concepto de agricultura urbana hacia el entorno doméstico permitir aplicar modelos de producción vegetal controlada dentro de espacios residenciales, tales como viviendas, departamentos o áreas comunes del hogar [100]. La agricultura doméstica orientarse principalmente al cultivo de especies hortícolas de crecimiento rápido [101], como *Lactuca sativa* tipo Iceberg, mediante sistemas compactos diseñados para optimizar el uso del espacio disponible y simplificar su implementación sin requerir grandes extensiones ni infraestructuras complejas.

Desarrollar sistemas de cultivo doméstico contribuir a asegurar la disponibilidad constante de alimentos frescos, disminuir la dependencia de productos provenientes de cadenas comerciales y fomentar prácticas agrícolas sostenibles a escala local [102]. La integración de tecnologías de control ambiental, iluminación artificial y riego automatizado permitir mantener condiciones de crecimiento estables, independientemente de las variaciones climáticas externas o de la disponibilidad de luz natural.

Incorporar la producción hortícola en el ámbito doméstico favorecer un uso más eficiente de recursos como el agua y la energía, al mismo tiempo que posibilitar un control preciso de las variables críticas del cultivo [103]. En este contexto, el uso de incubadoras o cámaras de crecimiento automatizadas facilitar regular la orientación e intensidad de la iluminación [104], así como el suministro hídrico, garantizando un desarrollo vegetal uniforme y

reproducibile en espacios interiores.

Consolidar la agricultura urbana y doméstica como un sistema integrado permitir acercar la producción de alimentos al consumidor final, reforzar la seguridad alimentaria local y promover la adopción de soluciones tecnológicas accesibles y de fácil operación [105]. Este enfoque resultar especialmente adecuado para el cultivo doméstico de lechuga, al combinar eficiencia productiva, control ambiental y viabilidad de implementación en entornos residenciales.



Figura 9. Huerto urbano de verduras elaborado por residentes de manera manual. [106]

La figura 9 ilustra un huerto urbano que es administrado a mano por habitantes, en el que se producen hortalizas dentro de un contexto doméstico o comunitario. Se ve a dos individuos que están cuidando y manteniendo las plantas, llevando a cabo tareas como el seguimiento del desarrollo de las mismas, la erradicación de malas hierbas y la inspección del estado de los cultivos.

#### V-C. *Control de variables ambientales*

Estrategias de regulación ambiental En complemento a las condiciones del medio de cultivo, resulta necesario abordar el control integral de los procesos ambientales en sistemas tecnificados. La lechuga demanda un entorno ambiental adecuadamente regulado para asegurar un crecimiento vegetativo óptimo y un proceso fotosintético eficiente [107]. Para ello, es necesario disponer de una cantidad suficiente de radiación lumínica, estimada en un promedio de cinco a seis horas diarias de luz efectiva, aunque la planta presenta cierta tolerancia a condiciones de iluminación parcial [108]. En situaciones donde la radiación solar resulta excesiva, especialmente si se combina con temperaturas elevadas, pueden presentarse efectos de estrés térmico, lo que hace indispensable el control de la intensidad y dirección de la luz [109]. En sistemas de cultivo protegido, como cámaras de crecimiento o incubadoras, la incorporación de iluminación artificial con parámetros regulables, incluyendo radiación ultravioleta controlada, permite mejorar el desarrollo del cultivo [110], acortar el ciclo productivo y prevenir la floración anticipada,

incrementando la calidad final del producto.

Debido a que su sistema radicular se encuentra poco profundo, la lechuga requiere un aporte de agua constante y homogéneo, manteniendo el sustrato o suelo húmedo de forma continua, pero sin llegar al encharcamiento [111]. Las necesidades hídricas del cultivo se sitúan aproximadamente entre 280 y 560 mm por metro cuadrado, siendo preferible la aplicación de riego por goteo o aspersión que aseguren una aplicación eficiente y localizada en la zona radicular [112]. Con el fin de reducir pérdidas por evaporación y limitar la aparición de enfermedades asociadas al exceso de humedad, el riego debe efectuarse durante periodos de baja radiación solar, integrándose de manera óptima en esquemas de riego automatizado [113].

Respecto al medio de cultivo, la lechuga presenta un mejor desempeño en suelos con buena aireación, drenaje adecuado y alto contenido de materia orgánica [114], lo que favorece la disponibilidad de nutrientes esenciales. El pH del medio debe mantenerse cercano a la neutralidad [115], preferentemente entre 6,0 y 6,8, recomendándose la aplicación de enmiendas orgánicas previas a la siembra o al trasplante para optimizar la estructura y fertilidad del suelo [116]. En sistemas de cultivo controlados y de carácter doméstico, el uso de sustratos artificiales permite homogeneizar las condiciones de crecimiento, disminuir la variabilidad ambiental y mejorar la eficiencia del sistema productivo [117], especialmente cuando se combinan con tecnologías de control automático de variables como la iluminación, la temperatura y el riego.



Figura 10. Control Térmico del Sustrato y su Influencia en el Desarrollo Radicular de *Lactuca sativa*. [118]

La figura 10 muestra la medición de la temperatura del sustrato mediante un termómetro insertado en el suelo cercano a plántulas en crecimiento. Este tipo de seguimiento posibilita que se conozcan las condiciones térmicas en la región radicular, un aspecto crucial para el desarrollo de raíces, la germinación y la absorción eficaz de nutrientes y agua.

La regulación térmica del sustrato es de particular relevancia en los cultivos de *Lactuca sativa*, porque la temperatura incorrecta puede perjudicar tanto el desarrollo como la salud de las plantas. Contribuye a un desarrollo radicular apropiado y a una producción más uniforme mantener una temperatura óptima. En coherencia con la optimización del sustrato, el control integral de los procesos ambientales consolida la estabilidad del sistema de cultivo.

Analizar el control de procesos ambientales en *Lactuca sativa* dentro de entornos controlados con iluminación artificial implica considerar la regulación simultánea de la luz, la temperatura [119], la humedad relativa, la velocidad del aire y la concentración de dióxido de carbono, con el fin de optimizar el crecimiento vegetal y maximizar la eficiencia en el uso de los recursos. Implementar estos sistemas en cámaras de crecimiento o incubadoras permite generar condiciones homogéneas y reproducibles [120], favoreciendo un desarrollo uniforme y predecible del cultivo.

Ajustar las condiciones de iluminación artificial mediante el empleo de sistemas LED con control de intensidad, espectro y fotoperiodo permite incrementar la eficiencia fotosintética, reducir el tiempo del ciclo de cultivo y mejorar la productividad [121]. La combinación de diferentes longitudes de onda, incluyendo radiación roja, azul, blanca y ultravioleta controlada, posibilita modular procesos fisiológicos relacionados con la morfología, el crecimiento y la acumulación de biomasa vegetal.

Regular la temperatura ambiental durante los periodos de iluminación permite favorecer la absorción de dióxido de carbono y mantener niveles adecuados de actividad metabólica, lo que se traduce en un crecimiento más eficiente [122]. Controlar la humedad relativa del aire resulta esencial para limitar el estrés hídrico, regular la transpiración y mantener una conductancia estomática adecuada, contribuyendo al desarrollo vegetativo del cultivo.

Gestionar la velocidad del flujo de aire dentro del sistema de cultivo permite mejorar el intercambio gaseoso entre las hojas y el entorno, facilitar la disipación del calor foliar y reducir la resistencia de la capa límite [123]. Mantener un flujo de aire uniforme contribuye a prevenir alteraciones fisiológicas y a asegurar condiciones ambientales homogéneas en todo el volumen de cultivo.

Regular la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) superior a los niveles atmosféricos permite incrementar la tasa fotosintética y la productividad de *Lactuca sativa*, siempre que se mantenga dentro de rangos óptimos que aseguren una utilización eficiente del gas [124]. Integrar el control de todas estas variables mediante sistemas automatizados permite maximizar la eficiencia energética, mejorar la calidad del cultivo y fortalecer la viabilidad de la producción en incubadoras y cámaras de crecimiento con iluminación artificial [125].



Figura 11. Gestión Hídrica y Regulación Ambiental en Sistemas de Producción de Lechuga. [126]

La figura 11 ilustra un sistema de producción de lechuga a cielo abierto que utiliza riego por aspersión, el cual reparte el agua de forma pareja entre las filas de cultivo. Este método posibilita que el suelo conserve niveles

apropiados de humedad y colabore con la regulación térmica del microclima que envuelve a las plantas. Para que el cultivo crezca de manera saludable, es esencial una gestión adecuada del agua, pues esta incide en el desarrollo de las hojas, la asimilación de nutrientes y la productividad. La adopción de sistemas de riego eficaces promueve el uso sensato del agua y mejora las condiciones medioambientales requeridas para una producción agrícola sustentable.

En coherencia con la automatización del entorno de cultivo, se deben evaluar las estrategias de regulación ambiental en escenarios productivos reales. El análisis del suministro continuo de lechuga durante todo el año en el Reino Unido permite comprender la relevancia de las estrategias de regulación ambiental dentro de los sistemas de producción agrícola [127]. En el contexto del debate sobre sostenibilidad y responsabilidad ética en las cadenas de abastecimiento de alimentos frescos, la lechuga se toma como caso de estudio debido al crecimiento sostenido de su consumo y a la necesidad de garantizar su disponibilidad en todas las estaciones [128]. Durante los meses cálidos, la producción se realiza principalmente a campo abierto en el Reino Unido, mientras que en invierno el abastecimiento proviene tanto de cultivos protegidos en el propio país como de cultivos al aire libre en España [129]. Esta variación estacional evidencia cómo las estrategias de manejo ambiental influyen directamente en el impacto ambiental y en la eficiencia del sistema productivo.

Mediante la aplicación de la metodología de evaluación del ciclo de vida, se analizaron las etapas comprendidas desde la propagación hasta la cosecha, incluyendo la refrigeración posterior y el transporte hacia un centro de distribución regional [130]. Los resultados muestran que las estrategias de regulación ambiental implementadas en sistemas protegidos, como el control de temperatura mediante calefacción, generan un mayor consumo energético durante el invierno, incrementando las emisiones asociadas [131]. En contraste, el cultivo a campo abierto en condiciones climáticas favorables presenta menores impactos ambientales, aunque está limitado por la estacionalidad. En el caso de la lechuga importada desde España [132], el transporte refrigerado representa un componente relevante de las emisiones totales, lo que demuestra que la regulación ambiental no solo interviene en la fase de producción, sino también en la conservación y distribución del producto.

Los hallazgos evidencian que las estrategias de regulación ambiental deben diseñarse considerando factores como la estación del año [133], el contexto geográfico y la eficiencia en el uso de recursos como energía, agua y suelo. Asimismo, se identificó que las diferencias en las prácticas agrícolas dentro de un mismo país pueden generar variaciones significativas en el impacto ambiental [134], incluso mayores que las diferencias entre países. Desde el punto de vista social, la percepción de frescura y los hábitos de consumo también influyen en la demanda estacional, lo que sugiere que las decisiones del consumidor forman parte del sistema integral de sostenibilidad.

En conjunto, el estudio resalta que la regulación ambiental en la producción de lechuga es un elemento determinante no solo para garantizar el rendimiento y la calidad del cultivo [135], sino también para minimizar su impacto ambiental. Por ello, resulta fundamental optimizar las estrategias de control en sistemas protegidos, especialmente en periodos de baja disponibilidad climática [136], y considerar la estacionalidad como un factor clave en la planificación de modelos de producción más sostenibles. [137]



Figura 12. Tecnologías de regulación ambiental en sistemas protegidos de Lactuca sativa. [138]

La figura 12 ilustra la implementación de estrategias de regulación ambiental en el cultivo de Lactuca sativa dentro de un invernadero tecnificado. Se observa el uso de dispositivos digitales y sistemas automatizados para supervisar variables como temperatura, humedad y riego. Este enfoque permite mantener condiciones óptimas de crecimiento mediante monitoreo en tiempo real. En conjunto, la figura evidencia cómo el control ambiental mejora la eficiencia productiva y la estabilidad del cultivo.

Desde una perspectiva operativa, el monitoreo continuo constituye un componente clave en la gestión ambiental del cultivo. El monitoreo continuo en Lactuca sativa representa un elemento fundamental en los sistemas actuales de agricultura protegida, especialmente en aquellos donde el control ambiental depende de información precisa, constante y en tiempo real [139]. Evaluar de manera sistemática los rasgos fenotípicos del cultivo permite optimizar el rendimiento y mejorar la toma de decisiones relacionadas con el manejo de variables como temperatura, humedad, radiación e irrigación [140], favoreciendo una gestión más eficiente del sistema productivo.

Históricamente, las observaciones manuales y las mediciones destructivas constituyeron el método para monitorear el crecimiento de la lechuga [141]. Sin embargo, estos métodos tienen limitaciones en cuanto a la baja eficiencia, la escasa capacidad de respuesta inmediata y la subjetividad. Estas limitaciones hacen que sea complejo poner en marcha estrategias de regulación ambiental dinámicas [142], debido a que no ofrecen información constante que posibilite modificar a tiempo las condiciones ambientales del cultivo.

Con el desarrollo de tecnologías de visión por computador y modelos de aprendizaje profundo, el fenotipado vegetal ha evolucionado hacia métodos no invasivos capaces de operar directamente en el sitio de producción [143]. El uso de sensores RGB, cámaras de profundidad y sistemas RGB-D facilita la obtención automática de variables clave como altura de planta, área foliar [144], biomasa y dimensiones estructurales, parámetros estrechamente vinculados al estado fisiológico del cultivo. La integración de datos multimodales, junto con mecanismos de atención adaptativa, permite identificar relaciones complejas entre distintas fuentes de información [145], superando las limitaciones de los enfoques tradicionales basados en características únicas o relaciones lineales.[146]

La relevancia del monitoreo continuo radica en su capacidad para detectar de manera temprana alteraciones en el crecimiento [147], situaciones de estrés o desequilibrios nutricionales, posibilitando intervenciones oportunas. Al vincular los datos fenotípicos con los sistemas automatizados de control ambiental [148], se favorece una regulación

más precisa y eficiente del invernadero, optimizando el uso de energía y recursos hídricos [149]. Además, al tratarse de un procedimiento no destructivo, permite realizar seguimiento longitudinal del cultivo durante todo su ciclo de desarrollo.

Asimismo, el monitoreo constante constituye la base para la implementación de modelos predictivos en agricultura inteligente, facilitando la transición hacia sistemas altamente automatizados [150]. En el caso de la lechuga, especie sensible a variaciones ambientales y de ciclo relativamente corto [151], esta capacidad resulta especialmente relevante, ya que pequeñas fluctuaciones pueden afectar significativamente su calidad y rendimiento. En conjunto, el monitoreo continuo en *Lactuca sativa* fortalece la precisión en la evaluación del crecimiento, mejora la eficiencia en la gestión ambiental y contribuye al desarrollo de sistemas productivos más sostenibles, tecnificados y orientados a la optimización integral del cultivo [152].



Figura 13. Monitoreo Continuo del Crecimiento y Desarrollo de *Lactuca sativa* en Sistemas Hidropónicos. [153]

La figura 13 ilustra el seguimiento del desarrollo y crecimiento de *Lactuca sativa* en un sistema hidropónico dentro de un invernadero. Un técnico sostiene una planta de lechuga recién extraída, lo que posibilita la evaluación de las hojas y del sistema radicular, mientras que las otras plantas siguen creciendo en canales de cultivo con solución nutritiva en circulación.

#### V-D. *Cultivo de lactuca sativa (lechuga tipo iceberg)*

La lechuga tipo Iceberg (*Lactuca sativa* var. capitata), perteneciente a la familia Asteraceae [154], constituye una hortaliza de alto valor comercial ampliamente utilizada en la alimentación fresca por su textura crujiente, sabor suave y aporte nutricional [155]. En sistemas de producción protegida, desarrollar su cultivo biológico implica integrar sustratos orgánicos equilibrados [156], fertirrigación racional y control ambiental continuo [157], con el propósito de reducir la dependencia de insumos sintéticos y optimizar el equilibrio fisiológico del cultivo. [158].

Implementar en agricultura de ambiente controlado sistemas hidropónicos que permitan regular el desarrollo vegetativo y favorecer la formación adecuada de cabezas [159] [160]. Analizar la influencia de diferentes combinaciones de sustratos orgánicos y esquemas de nutrición sobre el crecimiento y rendimiento [161], reconociendo

que las propiedades físico-químicas del medio de cultivo inciden directamente en la expansión foliar [162], el desarrollo estructural y la productividad final. Mantener parámetros adecuados del sustrato para asegurar uniformidad y estabilidad en la producción.

Seleccionar mezclas que optimicen la aireación radicular y la retención de humedad [163], y ajustar el suministro nutricional conforme a las necesidades fisiológicas de la planta para mejorar la calidad comercial [164]. Integrar la elección del sustrato, la gestión eficiente de la fertirrigación y el monitoreo continuo de las variables ambientales como estrategia orientada a maximizar la eficiencia del sistema productivo. [165]

Consolidar el cultivo biológico de *Lactuca sativa* tipo Iceberg en ambiente controlado mediante la articulación equilibrada entre sustrato, nutrición y regulación ambiental [166], promoviendo la sostenibilidad, la homogeneidad del cultivo y la optimización de recursos en sistemas automatizados [167].



Figura 14. Producción y Manejo Técnico del Cultivo de Lechuga Tipo Iceberg. [168]

La figura 14 ilustra un día de evaluación técnica en una plantación de lechuga iceberg al aire libre. Se ve a un equipo de expertos examinando las plantas, evaluando su uniformidad, crecimiento y calidad en términos comerciales; uno de ellos sostiene una lechuga para revisarla.

A continuación se nos da a explicar que las lechugas tienen una variedad de características distintivas en comparación con los otros tipos de lechugas. Describir a *Lactuca sativa* tipo Iceberg como una especie herbácea anual de la familia Asteraceae, cultivada por la formación de una cabeza densa generada por la superposición compacta de sus hojas [169]. Diferenciarla de otras variedades por la estructura firme y cerrada del cogollo, rasgo que define su identidad comercial y su comportamiento fisiológico. [170]

Explicar su desarrollo inicial a partir de una roseta basal, donde las primeras hojas se disponen próximas al suelo y posteriormente incrementan en número y tamaño [171]. Señalar que el engrosamiento progresivo del conjunto foliar conduce a la conformación de una cabeza amplia y compacta en etapa comercial [172]. Indicar que, al alcanzar la madurez fisiológica o bajo condiciones ambientales desfavorables, promover el alargamiento del eje central y la transición hacia la fase reproductiva [173].

Caracterizar el sistema radical como poco profundo y de rápida expansión lateral, con predominio de raíces

superficiales que favorecen la absorción eficiente de agua y nutrientes en las capas superiores del suelo o sustrato [174]. Resaltar la presencia de látex en los tejidos y la sensibilidad del sistema radicular frente a variaciones hídricas, compactación o desequilibrios nutricionales. [175]

Describir las hojas como simples, sésiles y organizadas en disposición espiralada alrededor del tallo corto [176]. Precisar que las hojas inferiores pueden presentar un pecíolo breve y mayor expansión, mientras que las superiores tienden a compactarse formando la cabeza característica [177]. Señalar su textura crujiente, lámina amplia y nervadura central destacada, así como el elevado contenido de agua en sus tejidos [178], aspecto que influye tanto en su calidad comercial como en su susceptibilidad al estrés.

Definir el tallo como una estructura cilíndrica y comprimida durante la etapa vegetativa, funcionando como soporte de inserción foliar [179]. Indicar que este eje permanece oculto por la compactación de hojas hasta que se produce el fenómeno de espigado, momento en que se alarga y da origen a la inflorescencia, marcando el final del ciclo comercial [180]. Describir la estructura reproductiva como una inflorescencia en capítulos compuesta por numerosas flores pequeñas rodeadas de brácteas [181]. Explicar la presencia de estambres fusionados y la formación posterior de frutos secos tipo aquenio provistos de vilano, mecanismo que facilita su dispersión.

Relacionar estas características morfológicas con las prácticas agronómicas, reconociendo que la naturaleza superficial del sistema radicular [182], la tendencia a la compactación foliar y la sensibilidad al espigado determinan la necesidad de un manejo cuidadoso del riego [183], la nutrición y las condiciones ambientales para preservar la calidad y el rendimiento del cultivo.



Figura 15. Representación morfológica y estructuras reproductivas de *Lactuca sativa* var. *capitata* (Lechuga tipo Iceberg). [184]

La figura 15 muestra una ilustración botánica de *Lactuca sativa* var. *capitata* (lechuga tipo iceberg) con una descripción pormenorizada de sus estructuras reproductivas y rasgos morfológicos. Se aprecian las hojas basales con su nervadura y forma peculiares, el tallo floral que es alargado y las inflorescencias que surgen durante la fase de reproducción de la planta.

En este mismo sentido, la taxonomía constituye la disciplina que organiza y clasifica los organismos vegetales según sus características estructurales y su origen evolutivo [185]. A través de un sistema jerárquico, permite establecer categorías que facilitan la identificación y diferenciación de las especies [186]. Asimismo, contribuye a comprender las relaciones de parentesco entre los distintos grupos botánicos. De manera general, se considera una base esencial para el estudio científico y productivo de las plantas.

Tabla I  
TAXONOMÍA DE LA LECHUGA (*Lactuca sativa* tipo iceberg). [187]

<b>Reino:</b>	Plantae
<b>División:</b>	Magnoliophyta
<b>Clase:</b>	Magnoliopsida
<b>Orden:</b>	Asterales
<b>Familia:</b>	Asteraceae
<b>Subfamilia:</b>	Cichorioideae
<b>Tribu:</b>	Lactuceae
<b>Género:</b>	<i>Lactuca</i>
<b>Especie:</b>	<i>Lactuca sativa</i> L.
<b>Variedad:</b>	<i>Lactuca sativa</i> var. <i>capitata</i> (tipo Iceberg)

La lechuga tipo Iceberg corresponde a la especie *Lactuca sativa* L., organismo vegetal que se integra dentro del reino Plantae, grupo que comprende a los seres vivos eucariotas multicelulares capaces de sintetizar su propio alimento mediante el proceso de fotosíntesis [188]. Los miembros de este reino poseen células con pared celular compuesta principalmente de celulosa, plastidios especializados como los cloroplastos y ciclos de vida caracterizados por alternancia de generaciones.[189]

Se ubica en la división Magnoliophyta, también conocida como angiospermas, que agrupa a las plantas con flores y semillas protegidas dentro de un fruto. Esta división representa el grupo más diverso del reino vegetal y se caracteriza por la presencia de órganos reproductivos altamente especializados [190], como flores completas con estructuras masculinas y femeninas diferenciadas.

Dentro de esta división, la lechuga pertenece a la clase Magnoliopsida, correspondiente a las dicotiledóneas. Las especies incluidas en esta clase presentan dos cotiledones en la semilla, un sistema vascular organizado en haces dispuestos en anillo y hojas generalmente con nervadura reticulada [191]. Estas características anatómicas y fisiológicas determinan su patrón de crecimiento y desarrollo estructural.

La especie se clasifica en el orden Asterales, conjunto que agrupa plantas con flores compuestas y adaptaciones evolutivas que favorecen la polinización eficiente [192]. Este orden se distingue por presentar inflorescencias especializadas que simulan una sola flor, pero que en realidad están formadas por numerosas flores individuales agrupadas sobre un receptáculo común.

En el nivel de familia, la lechuga se integra en Asteraceae, una de las familias botánicas más extensas y

económicamente importantes. Esta familia se caracteriza por la presencia de inflorescencias tipo capítulo [193], donde múltiples flores pequeñas se disponen densamente formando una estructura compacta [194]. Además, produce frutos secos denominados aquenios, generalmente acompañados por un vilano que facilita su dispersión anemófila.

Dentro de esta familia, la lechuga pertenece a la subfamilia Cichorioideae [192], cuyos integrantes presentan con frecuencia látex en sus tejidos y flores liguladas. La presencia de látex constituye un rasgo distintivo que cumple funciones defensivas frente a herbívoros y patógenos. A nivel de tribu, se clasifica en Lactuceae, grupo que reúne especies herbáceas con savia lechosa, hábito predominantemente anual o bianual y frutos tipo aquenio provistos de vilano. Esta tribu comparte similitudes morfológicas relacionadas con la estructura floral y el sistema radical superficial. [195]

El género *Lactuca* comprende plantas herbáceas que desarrollan hojas generalmente dispuestas en roseta basal y que presentan un ciclo de vida corto [196]. Este género incluye tanto especies silvestres como domesticadas, siendo *Lactuca sativa* la forma cultivada más representativa y de mayor importancia hortícola.

Finalmente, la especie *Lactuca sativa* L. corresponde a la lechuga cultivada para consumo humano, ampliamente distribuida a nivel mundial y sometida a procesos de domesticación y mejoramiento genético [197]. Dentro de esta especie se reconoce la variedad botánica capitata, conocida comercialmente como lechuga tipo Iceberg, la cual se caracteriza por la formación de cabezas compactas, densas y esféricas, producto del crecimiento superpuesto de sus hojas internas [198]. Esta estructura constituye el órgano de interés comercial y define gran parte de su manejo agronómico y fisiológico.

En conjunto, la clasificación taxonómica de la lechuga tipo Iceberg no solo permite ubicarla sistemáticamente dentro del reino vegetal, sino también comprender las bases morfológicas [199], anatómicas y evolutivas que determinan sus características productivas y su comportamiento agronómico en sistemas de cultivo convencional o protegido [200].



Figura 16. Representación morfológicas de *Lactuca sativa*. [201]

La figura 16 ilustra cómo es morfológicamente una planta de *Lactuca sativa* en su fase vegetativa, resaltando la disposición de sus hojas, que forman una roseta basal. Se aprecian hojas anchas y superpuestas, con un contorno algo ondulado y una nervadura central claramente definida; rasgos que benefician la absorción de luz y el crecimiento de las hojas.

Resulta pertinente mencionar que, el ciclo de vida de la lechuga tipo Iceberg se distingue por su corta duración y por la presencia de etapas fenológicas bien definidas que evidencian cambios progresivos tanto en su morfología como en su fisiología [202]. Estas fases pueden describirse mediante la escala BBCH, la cual facilita la identificación precisa del desarrollo del cultivo desde la germinación hasta la cosecha [203]. En las variedades que forman cabeza, como la Iceberg, el proceso comprende la germinación, el desarrollo vegetativo y la formación del órgano de almacenamiento vegetativo, representado por la cabeza compacta que constituye el principal producto comercial [204].

El ciclo inicia con la germinación, etapa en la que la semilla absorbe agua, activa su metabolismo y moviliza sus reservas internas [205]. Este proceso desencadena la emergencia de la radícula y posteriormente del hipocótilo y los cotiledones, estableciendo el sistema radical inicial. Dicho sistema se caracteriza por ser superficial y de rápido crecimiento [206], lo cual determina la necesidad de mantener condiciones adecuadas de humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes en el medio de cultivo.

Posteriormente, la planta entra en la fase de desarrollo vegetativo [207], en la cual se produce la emisión continua de hojas verdaderas organizadas en roseta basal. Durante esta etapa se consolida el aparato fotosintético, incrementándose progresivamente la superficie foliar y la capacidad de captación de radiación [208]. A través de la fotosíntesis, las hojas externas transforman la energía lumínica en compuestos orgánicos, principalmente carbohidratos, que serán utilizados para la expansión celular [209], la diferenciación de tejidos y la acumulación de biomasa. La eficiencia de este proceso depende de factores ambientales como la intensidad de luz, la temperatura, la disponibilidad de agua y el suministro equilibrado de nutrientes, especialmente nitrógeno.

Al alcanzar un determinado umbral fisiológico y estructural, la planta transita hacia la fase de formación de cabeza. En esta etapa, las hojas internas comienzan a superponerse y a compactarse gradualmente, reduciendo la expansión visible hacia el exterior [210]. El crecimiento se orienta hacia el interior, donde se acumulan los productos fotosintéticos generados previamente [211]. La concentración de agua y carbohidratos en estos tejidos internos confiere a la cabeza su textura firme y crujiente característica [212]. Mientras tanto, las hojas externas continúan desempeñando un papel fundamental en la captación de energía y la síntesis de asimilados.

Durante la fase de compactación, el equilibrio entre la fotosíntesis y la respiración celular influye directamente en la calidad y el peso final de la cabeza [213]. Condiciones ambientales favorables promueven una formación uniforme y adecuada densidad, mientras que situaciones de estrés, como temperaturas elevadas o déficit hídrico, pueden afectar el proceso e incluso inducir el espigamiento prematuro. [214]

Finalmente, la madurez comercial se alcanza cuando la cabeza presenta firmeza, tamaño y densidad apropiados para la cosecha [215]. En este punto, el crecimiento externo es mínimo y la planta ha dirigido la mayor parte de su energía al órgano de almacenamiento [216]. Si la recolección se retrasa, puede iniciarse la fase reproductiva, manifestada por el alargamiento del tallo y la emisión de la inflorescencia.

En términos generales, el ciclo fenológico de la lechuga tipo Iceberg integra procesos coordinados de germinación,

crecimiento vegetativo, síntesis de biomasa y compactación foliar [217]. La acumulación de productos fotosintéticos durante la etapa vegetativa constituye la base fisiológica que permite la formación de la cabeza [218], siendo fundamental comprender estas transiciones para optimizar el manejo agronómico y el control ambiental en sistemas de producción protegidos o automatizados.

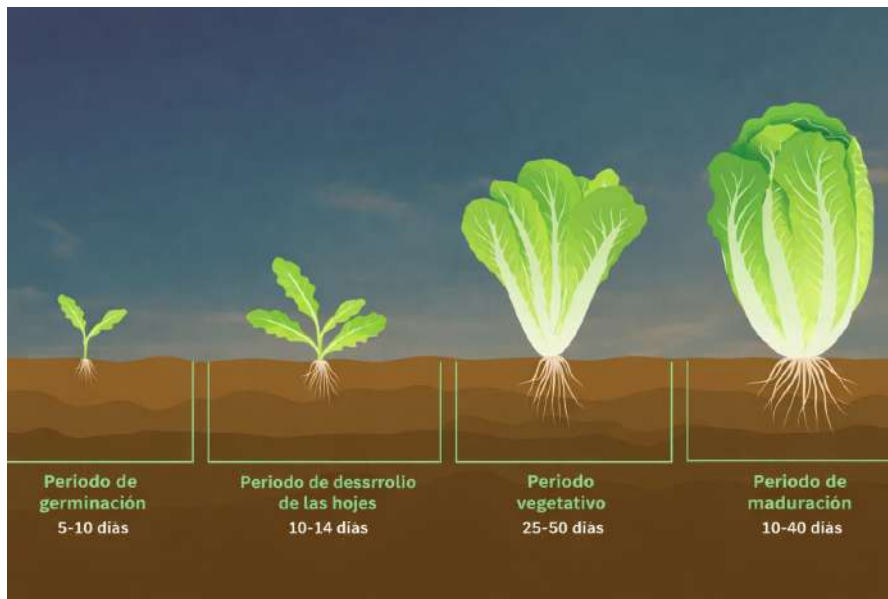


Figura 17. Tiempo de crecimiento de la lactuca sativa. [219]

La figura 17 muestra las etapas de crecimiento de la lechuga (*Lactuca sativa*), desde la germinación hasta la maduración. El proceso inicia con la germinación (5–10 días), continúa con el desarrollo de hojas y crecimiento vegetativo, y finaliza con la etapa de maduración, cuando la planta está lista para la cosecha. Representa de forma clara el ciclo completo del cultivo.

En complemento a lo anterior, el crecimiento y la productividad de la lechuga tipo Iceberg responden a una combinación de factores internos y externos que actúan de manera integrada dentro del sistema de producción. Comprender estos elementos permite optimizar el manejo agronómico [220], mejorar el rendimiento por unidad de superficie y garantizar la estabilidad del cultivo en diferentes contextos productivos.

El desarrollo y rendimiento de la lechuga tipo Iceberg (*Lactuca sativa* var. *capitata*) están determinados por la interacción entre componentes genéticos [221], ambientales y tecnológicos. Frente a los efectos del cambio climático y la reducción progresiva de superficies agrícolas disponibles, los sistemas de producción en ambientes controlados se han consolidado como una alternativa eficiente para mantener estabilidad productiva y aumentar el rendimiento por unidad de área. [222]

El genotipo o cultivar representa uno de los elementos más influyentes. Las variedades Iceberg se distinguen por su elevada producción de biomasa y por la formación de una cabeza compacta y densa [223], lo que generalmente se traduce en mayores rendimientos en comparación con otros tipos de lechuga. No obstante, esta característica

implica un ciclo ligeramente más prolongado, ya que la acumulación estructural necesaria para la compactación requiere mayor tiempo fisiológico.

El periodo de cultivo y las condiciones estacionales también inciden de manera significativa en el comportamiento del cultivo. En sistemas tradicionales a campo abierto, la duración del ciclo varía en función de la temperatura y la radiación solar disponible[224]. En contraste, los sistemas protegidos permiten acortar el tiempo hasta la cosecha mediante el control de variables como temperatura, humedad y luminosidad. A pesar de ello, la lechuga Iceberg continúa siendo sensible a variaciones térmicas extremas, ya que el calor excesivo puede inducir espigamiento prematuro y el frío intenso ralentiza la actividad fotosintética y el crecimiento vegetativo. [225]

El manejo del agua y la nutrición constituye otro factor determinante. Los sistemas hidropónicos son ampliamente utilizados, aunque alternativas como la acuaponía han demostrado ventajas productivas al integrar fuentes orgánicas de nutrientes[226].

Métodos de riego como el cultivo en aguas profundas o el flujo y reflujo favorecen un contacto continuo entre raíces y solución nutritiva, optimizando la absorción mineral [227]. La formulación de nutrientes debe ajustarse según la etapa fenológica para asegurar equilibrio fisiológico y adecuada formación de cabeza.

En relación con la iluminación, esta variable adquiere especial relevancia en entornos protegidos. La luz natural puede ser suficiente en regiones con alta radiación solar; sin embargo, el empleo de tecnología de diodos emisores de luz permite regular espectro, intensidad y duración del fotoperíodo [228]. Combinaciones de luz roja y azul estimulan la fotosíntesis y la producción de biomasa, mientras que la luz blanca contribuye a un desarrollo morfológico equilibrado. La uniformidad lumínica y la correcta duración del periodo de exposición inciden directamente en la expansión foliar y la compactación de la cabeza.

La infraestructura productiva también desempeña un papel clave. Los invernaderos con buena captación solar ofrecen altos rendimientos con menor demanda energética que instalaciones totalmente cerradas[229]. Asimismo, los sistemas de cultivo vertical permiten multiplicar la producción por superficie al aprovechar el espacio en altura [230], aunque requieren mayores inversiones en iluminación y climatización.

Otros elementos como la densidad de plantación, la recirculación de soluciones nutritivas, la eficiencia hídrica y el control del microclima influyen directamente en la productividad [231]. El manejo adecuado de la concentración de dióxido de carbono puede incrementar la actividad fotosintética, mientras que una ventilación apropiada contribuye a prevenir enfermedades y a mantener estabilidad fisiológica.

Por último, es imprescindible considerar el balance ambiental y energético. Aunque los sistemas protegidos pueden superar ampliamente los rendimientos del cultivo a campo abierto [232], su sostenibilidad depende de la eficiencia en el uso de recursos y del acceso a fuentes de energía más limpias.

En síntesis, la productividad de la lechuga tipo Iceberg resulta de la integración coordinada entre genética, nutrición, iluminación, riego y regulación ambiental. La optimización conjunta de estos factores permite alcanzar

mayores rendimientos [233], reducir el tiempo de producción y garantizar uniformidad y calidad comercial en sistemas de cultivo protegidos y automatizados.



Figura 18. Evaluación de la productividad y calidad de la lechuga tipo Iceberg en condiciones de campo. [234]

La figura 18 muestra la evaluación en campo de la lechuga tipo Iceberg, donde se observa una cabeza recién cosechada con el cultivo organizado en hileras al fondo. Este proceso permite analizar características como tamaño, firmeza y calidad general, con el fin de determinar la productividad antes de su comercialización.

## VI. MARCO METODOLÓGICO

En la Figura 19 se detalla la arquitectura integral del prototipo diseñado. En este estudio se realiza la propuesta de la implementación de un sistema de control de orientación e intensidad lumínica para una incubadora de Lactuca sativa que potencie su crecimiento, este prototipo utiliza sistemas de control, eléctrico e hidráulico para su correcto funcionamiento.

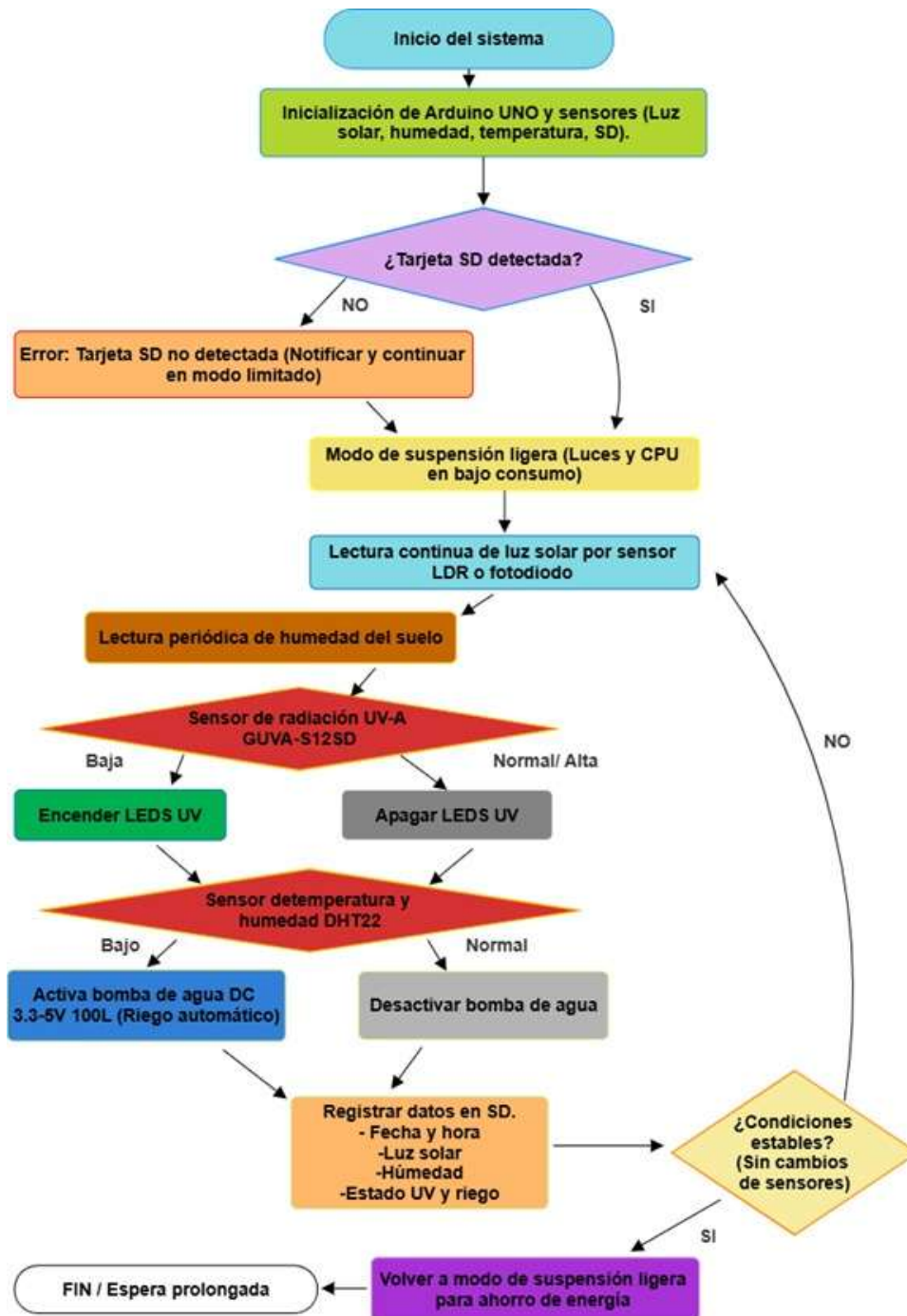


Figura 19. Diagrama de flujo del funcionamiento general de la incubadora. Fuente: Los Autores.

El prototipo consta de un Arduino y sus respectivos sensores para el monitoreo de aire, humedad del suelo y radiación UV, los cuales recolectan y almacenan datos que permiten regular el riego y ajustar la intensidad lumínica de la incubadora de forma continua y eficiente.

#### VI-A. Sistema de control

Este subsistema compone el funcionamiento operativo del núcleo de la incubadora, principalmente garantizando el monitoreo cíclico de las variables ambientales y asegurando que estas se mantengan dentro del rango óptimo establecido mediante el procesamiento y almacenamiento de los datos obtenidos de los sensores para el desarrollo de la Lactuca sativa.

*VI-A1. Arduino UNO:* Este microcontrolador es el cerebro central de los subsistemas de control, riego y eléctrico del prototipo, cuya principal función radica en controlar, monitorear y gestionar la información detectada de los sensores DHT22 (temperatura y humedad), FC-28 (humedad del suelo) y ML8511 (radiación ambiental), ejecutando los algoritmos programados para cada variable ambiental esencial dentro de ciertos márgenes operativos, generando las señales para el accionamiento correspondiente de los actuadores, garantizando un ambiente controlado para el crecimiento de la Lactuca sativa [235].

En el sistema de control, es la conexión entre el sistema digital y el ambiente físico transformando los variables reales como la humedad, temperatura, radiación UV en datos digitales para que estos puedan ser procesados creando una retroalimentación, estos se ejecutan al Arduino de forma continua con lecturas en tiempo real, que son almacenadas cada cinco minutos, mientras que los sensores operan con sus propios intervalos de tiempo.

En el sistema de riego, el Arduino activa y da marcha a la bomba de agua, asegurando condiciones apropiadas para que las raíces de la planta se desarrollen. Por otro lado, en la iluminación, controla el tiempo de encendido, apagado y exposición de las lámparas UV-A, lo que previene la sobreexposición de radiación y garantiza un suministro controlado de energía luminosa, es esencial para promover el crecimiento de las plantas sin causar efectos negativos.

*VI-A2. DHT22:* Es un sensor digital encargado de medir la temperatura y la humedad en el ambiente. Dentro del subsistema de control, este sensor cumple con la función de leer y monitorear en tiempo real las variables de humedad relativa del aire (%) y la temperatura ambiental (C°) del interior de la incubadora, y que estas operen en óptimas condiciones, estas a su vez son mostradas en la pantalla LED. Estos datos son importantes porque influyen directamente en el desarrollo de la lechuga, una regulación adecuada previene la deshidratación y el marchitamiento [236].

El DHT22 está conectado al pin digital 7 del sistema que se implementó, lo cual está especificado en el código con una instrucción, la obtención de los datos ambientales se lleva a cabo a través de las funciones que ofrece la librería DHT, que posibilitan conseguir mediciones fiables de temperatura y humedad periódicamente. La literatura constituye que los rangos óptimos de humedad del aire de la lechuga son entre 40 % y 80 % de humedad, en este

prototipo se definió el valor mínimo de 40 % como nivel crítico de sequedad, deshidratación y el estrés hídrico, así mismo también se definió el valor de 85 % como valor máximo para evitar la creación de hongos y saturación ambiental.

La variable de la temperatura controla el ritmo de crecimiento, el factor de evaporación del agua, y la capacidad fotosintética de la lechuga, la cual debe no debe de propar una temperatura máxima de 30°C. Debido a que el papel de la temperatura y la humedad de la incubadora es esencial, por lo cual se definió en la temperatura máxima en 29°C y su temperatura mínima de 14°C. El sistema también incluye medidad de seguridad para la detección de errores del sensor DHT22 implemetados en su código, que se encargan de verificar la validez de las lecturas adquiridas en tiempo real con la función isnan(). Si se encuentran valores inválidos, el sistema avisa al usuario mediante la interfaz LCD por medio de un mensaje "Sensor aire falla".

Además, los datos entregados por el DHT22 se incorporan al sistema de almacenamiento en tarjeta SD, donde se almacenan cíclicamente junto con las otras variables del sistema. Este registro posibilita el análisis del microclima en el periodo de simulación de la incubadora, la evaluación de la correlación entre temperatura, humedad y crecimiento vegetal, así como la mejora de los parámetros del sistema para lograr una operación más continua y eficaz.

VI-A3. *ML8511*: Es un sensor analógico diseñado para detectar luz (UV) que da una señal de voltaje analógica que varía según la intensidad de radiación que percibe. En este prototipo, actúa como un medio para observar y regular el nivel de radiación (UV) en la incubadora y su compensación lumínica, registrando y midiendo en tiempo real la cantidad de radiación que hay presente en ambiente. Esto asegura las condiciones ideales para el desarrollo de la lechuga [237].

Este sensor funciona como el componente de retroalimentación, convierte la radiación ultravioleta (variable física) en una señal eléctrica analógica, esta señal es receptada por el por el convertidor analógico-digital del Arduino, es la variable de entrada que controla la intensidad luminosa y posibilita que se ajuste la potencia de las lámparas UV-A. El sensor está conectado al pin analógico del sistema que se implementó, lo cual está especificado en el código con la instrucción. Para la lectura del sensor se desarrolló una función personalizada con la finalidad de garantizar una medición más estable y sin saltos a causa del ruido eléctrico: `averageAnalogRead`. También se implementó un algoritmo de sobre-muestreo que realiza seis lecturas seguidas, estas se suman y dan un promedio, la cual se registra en la tarjeta SD.

Para garantizar que la planta sometida a la cámara UV sobreviva sin sufrir daños biológicos, es necesario aplicar una intensidad determinada durante periodos segmentados de tiempo continuo. En este contexto, el índice UV se puede calcular de forma aproximada utilizando la siguiente fórmula:

$$UVI = E_{UV} \times 40 \quad (3)$$

Donde:

UVI = Índice UV, el cual es una medida sin unidades que indica el riesgo de daño biológico de tejidos orgánicos.

$E_{UV}$  = Es la irradiancia solar en el rango UV que se mide en  $W/m^2$  (vatios por metro cuadrado), normalmente obtenida al realizar pruebas con un instrumento de medición de radiación UV, como un radiómetro.

La constante (40) proviene de un valor establecido por calibraciones internacionales realizadas desde los años 90. El producto de este valor junto con la irradiancia efectiva determina la intensidad del índice de luz UV.

Para asegurar un desarrollo fisiológico óptimo, según la literatura se determinó que las lechugas en condiciones ambientales promedio requieren una dosis de radiación UV de entre 3 a 5  $kJ/m^2$  por día. Este rango proporciona el estímulo lumínico necesario para potenciar el crecimiento sin incurrir en estrés oxidativo o daños en el tejido vegetal. Para propósitos de control y monitoreo en tiempo real dentro de la incubadora, es necesario expresar esta energía en términos de potencia por unidad de área [238]. Al realizar la conversión a Joules por segundo ( $J/s$ ), se obtiene la relación para la irradiancia necesaria mediante la siguiente fórmula:

$$E = \frac{D}{t}$$

$$UVI = E_{UV} \times 40 \quad (4)$$

Si a esta fórmula se multiplica por la fórmula de índice UV con respecto al tiempo, se obtiene:

$$t = \frac{Dosis_{meta}}{E_{uv} \times 1000} \text{ segundos} \quad (5)$$

Donde:

$t$  = es el tiempo de exposición en segundos.

$Dosis_{meta}$  = es la dosis diaria objetivo en  $kJ/m^2$ .

$E_{UV}$  = es la irradiancia UV medida en  $W/m^2$ .

Considerando los requerimientos fotobiológicos de la *Lactuca sativa* y las ecuaciones de dosificación previamente descritas, se desarrolló un algoritmo en el entorno MATLAB con el objetivo de automatizar el cálculo de la exposición radiante bajo parámetros normalizados. Al ejecutar el programa, el sistema solicita al usuario el ingreso de la irradiancia UV ( $W/m^2$ ) detectada por los sensores. A partir de este dato, el código procesa las fórmulas de conversión para determinar la dosis acumulada y clasifica el índice UV en categorías de intensidad (bajo, moderado, alto o muy alto). Finalmente, el software genera una gráfica comparativa que relaciona la tolerancia específica de la lechuga frente al índice de radiación solar en función del tiempo. Esta herramienta permite visualizar si la intensidad lumínica se mantiene dentro del rango óptimo de 3 a 5  $kJ/m^2$  o si es necesario activar los sistemas de control de orientación para mitigar un exceso de radiación.

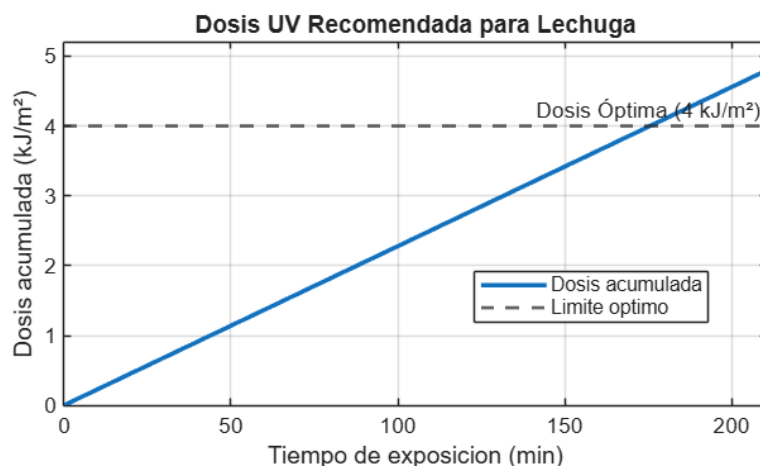


Figura 20. Gráfica de simulación de dosis diaria promedio. Fuente: Los Autores.

La figura 20 presenta la evolución de la dosis acumulada de radiación ultravioleta recibida por el cultivo de lechuga en función del tiempo de exposición, obtenida mediante la simulación basada en datos reales registrados por el sistema. Para este análisis se ingresó un valor de irradiancia UV de  $0.38 \text{ W/m}^2$  que fue promediado por las lecturas recibidas en los datos recolectados, correspondiente a una medición directa del sensor UV instalado en la incubadora automatizada y almacenada previamente en la memoria SD del sistema de monitoreo.

En el eje horizontal (x) se representa el tiempo de exposición en minutos, mientras que el eje vertical (y) muestra la dosis acumulada expresada en  $\text{kJ/m}^2$ , que corresponde a la energía ultravioleta total recibida por unidad de superficie foliar. La línea azul ascendente representa la acumulación progresiva de radiación UV. Su comportamiento lineal indica que la irradiancia se mantiene constante durante el periodo analizado, condición coherente con un sistema de iluminación controlada. La pendiente moderada de la recta refleja que la irradiancia efectiva que recibe el cultivo es moderada, lo cual coincide con la clasificación agrícola del sistema (nivel óptimo). Este rango de radiación favorece procesos de bioestimulación vegetal y la producción de compuestos antioxidantes, sin generar estrés fisiológico significativo en el tejido foliar.

La línea horizontal discontinua señala la dosis objetivo recomendada para el cultivo de lechuga ( $4 \text{ kJ/m}^2$ ), utilizada como umbral de referencia para asegurar un desarrollo vegetal óptimo. A partir de la irradiancia medida, el modelo calcula un tiempo de exposición recomendado de aproximadamente 175 minutos para alcanzar dicha dosis. El intervalo simulado se extiende hasta cerca de 220 minutos para visualizar el comportamiento del sistema más allá del tiempo óptimo. Se observa que alrededor de las tres horas de operación (180 minutos) la dosis acumulada se aproxima a  $3.8 \text{ kJ/m}^2$ , valor ligeramente inferior al umbral ideal. Esto confirma que el sistema trabaja bajo una estrategia de dosificación gradual y controlada, priorizando la seguridad fisiológica del cultivo.

El uso de una irradiancia moderada con tiempos de exposición prolongados evita picos energéticos que podrían provocar fotoinhibición, daño celular o estrés oxidativo. Además, la ligera diferencia respecto a la dosis óptima puede atribuirse a factores físicos como la distancia entre la fuente UV y el follaje, el ángulo de incidencia de la radiación, pérdidas por dispersión o absorción parcial dentro de la estructura de la incubadora. En conjunto, los resultados

demuestran que el sistema automatizado proporciona una exposición UV estable, controlada y fisiológicamente segura, validando su funcionamiento mediante datos reales obtenidos por sensado directo y respaldando su eficacia para el cultivo protegido de *Lactuca sativa*.

*VI-A4. Pantalla LCD:* Dentro del subsistema de control de la incubadora automatizada para el cultivo de *Lactuca sativa*, la pantalla LCD es un componente esencial en la interfaz hombre-máquina (HMI). Su principal función consiste en mostrar el estado operativo del sistema en tiempo real, lo que posibilita la supervisión local de las variables críticas como la humedad, temperatura, radiación UV, bomba de agua, fallos en el sistema; sin requerir equipos externos para monitorear [239].

La pantalla LCD de 16x2 caracteres con interfaz I<sup>2</sup>C en el sistema desarrollado es controlada a través de la biblioteca `hd44780_I2Cexp` así facilitando la optimización del hardware y también disminuye la cantidad de pines usados en el Arduino. Este método de comunicación es compatible con sistemas embebidos que tienen alta integración y bajo consumo. El microcontrolador, a través de una variable que implementa un sistema de rotación de pantallas temporizado, se encarga de actualizar la información que se muestra en la LCD mientras el programa está en funcionamiento.

Este método permite presentar múltiples variables sin que el lazo de control principal se vea afectado y evita bloqueos del sistema, jugando un rol fundamental en el subsistema de control al ofrecer una interfaz para supervisar en tiempo real las condiciones de fallo del sistema, los estados de los actuadores y las variables ambientales. La implementación de este enfoque mecatrónico del sistema propuesto mejora la robustez operativa, simplifica la interacción entre el usuario y el sistema, y ayuda a validar experimentalmente el control automatizado.

*VI-A5. Módulo Lector de Tarjeta SD:* La tarjeta SD es un elemento crucial del subsistema control de datos de la incubadora automatizada para cultivar *Lactuca sativa*, porque posibilita que los datos producidos por el sistema embebido durante su funcionamiento ininterrumpido se almacenen en forma estructurada y persistente. Su incorporación convierte el sistema de control en una plataforma que no solo puede supervisar y actuar, sino también registrar, analizar y validar su rendimiento a lo largo del tiempo; garantizando que, incluso en caso de reboots del sistema, cortes de energía o paradas imprevistas, la información relevante del proceso se mantenga [240].

El protocolo SPI, que se define en el código a través del pin de selección, es el medio de comunicación entre la tarjeta SD y el Arduino. Posibilita una comunicación confiable y veloz para el almacenamiento periódico de datos, sin que la ejecución del algoritmo de control principal se vea afectada. En la etapa de inicialización (`setup()`), el sistema se encarga de confirmar que la tarjeta SD esté conectada correctamente, para asegurar que el proceso de adquisición de datos sea íntegro antes de comenzar con el funcionamiento normal.

El sistema implementa un registro cíclico de datos, controlado por la constante. Cada intervalo, se almacenan en la tarjeta SD las variables más relevantes del sistema, incluyendo: tiempo de operación, voltaje e intensidad de radiación UV, humedad del suelo, humedad ambiental, bomba hidráulica. Este registro se realiza mediante la función de guardado de datos, la cual organiza la información, facilitando su análisis posterior en software de procesamiento

de datos como MATLAB o Excel.

## VI-B. Sistema de riego

Para el cultivo sostenible de *Lactuca sativa*, el subsistema de riego es un componente esencial del prototipo, ya que asegura la conservación apropiada de la humedad del sustrato, una variable importante para el crecimiento fisiológico de la planta, a partir de la información suministrada por el sensor de humedad del suelo, este subsistema funciona automáticamente, tomando decisiones en tiempo real. Disminuyendo el derroche de agua, garantizando un suministro de agua eficaz y optimizando la estabilidad del proceso de producción.

*VI-B1. FC28:* El sensor de humedad del suelo FC28 es el componente principal del subsistema de riego, pues posibilita medir indirectamente la cantidad de agua que contiene el sustrato donde se cultiva *Lactuca sativa*. Su rol es esencial en el prototipo, ya que suministra la variable de proceso requerida para tomar decisiones automatizadas vinculadas a la puesta en marcha de la bomba de riego [241].

Funciona como la interfaz sensorial entre el ámbito físico (humedad del sustrato) y el ámbito electrónico (Arduino). El sensor proporciona una señal analógica que es proporcional a la conductividad del suelo; esta señal llega al microcontrolador por medio de una entrada analógica. Esta señal es procesada después usando métodos de filtrado por promedio y escalamiento, con el objetivo de normalizar el valor bruto del sensor a un rango porcentual de humedad del suelo que va del 0 % al 100 %.

Los rangos definidos dentro del código están entre la humedad mínima es de 30 % y la humedad máxima es de 70 %. Estos rangos posibilitan que se implemente una estrategia sólida, por la cual el sistema enciende la bomba de riego si la humedad del sustrato baja por debajo del mínimo establecido. Este método ayuda a prevenir el exceso de riego y el estrés hídrico de la planta, optimizando así la eficiencia en el aprovechamiento del agua y promoviendo que el proceso de cultivo sea estable. Además, el algoritmo incluye la identificación de fallos del sensor, detectando lecturas que se encuentran fuera de los rangos válidos. En esas circunstancias, el sistema pone en marcha la bomba como una medida de seguridad, asegurando así que el riego continúe y que la fiabilidad operativa del subsistema crezca. Este rasgo fortalece la independencia y la tolerancia a errores del sistema de control.

La integración del sensor FC28, en general, hace posible que el lazo de control del subsistema de riego se cierre. Esto contribuye a la automatización del proceso al proporcionar información en tiempo real, disminuye la intervención humana y garantiza condiciones apropiadas de humedad del suelo para un desarrollo sostenible del cultivo.

*VI-B2. Bomba de agua:* Dentro del sistema de riego de la incubadora automatizada, el componente que ejecuta las directrices del algoritmo de control, que se originan a partir de la información del sensor de humedad del suelo FC28, en una acción física específica, la cual es proporcionar agua al sustrato de cultivo de manera controlada. La bomba de agua conecta el dominio hidráulico con el eléctrico, posibilitando que las señales digitales de control que vienen del microcontrolador se conviertan en un flujo de agua regulado [242].

En el sistema implementado, la bomba es activada mediante una salida digital del Arduino, donde encendido ocurre cuando la humedad del suelo baja por debajo del rango mínimo fijado, está definida por el Pin 9 del Arduino. Para asegurar un caudal apropiado y constante, es esencial elegir la bomba de agua de manera correcta, previniendo tanto el déficit de agua como el riego excesivo. Una provisión controlada de agua ayuda a que la planta desarrolle sus raíces, absorba nutrientes de manera eficaz y mantenga estables las condiciones del sustrato; estos elementos son cruciales para que la lechuga tipo iceberg crezca adecuadamente.

El subsistema de riego posibilita una operación autónoma y eficaz, lo que elimina la necesidad de intervención manual. Además, su comportamiento se almacena en la tarjeta SD junto con las otras variables del sistema, lo que simplifica el análisis de la actuación del riego y la mejora del algoritmo de control.

*VI-B3. Módulo 4 Relés:* El módulo de cuatro relés desempeña un papel fundamental en el sistema automatizado de riego, porque funciona como componente de potencia e interfaz aislante entre el sistema electrónico de control de baja potencia y los actuadores que trabajan con niveles más altos de voltaje y corriente, por ejemplo, la bomba para el agua. Su incorporación asegura que el sistema funcione de manera confiable, segura y escalable [243].

Su implementación en el subsistema de riego hace que sea confiable y coherente con el algoritmo programado en el microcontrolador es posible por el módulo de relés. La activación del relé se lleva a cabo en el código a través de la salida digital vinculada al pin que controla la bomba, como respuesta directa a las mediciones de humedad del suelo hechas por el sensor FC28. Por lo tanto, el relé funciona como el componente decisivo de conmutación en el circuito de control del subsistema de riego.

#### *VI-C. Sistema eléctrico*

El subsistema eléctrico es la infraestructura energética clave del prototipo. Fue diseñado con el objetivo de asegurar que todos los elementos del sistema embebido reciban, regulen y distribuyan energía eléctrica de manera constante, dado que el proyecto incorpora dispositivos con diferentes requerimientos de corriente y niveles de sensibilidad, desde los actuadores de potencia hasta el microcontrolador.

*VI-C1. LM2596:* El módulo reductor de voltaje LM2596 es un elemento esencial en el subsistema eléctrico del sistema propuesto. Esto se debe a que su función es asegurar una alimentación estable, segura y eficaz para que el sistema de control embebido y los dispositivos electrónicos vinculados operen adecuadamente [244].

Posibilita disminuir un voltaje de entrada superior a uno apropiado para proveer energía al microcontrolador Arduino, sensores y módulos periféricos. Este módulo garantiza el suministro de 3.3 V constantes en el sistema creado directamente al Arduino, sin importar los cambios en la fuente principal; esto resulta crucial para que sensores delicados como el MI8511 (radiación UV), el DHT22 (temperatura y humedad) y la pantalla LCD con interfaz PC funcionen de manera fiable. Su elevada eficiencia energética, que tiene la capacidad de sobrepasar el 80 % al 90 %, lo cual disminuye considerablemente las pérdidas energéticas como calor, así el prototipo tiene la capacidad de funcionar durante lapsos extendidos.

*VI-C2. Luces LED UV para cultivos:* Este componente está diseñado para proveer la energía luminosa necesaria para el proceso fotosintético de *Lactuca sativa* en la incubadora automatizada. Desde una perspectiva de ingeniería, su naturaleza es la de un actuador eléctrico que se incluye en el circuito de potencia del prototipo, a pesar de que su operación está controlada y temporizada por el microcontrolador.

Las tiras LED de crecimiento que se utilizan son de espectro completo y funcionan con alimentación a bajo voltaje, lo cual posibilita simular condiciones controladas de iluminación parecidas a la luz del sol. Estas ofrecen longitudes de onda en intervalos apropiados para activar los procesos fisiológicos de la planta, lo cual promueve el crecimiento vegetativo y la actividad fotosintética. Para sistemas de cultivo en espacios cerrados, su tecnología brinda una larga vida útil, escasa producción de calor y gran eficiencia energética [245].

Las tiras LED son una carga activa en el sistema energético; para asegurar un funcionamiento seguro y continuo, requieren de un suministro estable y regulado. Su incorporación se lleva a cabo a través del módulo de relés, que funciona como una interfaz para conmutar entre el circuito de control de baja potencia (Arduino) y el circuito de potencia en el que funcionan las lámparas. Esta separación galvánica resguarda al microcontrolador de picos de corriente, interferencias producidas durante la conmutación o transitorios eléctricos potenciales. El Arduino, de acuerdo con los parámetros fotobiológicos previamente definidos, controla los momentos de encendido y apagado, lo que posibilita regular el tiempo de exposición a la luz y mejorar el consumo energético. No obstante, la distribución de potencia, la estabilidad del voltaje y la protección eléctrica corresponden directamente al subsistema eléctrico.

*VI-C3. La fuente de alimentación de 3.3V:* La fuente de alimentación de 3.3 V es el componente esencial del sistema eléctrico del prototipo, ya que suministra la energía requerida para la incubadora y para que los dispositivos electrónicos conectados operen de manera confiable y estable. Se emplea como referencia del nivel de tensión para la alimentación de los sensores, así como del microcontrolador Arduino. Esto incluye el sensor de humedad del suelo FC28, el DHT22, el MI8511, la pantalla LCD y el módulo de almacenamiento por medio de tarjeta SD. Este nivel de tensión asegura que los dispositivos sean compatibles eléctricamente, lo cual previene sobrealimentaciones que podrían poner en riesgo la integridad de estos o provocar lecturas incorrectas [246].

También mejora la estabilidad de las señales de control y comunicación, sobre todo en ambientes con actuadores eléctricos como relés o bombas de agua; disminuyendo los errores en la conversión analógica a digital y reduce el surgimiento de ruidos eléctricos. Garantiza que el sistema arranque correctamente y funcione de manera continua, es esencial contar con una fuente estable de 3.3 V. Una tensión bien regulada previene que el microcontrolador se reinicie de forma imprevista, que haya fallos al escribir en la tarjeta SD y que se produzcan errores de comunicación con la pantalla LCD.

*VI-C4. Protobard y Jumpers:* Forman parte de la red de distribución eléctrica, desempeñan una función fundamental en la puesta en marcha, integración y validación del modelo electrónico y mecánico de la incubadora automatizada. Este conjunto posibilita la conexión eléctrica y física de los otros subsistemas, lo que asegura que la energía y las señales se distribuyan adecuadamente en el sistema.

Funciona como una plataforma modular para la distribución de voltaje, lo que hace posible alimentar de manera

común los sensores, el microcontrolador Arduino y los módulos con la fuente regulada de 3.3 V. Este arreglo posibilita conservar una referencia de tierra compartida (GND), lo cual es esencial para que las mediciones analógicas y digitales sean estables, en particular en sensores como el DHT22, el FC28 y el MI8511, cuya información es gestionado por el microcontrolador.

*VI-C5. Módulo 4 Relés:* En términos eléctricos, ofrece aislamiento galvánico entre el sistema de control y las cargas de potencia. Esto disminuye la probabilidad de que ocurran daños por transitorios eléctricos, por picos de corriente o por interferencias producidas por actuadores inductivos. En un entorno de la incubadora, donde la humedad, el ruido eléctrico y las fluctuaciones de carga pueden impactar el funcionamiento del sistema embebido, este aislamiento es crucial para asegurar la estabilidad del sistema.

Contribuye a la seguridad en las operaciones del sistema. Si los sensores o el Arduino fallan, existe la posibilidad de ajustar el sistema para que se adopten estados seguros, al posibilitar una integración eficaz entre el sistema de control y los actuadores de potencia, asegurando la escalabilidad, la seguridad, la fiabilidad y el aislamiento.

#### *VI-D. Diseño mecánico*

El diseño estructural del prototipo se concibió como una solución compacta, resistente y funcional, orientada a la automatización del cultivo en espacios reducidos. La incubadora actúa como una cámara de cultivo controlada que aísla el sistema de las variaciones del entorno externo, permitiendo mantener condiciones internas estables y favorables para el desarrollo vegetal.

Desde el punto de vista ingenieril, la configuración estructural fue diseñada para garantizar rigidez, estabilidad y durabilidad, soportando de manera segura el peso del sustrato húmedo, las macetas, el sistema de riego y los componentes electrónicos integrados. Asimismo, se priorizó una distribución equilibrada de cargas con el fin de minimizar deformaciones y prevenir concentraciones de esfuerzos que puedan comprometer la integridad del conjunto.

El diseño mecánico del prototipo fue concebido como un elemento fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de cultivo automatizado. La estructura no solo cumple una función de soporte físico, sino que también contribuye a la protección de los componentes electrónicos, al mantenimiento de las condiciones ambientales internas y a la estabilidad operativa del sistema en su conjunto. En este contexto, el diseño estructural se orientó a satisfacer los siguientes objetivos:

En primer lugar, proporcionar un soporte rígido y seguro para todos los elementos del sistema. La estructura debe sostener de manera estable la rejilla portamacetas, el sistema de riego, la iluminación UV y los dispositivos electrónicos, evitando deformaciones o desplazamientos que puedan comprometer el funcionamiento del prototipo. La rigidez estructural asegura que las cargas estáticas y dinámicas se distribuyan uniformemente, garantizando estabilidad durante la operación. Asimismo, se buscó proteger los componentes electrónicos y el sistema de iluminación frente a factores externos como la humedad, salpicaduras de agua, polvo y posibles impactos accidentales. La carcasa estructural actúa como una barrera física que resguarda los sensores, el sistema de control y las conexiones

eléctricas, contribuyendo a la seguridad eléctrica y al correcto desempeño del sistema.

Otro objetivo esencial fue mantener un microambiente controlado para el cultivo. La estructura funciona como una cámara cerrada que permite regular la incidencia de radiación UV, conservar niveles adecuados de humedad y reducir la influencia de las condiciones ambientales externas. Esto favorece la estabilidad del entorno de crecimiento y mejora la eficiencia del cultivo. Además, el diseño se orientó a facilitar el acceso para las labores de siembra, mantenimiento y cosecha. La incorporación de accesos frontales y la disposición ordenada de los componentes internos permiten manipular las plantas y realizar tareas de inspección o limpieza de forma cómoda y segura, reduciendo tiempos de intervención y mejorando la ergonomía del sistema.

El diseño de la estructura del prototipo se diseñó utilizando el acero al carbono de baja aleación bajo la norma AISI 1020, también conocido como hierro negro. Este material tiene un contenido de carbono por debajo del 0,3 % y está formado en su mayoría por hierro (Fe); fue escogido con base en criterios de optimización mecánica y viabilidad técnica. Su elección se debe a la necesidad de disponer de un material que brinde un balance apropiado entre rigidez, resistencia, facilidad de manufactura y precio.

El hierro negro tiene un Módulo de Young elevado  $E \approx 200$  GPa y una tensión de fluencia adecuada para asegurar que la estructura funcione dentro del régimen elástico mientras está en funcionamiento. Esto quiere decir que el material no sufre deformaciones permanentes ante las cargas aplicadas. Esta cualidad es esencial para soportar la carga estática distribuida del sistema de forma segura. Esta carga comprende el peso del depósito de solución nutritiva (carga hidrostática), la masa del sustrato con humedad (carga gravitacional) y los componentes electrónicos, así como las luces que están situadas en la parte alta de la estructura.

Desde una perspectiva geométrica, el prototipo tiene una estructura ortogonal que se basa en prismas rectangulares y actúa como un armazón rígido. Esta organización estructural cumple dos funciones fundamentales. En primer lugar, ayuda a aislar las vibraciones: El hierro negro, por su rigidez y masa, funciona como un amortiguador pasivo que disminuye la propagación de las vibraciones producidas por la bomba de riego. Esto evita que dichas vibraciones afecten la exactitud de los valores medidos por los sensores ambientales. En segundo lugar, esta geometría reduce las desviaciones en los perfiles transversales, garantizando que el ángulo en el que la radiación UV incide sobre las plantas se mantenga invariable, tal como se estableció al diseñar ópticamente el sistema.

La soldadura es un componente esencial en la creación de la cámara de compensación y regulación de radiación UV en lo que respecta al proceso de unión de las placas, pues define la estabilidad a nivel mecánico, la duración y la integridad estructural del conjunto. Se utilizó la técnica de soldadura Flux Core (FCAW) para este prototipo, que se fundamenta en el empleo de alambre tubular con un núcleo de fundente. Se eligió este método porque no necesita de un gas protector externo y porque puede producir uniones que son a la vez penetrantes y resistentes.

La fusión apropiada del material base es un aspecto fundamental cuando se trabaja con perfiles de hierro negro de espesores intermedios, y el proceso FCAW asegura que esto ocurra. Asimismo, tiene una buena tolerancia ante pequeñas impurezas en la superficie, lo que mejora la calidad de las uniones en entornos de fabricación tradicional. Antes de soldar, los perfiles se cortaron según las medidas que el diseño mecánico estableció, y luego fueron

limpiados por fuera para quitar óxido, grasa y polvo con el objetivo de mejorar la calidad del cordón. Del mismo modo, se revisó meticulosamente el escuadrado y la alineación de los componentes en las uniones más críticas, garantizando así que las cargas mecánicas estuvieran distribuidas uniformemente por toda la estructura.

La aplicación de la soldadura Flux Core permitió obtener juntas continuas y estructuralmente sólidas, garantizando una transmisión eficiente de tensiones y una elevada resistencia mecánica. La adecuada penetración del cordón de soldadura contribuye directamente a la durabilidad del prototipo durante ciclos prolongados de operación, especialmente en condiciones de vibración, humedad y carga variable. Finalmente, se implementó un tratamiento superficial mediante la aplicación de pintura anticorrosiva con el objetivo de proteger la estructura metálica frente a la humedad generada por el sistema de riego. Este recubrimiento actúa como una barrera protectora contra la oxidación, reduciendo la velocidad de corrosión electroquímica en entornos con alta humedad relativa y variaciones térmicas, características propias de un microambiente agrícola controlado.

La pintura utilizada está formulada para resistir salpicaduras de agua, condensación y cambios de temperatura. Una vez curada, forma una capa continua que prolonga la vida útil de la estructura y preserva su integridad mecánica. Además, este tratamiento contribuye indirectamente a la seguridad eléctrica del sistema, al disminuir la posibilidad de desprendimientos de óxido que pudieran afectar conexiones, sensores o componentes electrónicos cercanos. En conjunto, la selección del material, el diseño geométrico, el proceso de soldadura y el tratamiento superficial conforman una solución estructural coherente, robusta y adecuada para las condiciones operativas del prototipo.

*VI-D1. Análisis de cargas para la evaluación estructural la rejilla que sostiene la maceta:* Para determinar la carga total que se ejerce sobre la maceta empleada en el sistema de cultivo, con el propósito de establecer las condiciones reales de operación para un análisis estructural en simulación estática. El cálculo toma en cuenta tres elementos fundamentales: el peso de la maceta, el peso de la tierra para sembrar y el peso de las lechugas. En base a las especificaciones del fabricante, la maceta tiene una capacidad volumétrica máxima de 18 litros. Este es el valor que se utiliza en este análisis porque representa el estado real de funcionamiento.

El fabricante señala que el contenedor de cultivo tiene una capacidad de 18 litros. No obstante, para calcular el volumen de sustrato que se necesita, se tomó en cuenta la densidad de plantación y el volumen radicular requerido por la *Lactuca sativa*. Considerando que  $1 \text{ L} = 0,001 \text{ m}^3$ , se obtiene un volumen total de  $V = 0,018 \text{ m}^3$ .

Para realizar el siguiente cálculo, es necesario determinar previamente la masa del sustrato de siembra. Este valor se obtiene a partir de la densidad promedio del sustrato previamente humedecido, ya que la relación entre masa, volumen y densidad permite establecer con precisión la cantidad de material empleada en el experimento. Considerando que la densidad promedio del sustrato de siembra previamente humedecido adopta una densidad de  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ , utilizamos este dato para el desarrollo de los cálculos.

A partir de esta expresión se podrá calcular la masa correspondiente en función del volumen utilizado, garantizando así la coherencia y exactitud en los resultados obtenidos. Con los datos previamente establecidos, se procede

a aplicar la relación fundamental entre masa, densidad y volumen, mediante la siguiente expresión matemática:

$$M_{\text{tierra}} = \rho \cdot V \quad (6)$$

Esta ecuación permite determinar de manera precisa la masa del sustrato empleado, asegurando consistencia metodológica en el desarrollo del estudio.

**Donde:**

$M_{\text{tierra}}$  = masa de la tierra de sembrado.

$\rho$  = densidad de la tierra de sembrado.

$V$  = volumen de la maceta.

$$M_{\text{tierra}} = 24,3 \text{ kg} \quad (7)$$

Además de la masa del sustrato, se consideraron cargas adicionales que influyen en el sistema, con el fin de obtener un análisis más preciso y representativo. Entre ellas se incluye la masa de la producción agrícola, la cual corresponde al peso generado por el cultivo durante su desarrollo. Este valor se estimó en función del rendimiento por unidad de área y el contenido de humedad del producto, factores que inciden directamente en el peso final.

Se considera una cosecha de 10 lechugas, con un masa promedio individual de 212g, realizamos el siguiente cálculo:

$$M_{\text{cosecha}} = N_{\text{lechugas}} \times M_{\text{unitario}}$$

**Donde:**

$M_{\text{cosecha}}$  = masa total de la cosecha.

$N_{\text{lechugas}}$  = cantidad de lechugas.

$M_{\text{unitario}}$  = masa unitario de la lechuga.

$$M_{\text{cosecha}} = 2,12 \text{ kg} \quad (8)$$

La masa de la maceta, indicada por el fabricante, corresponde a  $M_{\text{maceta}} = 1,12 \text{ kg}$ , valor que se considera constante durante el experimento. Este dato permite calcular con mayor precisión la carga total del sistema de cultivo y facilita la estimación del peso estructural soportado.

El cálculo de la masa total del sistema permite determinar la carga real que actúa sobre la estructura del prototipo. Considera la maceta, el sustrato húmedo, el agua retenida y la planta. Este valor es fundamental para verificar la resistencia mecánica, garantizar estabilidad y asegurar un funcionamiento seguro.

$$M_{\text{total}} = M_{\text{tierra}} + M_{\text{maceta}} + M_{\text{cosecha}}$$

$$M_{\text{total}} = 27,54 \text{ kg}$$

Con los cálculos realizados anteriormente, se determina la fuerza total que actúa sobre el sistema. Esta se obtiene

multiplicando la masa total por la aceleración de la gravedad. El valor resultante representa la carga aplicada sobre la estructura y permite verificar la resistencia y estabilidad del soporte durante la operación.

$$f = m \cdot g$$

**Donde:**

$f$  = fuerza del sistema.

$m$  = masa total del sistema.

$g$  = gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>).

$$f = 270,2 \text{ N}$$

Se llevó a cabo un análisis estructural empleando el método de elementos finitos con SOLIDWORKS Simulation. El estudio se definió como un análisis estático, utilizando una malla sólida y condiciones de sujeción y carga que reflejan la operación real del sistema. Se determinó una evaluación del modelo con el sistema de unidades MKS, teniendo en cuenta desplazamientos medidos en milímetros y esfuerzos registrados en N m<sup>-2</sup>. *Para simplificar el modelo y concentrarse en el comportamiento de la estructura, se desactivaron los efectos de fricción.*

Se utiliza acero inoxidable para la estructura, porque este material es resistente a la tensión.

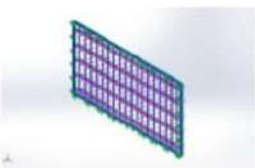
Propiedades de material		
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 304	Sólido 1(Saliente-Extruir3)(REJILLA N)
	Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado: Desconocido	
	Límite elástico: 2,06807e+08 N/m <sup>2</sup>	
	Límite de tracción: 5,17017e+08 N/m <sup>2</sup>	
	Módulo elástico: 1,9e+11 N/m <sup>2</sup>	
	Coefficiente de Poisson: 0,29	
	Densidad: 8,000 kg/m <sup>3</sup>	
	Módulo cortante: 7,5e+10 N/m <sup>2</sup>	
	Coefficiente de dilatación térmica: 1,8e-05 /Kelvin	
Datos de curva: N/A		

Figura 21. Propiedades mecánicas del material estructural utilizado en la simulación. Fuente: Los Autores.

En la figura 21 se presentan las propiedades del material que permiten representar adecuadamente el comportamiento mecánico del material bajo carga. El modelo estructural fue definido empleando acero estructural tipo AISI 1020, un material ampliamente utilizado en aplicaciones mecánicas debido a su adecuado equilibrio entre resistencia, ductilidad y facilidad de manufactura. Sus propiedades mecánicas principales incluyen un límite elástico aproximado de  $3,52 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , una resistencia última cercana a  $4,20 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  y un módulo de elasticidad de aproximadamente  $2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , lo que describe su rigidez y capacidad para deformarse elásticamente bajo carga.

Adicionalmente, presenta una densidad de alrededor de  $7850 \text{ kg/m}^3$  y un coeficiente de Poisson de 0.29, parámetros que permiten representar con precisión su comportamiento físico y mecánico durante el análisis estructural. Estas propiedades garantizan una modelación adecuada del comportamiento del material frente a esfuerzos

y deformaciones, permitiendo evaluar con fiabilidad su desempeño bajo condiciones de carga. El modelo fue discretizado mediante una malla sólida de alta calidad con el propósito de mejorar la precisión del análisis numérico. La discretización generó aproximadamente 17 865 nodos y 24 784 elementos finitos, permitiendo una representación adecuada de la geometría y del comportamiento estructural.

El tamaño máximo de elemento utilizado fue de aproximadamente 26,7 mm, mientras que el tamaño mínimo alcanzó cerca de 5,4 mm, lo que favorece la captura precisa de gradientes de esfuerzo y deformación en zonas críticas. La calidad de la malla empleada garantiza resultados confiables en la distribución de esfuerzos y deformaciones, contribuyendo a la validez del análisis estructural realizado.

El análisis estructural permitió obtener la distribución de los esfuerzos equivalentes de Von Mises en toda la estructura, criterio ampliamente utilizado para evaluar el comportamiento de materiales dúctiles bajo estados de carga complejos. Los resultados muestran un esfuerzo máximo aproximado de  $4,17 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  y un esfuerzo mínimo cercano a  $1,11 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ .

Los valores máximos se concentran principalmente en las zonas de unión y en los soportes estructurales, donde se generan mayores concentraciones de carga debido a la transferencia de esfuerzos entre los elementos. Considerando que el esfuerzo máximo obtenido se encuentra muy por debajo del límite elástico del material, se concluye que la estructura opera dentro de condiciones seguras, sin riesgo de deformación plástica bajo las cargas evaluadas.

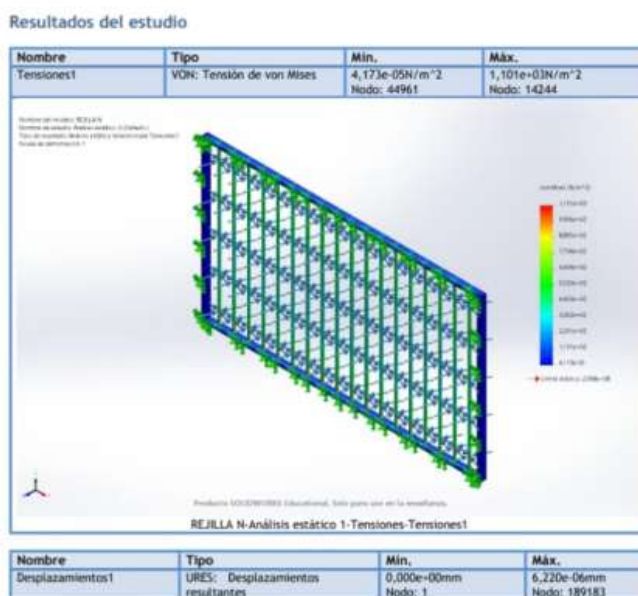


Figura 22. Resultado de desplazamiento de la rejilla de acero en la simulación. Fuente: Los Autores.

En la figura 22 se presentan el resultado del análisis de desplazamientos permitió evaluar la deformación del sistema estructural bajo la carga aplicada. Los resultados muestran un desplazamiento máximo aproximado de 1,46 mm, mientras que el desplazamiento mínimo es cercano a 0 mm en las zonas restringidas. La magnitud de la deformación observada es reducida y se mantiene dentro de límites aceptables, por lo que no compromete la estabilidad estructural ni el correcto funcionamiento del sistema. Las fuerzas de reacción obtenidas en los apoyos

confirman el equilibrio estructural del modelo frente a la carga aplicada. Estos resultados validan las condiciones de frontera establecidas y evidencian una correcta transferencia de cargas hacia los puntos de soporte.

El análisis estructural mediante el método de elementos finitos demuestra que la estructura es capaz de soportar adecuadamente la carga de operación prevista. Los esfuerzos obtenidos se mantienen dentro del rango elástico del material, evitando la ocurrencia de deformaciones permanentes. Asimismo, los desplazamientos registrados son mínimos y no afectan la estabilidad ni el desempeño funcional del sistema. En conjunto, los resultados evidencian un comportamiento estructural seguro, garantizando la estabilidad del conjunto y su aptitud para operar de manera continua bajo las condiciones de servicio consideradas.

*VI-D2. Análisis estructural de la base de soporte:* Para complementar la evaluación estructural del sistema de cultivo, se llevó a cabo el estudio de la base de soporte, que es el componente responsable de transmitir y repartir las cargas hacia la superficie de apoyo. Este análisis permitió verificar la correcta distribución de esfuerzos, minimizar concentraciones críticas y garantizar que la estructura mantenga estabilidad, rigidez y seguridad durante su funcionamiento continuo. La rejilla portamacetas fue analizada antes, tomando en cuenta el peso del sustrato húmedo, las plantas en crecimiento y la masa estructural en sí. Con base en estos resultados, se establecieron las cargas reales que inciden sobre la base, posibilitando así la simulación de condiciones operativas representativas.

El análisis de la base de soporte se realizó con el objetivo de comprobar la integridad estructural del sistema de cultivo, utilizando SOLIDWORKS Simulation y el método de elementos finitos. Este procedimiento permitió evaluar la distribución de esfuerzos, deformaciones y concentraciones de carga, verificando que la estructura soporte las condiciones de operación sin fallas ni deformaciones permanentes. La base constituye el componente encargado de transferir las cargas provenientes de la rejilla portamacetas hacia la superficie de apoyo; por ello, su análisis resulta fundamental para garantizar la estabilidad, rigidez y seguridad del conjunto estructural durante la operación. Para representar condiciones reales de funcionamiento, se aplicaron las mismas condiciones de carga empleadas en el estudio del sistema, permitiendo evaluar su comportamiento bajo solicitaciones operativas.

El modelo analizado corresponde a la base estructural en su configuración predeterminada y, a partir de sus propiedades geométricas y del material empleado, se determinaron sus propiedades volumétricas principales, incluyendo masa, volumen y centro de gravedad. Estos parámetros son esenciales para comprender el comportamiento estructural, evaluar la estabilidad global, prever posibles desplazamientos y optimizar el desempeño del sistema bajo condiciones reales de servicio.

El sistema presenta una masa aproximada de 582,02 kg y un volumen de 0,0741 m<sup>3</sup>. Considerando una densidad del material de 7850 kg/m<sup>3</sup>, se obtiene un peso propio cercano a 5703,82 N. Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento inercial y gravitacional de la estructura dentro del análisis estructural, también el análisis estructural fue definido considerando un estudio de tipo estático, apropiado para evaluar la respuesta del sistema bajo cargas constantes en condiciones normales de operación. Se empleó una malla sólida para representar adecuadamente el comportamiento del material y la geometría del modelo.

El sistema de unidades utilizado fue el Métrico (MKS), estableciendo una temperatura de referencia de 298 K,

asumiendo un comportamiento dentro del régimen elástico lineal. El solucionador numérico se configuró en modo automático para optimizar la convergencia y precisión del cálculo. Estas condiciones permiten evaluar de manera confiable el comportamiento estructural del modelo bajo cargas estáticas representativas de su funcionamiento normal. La base estructural fue modelada utilizando acero estructural ASTM A36, considerando un comportamiento elástico lineal isotrópico, lo cual permite describir de manera adecuada la respuesta del material ante las cargas aplicadas. Este enfoque facilita la predicción de deformaciones y esfuerzos, asegurando resultados confiables para validar la resistencia y estabilidad del sistema.

Entre sus propiedades mecánicas principales se consideran un límite elástico de aproximadamente  $2,5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  y una resistencia última a tracción cercana a  $4,0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ . Asimismo, el material presenta un módulo de elasticidad de  $2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , un coeficiente de Poisson de 0.26 y un módulo cortante de  $7,93 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ , parámetros que describen su rigidez y comportamiento ante deformaciones elásticas. La densidad considerada es de  $7850 \text{ kg/m}^3$ , valor característico del acero estructural. En conjunto, estas propiedades representan adecuadamente el comportamiento mecánico del material empleado en la base estructural analizada.

Se aplicó una sujeción fija en tres caras de la base estructural, con el propósito de simular el contacto rígido con la superficie de apoyo. Esta condición restringe los desplazamientos y rotaciones en las zonas definidas, representando de manera realista el soporte del sistema y evitando movimientos no deseados que puedan alterar los resultados del análisis estructural. Para el análisis se consideraron las cargas reales transmitidas por el sistema considerando sus condiciones de operación. Se aplicó una fuerza normal de 363,55 N junto con una presión distribuida de  $173,205 \text{ N/m}^2$  sobre las superficies correspondientes. Estas cargas representan el peso combinado de la rejilla, las macetas, el sustrato humedecido y los demás elementos que conforman el sistema, permitiendo evaluar el comportamiento estructural bajo condiciones reales de servicio.

El modelo fue discretizado mediante una malla sólida basada en curvatura, con el propósito de mejorar la precisión del análisis al capturar adecuadamente las variaciones geométricas del sistema. Este tipo de mallado permite refinar automáticamente las zonas con mayor curvatura, optimizando la representación del comportamiento estructural. Como resultado, se obtiene una mejor aproximación de los gradientes de esfuerzo y deformación, reduciendo errores numéricos y aumentando la confiabilidad de los resultados obtenidos en la simulación.

La discretización del modelo generó un total de 11244 nodos y 5915 elementos finitos, proporcionando una representación detallada de la geometría analizada. El tamaño máximo de elemento fue de 105.03 mm, mientras que el tamaño mínimo alcanzó 5.25 mm, lo cual favorece una mayor precisión en zonas críticas donde se concentran los esfuerzos. Además, no se registraron elementos distorsionados, confirmando la adecuada calidad del mallado empleado. Esta calidad de malla garantiza resultados confiables en la evaluación de esfuerzos y deformaciones del modelo. A partir del análisis estructural, se determinó la distribución de las tensiones equivalentes de Von Mises en la base estructural. Los resultados evidencian un esfuerzo mínimo aproximado de  $5,98 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$  y un esfuerzo máximo de  $2,29 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ , valores que indican que las sollicitaciones se mantienen dentro de rangos seguros para el material. La correcta discretización y la distribución homogénea de tensiones confirman la confiabilidad del modelo y el adecuado desempeño estructural del sistema bajo las condiciones de carga evaluadas.

Las tensiones máximas se localizan principalmente en las zonas cercanas a las áreas donde se aplican las cargas y en los puntos de sujeción, debido a la concentración de esfuerzos generada por la transferencia de carga. Considerando que el límite elástico del material es de  $2,5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , los esfuerzos obtenidos se encuentran muy por debajo del límite permisible, lo que indica que la estructura opera dentro del rango elástico y bajo condiciones seguras de funcionamiento.

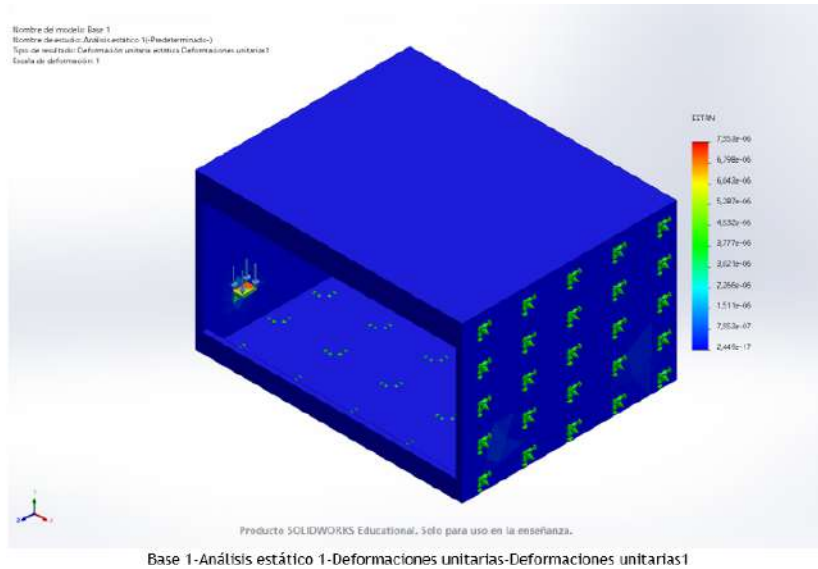


Figura 23. Deformación unitaria equivalente de la base. Fuente: Los Autores.

En la figura 23 se representa el análisis de deformación unitaria que permitió evaluar el nivel de deformación del material bajo las cargas aplicadas. Los resultados muestran una deformación máxima de  $7,55 \times 10^{-6}$ , valor que se mantiene dentro del rango elástico del material. Esto indica que la estructura trabaja sin experimentar deformaciones permanentes, garantizando su integridad mecánica durante la operación.

Las fuerzas de reacción obtenidas en los apoyos del modelo alcanzan un valor total de 2026.32 N, lo cual confirma el equilibrio estructural frente a las cargas aplicadas. Este resultado valida las condiciones de frontera establecidas y evidencia una correcta transmisión de las cargas hacia las superficies de soporte. El análisis estructural demuestra que la base es capaz de soportar adecuadamente las cargas operativas previstas, ya que los esfuerzos obtenidos se mantienen muy por debajo del límite elástico del material, garantizando que la estructura trabaja dentro del régimen elástico. Asimismo, las deformaciones registradas son mínimas y no comprometen la estabilidad del sistema. En conjunto, estos resultados evidencian un comportamiento estructural estable y confirman que la base proporciona condiciones seguras y confiables para el funcionamiento del sistema.

La base estructural presenta un comportamiento mecánico adecuado bajo las condiciones de carga simuladas. Los niveles de esfuerzo y deformación se encuentran dentro de los límites seguros del material, confirmando que el diseño es estructuralmente confiable para soportar el peso del sistema de cultivo en condiciones reales de operación.

#### *VI-E. Automatización de las variables ambientales*

El funcionamiento automatizado de la incubadora se fundamenta en un sistema de control programado en el microcontrolador Arduino Uno, el cual se encarga de integrar la lectura de sensores ambientales, el procesamiento de datos, la toma de decisiones y la activación de actuadores. Este enfoque permite supervisar de manera continua las condiciones internas del sistema y mantener parámetros adecuados para el crecimiento de *Lactuca sativa* dentro de un entorno controlado, reduciendo la dependencia de intervención humana.

El sistema opera mediante una lógica de control cíclica, en la cual se monitorean de forma permanente variables críticas como la humedad del sustrato, la temperatura y la humedad relativa del aire, así como la intensidad de radiación UV presente en la cámara de cultivo. A partir de la adquisición y procesamiento de estos datos, el microcontrolador compara los valores medidos con los rangos establecidos y ejecuta acciones automáticas orientadas a regular el riego, controlar los periodos de iluminación y supervisar el estado general del sistema. Este proceso se repite de forma continua, permitiendo ajustes dinámicos frente a cambios ambientales.

La arquitectura implementada favorece una respuesta rápida y precisa ante variaciones del entorno, contribuyendo a la estabilidad del microclima interno y evitando condiciones que puedan afectar el desarrollo vegetal. Además, el control automatizado optimiza el consumo de agua y energía, mejora la eficiencia operativa y prolonga la vida útil de los componentes. Como resultado, se garantiza un entorno adecuado y estable para el crecimiento de las plantas, promoviendo un desarrollo uniforme y eficiente dentro del sistema automatizado.

*VI-E1. Algoritmo de control del sistema:* El algoritmo de control implementado sigue una secuencia estructurada que permite la supervisión continua de las variables ambientales y la actuación automática del sistema. En la etapa inicial se realiza la configuración de los sensores y actuadores, seguida de la inicialización de la pantalla LCD y del módulo de almacenamiento en tarjeta SD, asegurando la correcta comunicación entre los dispositivos. Posteriormente, se efectúa una lectura inicial del sensor de radiación UV con el fin de establecer condiciones base de referencia que permitan comparar las mediciones posteriores. Se incorpora además un periodo de estabilización de 30 segundos, necesario para garantizar la obtención de datos confiables y reducir posibles fluctuaciones iniciales antes del inicio del monitoreo continuo.

Una vez completada la inicialización, el sistema procede a la adquisición de datos. En esta etapa se registra la temperatura y la humedad relativa del aire mediante el sensor DHT22, la humedad del sustrato a través del sensor FC-28 y el voltaje correspondiente a la radiación UV, a partir del cual se calcula la intensidad de radiación incidente. La lectura periódica de estas variables permite obtener una visión integral del microclima interno de la incubadora.

Durante la fase de procesamiento, las señales analógicas obtenidas son convertidas a valores porcentuales y magnitudes físicas interpretables que facilitan su análisis y visualización. Asimismo, se evalúan los umbrales predefinidos para cada variable y se verifica el estado de funcionamiento de los sensores con el fin de detectar posibles anomalías, pérdidas de señal o lecturas fuera de rango que puedan comprometer la confiabilidad del sistema. Con base en los resultados obtenidos, el sistema ejecuta la toma de decisiones correspondiente. Esto incluye la activación del sistema de riego cuando la humedad del sustrato se encuentra por debajo del nivel establecido, el

control automático de la iluminación UV para mantener niveles adecuados de radiación y la generación de alertas ambientales en caso de detectarse condiciones fuera de los rangos óptimos. Estas acciones permiten mantener condiciones estables y favorables para el crecimiento vegetal.

Finalmente, el sistema realiza la visualización y el registro de la información. Los datos medidos se presentan en tiempo real en la pantalla LCD para facilitar la supervisión del usuario y permitir una verificación inmediata del estado del sistema. Paralelamente, las variables monitoreadas se almacenan de forma periódica en la tarjeta SD, creando un historial que puede emplearse para análisis posteriores, evaluación del desempeño y validación experimental. Este proceso se ejecuta de manera continua durante la operación del sistema, garantizando un monitoreo permanente, una respuesta automática ante las variaciones ambientales y una gestión eficiente de los recursos, lo que contribuye a la estabilidad del microclima interno y al correcto funcionamiento del sistema automatizado.

*VI-E2. Condiciones de activación del riego:* El sensor FC-28 mide continuamente la humedad del sustrato. El microcontrolador procesa las cifras analógicas de este sensor para determinar un porcentaje representativo de la humedad, que luego determina el riego automatizado del sistema. Se definieron rangos que se consideran óptimos para sistemas hidropónicos y entornos controlados con el fin de asegurar un desarrollo radicular apropiado en la agricultura. Conservando la humedad del suelo entre el 30 % y el 70 %, el sistema garantiza suficiente disponibilidad de agua y promueve la asimilación efectiva de nutrientes. Este intervalo posibilita mantener un balance apropiado entre la aireación y la retención de agua en el medio de cultivo, lo cual es fundamental para un desarrollo sano.

El controlador activa la bomba de riego a través de un relé de accionamiento cuando la humedad del sustrato baja del 30 % para que el nivel ideal se recupere en el menor tiempo posible. En cambio, si la humedad llega o sobrepasa el 70 %, se apaga la bomba para impedir que el medio de cultivo se sature y así evitar los problemas relacionados con el exceso de agua, como la disminución del oxígeno disponible en el área radicular y la posibilidad de que las raíces se pudran. El sistema, en función de las fluctuaciones del microambiente, permite ajustes dinámicos al evaluar constantemente los valores medidos. Además, el algoritmo tiene en cuenta una condición de seguridad: si el sensor muestra desconexiones, lecturas que no están dentro del rango permitido o fallas, la bomba se activa de manera preventiva. Esta táctica asegura un abastecimiento mínimo de agua incluso en situaciones anormales de medición, lo que previene episodios de escasez hídrica que podrían poner en peligro el crecimiento del cultivo.

La lógica de control que se ha puesto en marcha garantiza un suministro del recurso hídrico que es constante, eficiente y regulado, lo cual previene la saturación radicular y el estrés hídrico, situaciones que podrían tener un impacto negativo en el desarrollo fisiológico de la planta. Del mismo modo, la regulación automatizada mejora el uso de agua, disminuye la intervención manual y ayuda a que el microclima interno se mantenga estable. Así, se fomenta un ambiente estable que mejora la eficacia operativa del sistema automatizado y contribuye a que el cultivo crezca de manera uniforme.

*VI-E3. Control automático de iluminación UV:* El sistema controla la luz ultravioleta según la radiación que el sensor ML8511 detecta. El microcontrolador, por su parte, lee el voltaje de salida y lo transforma en un valor que representa la irradiancia incidente en el interior de la cámara de cultivo. El objetivo de este control es añadir a la radiación existente en el ambiente controlado y preservar condiciones de luz apropiadas para el crecimiento de

las plantas. En la etapa inicial de funcionamiento, el sistema toma nota de un valor base de radiación; si el voltaje UV registrado es igual o inferior a 1.40 V, el controlador activa las luces UV de manera automática para aumentar la irradiancia disponible. Este criterio posibilita la compensación de eventuales deficiencias en la radiación natural debido a las condiciones del clima, la ubicación del sistema o los cambios diarios de luz.

Las luces funcionan durante un periodo ininterrumpido de tres horas después de ser encendidas, y dicha temporización es controlada a través del microcontrolador interno. Luego de este periodo, las luces se apagan automáticamente para evitar un funcionamiento innecesariamente prolongado. Este esquema de funcionamiento proporciona una cantidad adecuada de energía para promover los procesos metabólicos y fotosintéticos de la planta, mientras previene la exposición excesiva a radiación, que podría causar estrés fisiológico, deshidratación foliar o desequilibrio térmico en el microambiente.

El sistema conserva un estado lógico de encendido y apagado, lo que evita activaciones reiteradas a lo largo del mismo ciclo, asegurando así la estabilidad en las operaciones y la eficiencia energética. Asimismo, el control con temporizador ayuda a aumentar la vida útil de las luminarias y disminuir el consumo de electricidad del sistema. En general, este control de la luz ayuda a estabilizar las condiciones energéticas del medio de cultivo, al añadir a la radiación natural existente y mantener niveles constantes de luz. Así, se asegura un ambiente controlado apropiado para el crecimiento de las plantas dentro del sistema automatizado, se optimiza la eficacia del proceso fotosintético y se promueve el desarrollo uniforme de las plantas.

*VI-E4. Gestión de alertas y estados del sistema:* El sistema incluye un módulo de diagnóstico que examina constantemente las condiciones ambientales y el estado operativo de los sensores, con el objetivo de identificar irregularidades y asegurar un funcionamiento seguro. El algoritmo determina diferentes estados operativos mediante la lectura del sensor DHT22 y de los índices de humedad del sustrato. Las condiciones halladas incluyen: problemas en la lectura del sensor DHT22, temperaturas altas (más de 29°C), riesgo de estrés térmico, temperaturas bajas (menos de 14°C), humedad ambiental alta que puede favorecer el crecimiento de hongos, condiciones de suelo seco que necesitan riego inmediato y el funcionamiento normal del sistema cuando las variables se encuentran dentro de los límites establecidos.

Estos estados son visibles en la pantalla LCD, lo que posibilita que el usuario los supervise de manera rápida, clara e intuitiva. El sistema presenta mensajes de advertencia como *Alerta: Falla DHT22, Alerta: CALOR, Alerta: FRÍO, Humedad ALTA o Suelo SECO*, brindando datos al instante sobre la condición observada. Asimismo, se muestra el estado de los actuadores, lo que incluye la operación de la bomba de riego y la condición de las luminarias UV, lo que permite verificar en tiempo real el desempeño del sistema.

Para optimizar la interacción con el usuario, el sistema habilita una rotación automática de las pantallas informativas cada diez segundos, lo que posibilita observar varias variables sin requerir intervención manual. Esta rotación abarca información sobre la temperatura, el estado del sistema, la humedad del aire y del suelo, la radiación UV y el tiempo que queda hasta el próximo registro de datos. Para fines de análisis y supervisión en el futuro, el sistema registra las variables del medio ambiente cada cinco minutos y guarda los datos en la tarjeta SD en formato de texto. Los parámetros anotados incluyen el voltaje UV, la temperatura, la humedad del sustrato, la humedad relativa

del aire, la intensidad de radiación estimada, el tiempo de operación y el estado de funcionamiento de la bomba. Este registro periódico posibilita la evaluación histórica del comportamiento del microclima, el análisis de cómo ha funcionado el cultivo y la verificación experimental de la operatividad del sistema automatizado.

#### VI-F. *Protocolo experimental*

Se creó un protocolo experimental comparativo en condiciones controladas con el objetivo de analizar detenidamente la actuación de la incubadora automatizada y establecer cómo afecta el crecimiento de *Lactuca sativa* (lechuga tipo iceberg). La finalidad de este protocolo fue cuantificar la influencia que tiene el control automatizado de la luz ultravioleta, la regulación de variables ambientales y el manejo del riego en los procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento vegetal. Asimismo, se buscó evaluar la estabilidad del microclima interno proporcionado por el sistema automatizado y su repercusión en el desarrollo uniforme del cultivo.

El diseño experimental incluyó la realización simultánea de dos tratamientos: el cultivo asistido por una incubadora automatizada y el cultivo en condiciones tradicionales. Esta implementación paralela redujo el impacto de factores temporales y cambios en el entorno, lo que aseguró la comparabilidad directa de los resultados alcanzados. Además, permitió observar diferencias atribuibles exclusivamente al sistema de control ambiental, minimizando la influencia de variaciones climáticas externas.

Con el objetivo de garantizar la uniformidad en los experimentos y disminuir la aparición de factores confusos, se aplicaron ambos tratamientos empleando la misma especie vegetal, el mismo tipo de sustrato y métodos agronómicos equivalentes. Las semillas se sembraron en condiciones homogéneas de profundidad y espaciamento, y se llevó a cabo un seguimiento continuo desde la fase de germinación hasta el desarrollo vegetativo. Esto posibilitó evaluar de manera precisa la evolución del crecimiento en cada uno de los tratamientos y detectar diferencias en el ritmo de desarrollo.

En el método tradicional, las plantas crecieron en macetas convencionales expuestas a la luz solar y al riego manual, por lo que estuvieron sometidas a las variaciones ambientales propias del entorno, tales como fluctuaciones de temperatura, humedad y radiación solar. Por el contrario, el tratamiento automatizado se realizó dentro de la incubadora, donde un sistema de riego automatizado reguló la humedad del sustrato y lámparas UV con orientación e intensidad controladas complementaron la radiación disponible, permitiendo mantener condiciones ambientales más estables y reproducibles.

Durante el periodo experimental se consideraron variables de importancia para el análisis comparativo, tales como el tiempo de germinación, la altura de la planta, el número total de hojas, la uniformidad morfológica, el color y vigor de las hojas, así como el tiempo requerido para alcanzar determinadas fases del desarrollo vegetativo. La recolección sistemática y periódica de estos datos permitió realizar una evaluación objetiva del impacto del ambiente controlado sobre el crecimiento del cultivo. Este protocolo experimental brindó un marco metodológico organizado y reproducible que permitió comparar la eficacia del sistema automatizado con el método tradicional. A partir de este enfoque fue posible identificar mejoras tanto en el crecimiento como en la calidad del desarrollo vegetal, así como evaluar el potencial del sistema para optimizar la producción en espacios controlados y con un

uso eficiente de los recursos.

#### VI-G. Método tradicional de cultivo de lechuga.

Para determinar el desempeño de la incubadora automatizada desarrollada en esta investigación, se empleó un método tradicional para cultivar *Lactuca sativa* (lechuga tipo iceberg) en condiciones naturales, con el propósito de fijar un punto de referencia confiable desde la perspectiva experimental. Este procedimiento constituyó el grupo de control, que era esencial para comparar el crecimiento de las plantas conseguido mediante el sistema automatizado y para determinar posibles mejoras en la calidad morfológica del cultivo y en la duración del desarrollo.

El experimento se llevó a cabo con diez unidades experimentales, correspondientes a diez plantaciones de lechuga cultivadas en macetas ordinarias para la agricultura y destinadas al consumo dentro del hogar. Se optó por un sustrato orgánico comercial para rellenar cada maceta, ya que este tiene una capacidad adecuada para retener la humedad, airear y aportar nutrientes esenciales para el desarrollo inicial de los cultivos. Se sembraron las semillas a una profundidad de entre 0.5 y 1 cm, lo que aseguraba que el sustrato se cubriera de manera uniforme y favorecía la germinación.

Las macetas se colocaron en un espacio al aire libre, donde fueron expuestas a la luz del sol. Esto permitió que las plantas recibieran radiación natural cada día durante el ciclo de luz. Este entorno permitió que la cosecha estuviera expuesta a las fluctuaciones climáticas propias de la zona, como cambios en la temperatura, humedad relativa y radiación solar, sin requerir sistemas artificiales para regular el ambiente o luz extra. Se realizó el riego de manera manual, con agua potable, en períodos regulares determinados a partir de la inspección directa del estado del sustrato. Se mantuvo un nivel de humedad adecuado para evitar circunstancias de excesiva sequedad o saturación hídrica, ya que estas condiciones pueden afectar negativamente el desarrollo de las raíces y la fisiología de las plantas.

Se realizó un monitoreo del cultivo desde que germinó hasta que desarrolló vegetación, y se observó de manera continua el surgimiento de plántulas, la creación de hojas verdaderas y la expansión gradual de la estructura foliar. Durante este periodo se registraron variables relevantes, como el tiempo que tarda la planta en germinar, la cantidad de hojas y su color, la altura de la planta, la presencia de plagas o enfermedades y posibles indicios de estrés hídrico. Es importante hacer notar que el crecimiento de las plantas cultivadas en la incubadora automatizada ocurrió simultáneamente con el cultivo tradicional. Que estas técnicas se aplicaran a la vez aseguró que ambas contaran con condiciones temporales iguales, lo cual redujo el efecto de factores externos vinculados a variaciones climáticas o estacionales. De este modo, se pudo realizar una comparación directa entre el crecimiento que tuvo lugar en condiciones naturales y el desarrollo observado en las condiciones controladas de la incubadora.

Gracias al empleo de esta técnica tradicional, se estableció una línea base experimental que permitió la evaluación objetiva de los cambios en el desarrollo, crecimiento y adaptación de las plantas. Para evaluar la eficacia del control automatizado de la iluminación UV, el riego y las condiciones ambientales en el cultivo optimizado de *Lactuca sativa*, es esencial comparar los dos sistemas.

#### VI-H. Condiciones del cultivo experimental y variables evaluadas.

El cultivo experimental se llevó a cabo utilizando semillas de *Lactuca sativa* variedad iceberg, seleccionadas por su rápida germinación, crecimiento uniforme y amplia adaptación a sistemas hidropónicos y ambientes controlados. Dado que es sensible a los cambios en el agua, la temperatura y la luz, esta especie es particularmente apropiada para analizar el funcionamiento de sistemas automatizados de vigilancia ambiental. Esto facilita observar claramente cómo un microambiente controlado afecta su desarrollo. El ciclo de crecimiento relativamente breve también hace más fácil obtener resultados en periodos cortos, lo que beneficia la evaluación comparativa del sistema propuesto.

El sistema de cultivo se llevó a cabo en macetas con medio hidropónico, usando una mezcla inerte que cuenta con una capacidad apropiada para retener agua y buena porosidad. Estas cualidades hacen posible mantener un equilibrio idóneo entre la disponibilidad de agua y la aireación de las raíces. Este balance es esencial para prevenir dificultades de anoxia radicular y promover una absorción eficaz de nutrientes. Para garantizar que las condiciones fueran reproducibles durante todo el periodo del experimento y para reducir al mínimo las interferencias ambientales no controladas, el experimento se llevó a cabo en un entorno interior protegido de factores climáticos externos. De la misma manera, se buscó mantener la ventilación a un nivel moderado para prevenir una acumulación de humedad que fuera excesiva y para garantizar que el microclima interno permaneciera estable.

Se estableció un rango de temperatura ambiente esperado entre 15°C y 29°C, una humedad relativa objetivo entre el 40 % y el 85 % y la humedad del suelo 30 % y el 70 % entre condiciones consideradas favorables para el crecimiento de la lechuga en sus etapas iniciales y de desarrollo vegetativo. Mediante una bomba controlada por la humedad del sustrato, el riego se llevó a cabo de forma automatizada. De este modo, fue posible proveer agua solo cuando era necesario y así evitar la sobresaturación del medio de cultivo y el estrés hídrico. La iluminación, por su parte, se completó con radiación UV proporcionada por lámparas que se regulan de manera automática. Esto permitió mantener condiciones de luz estables y compensar la variabilidad de la luz natural. Con el propósito de garantizar que la germinación fuera uniforme y que el desarrollo inicial del cultivo fuera homogéneo, se sembraron todas las semillas en la misma jornada antes de comenzar el experimento, lo cual disminuyó la variabilidad experimental.

Se analizaron variables morfológicas, temporales y ambientales que se consideran indicadores fiables del crecimiento de la lechuga para medir el impacto de la incubadora en el crecimiento de las plantas. La altura de la planta se calculó en centímetros, desde la raíz del tallo hasta el ápice foliar más elevado, como un indicador directo de su crecimiento vertical y su condición fisiológica global. Se registró, además, el conteo de hojas verdaderas completamente desarrolladas, un parámetro que muestra la capacidad fotosintética, el vigor vegetativo y el progreso fenológico del cultivo. El tiempo de crecimiento se definió al contar los días pasados desde la germinación hasta que las plantas llegaron a ser lo suficientemente grandes para cosechar, lo que permitió analizar qué tan eficaz era el sistema en acelerar el desarrollo de las plantas y optimizar el ciclo productivo. Además, las condiciones medioambientales fueron monitoreadas de forma automática a través del sistema que se implementó. Esto incluía la humedad relativa en el aire, la humedad del sustrato, la temperatura ambiental y la intensidad de radiación UV. El análisis completo del funcionamiento del sistema automatizado y su impacto en la estabilidad del ambiente de cultivo fue posible gracias a que estas mediciones permitieron conectar el crecimiento vegetal con las condiciones medioambientales creadas por la incubadora.

#### VI-I. *Cultivo tradicional vs incubadora automatizada.*

El diseño experimental incluyó la creación de dos grupos de estudio con el objetivo de comparar cómo el sistema automatizado propuesto afecta el crecimiento de *Lactuca sativa*. El cultivo de lechuga en condiciones tradicionales fue el primer grupo, al que se le llamó grupo control. La aplicación manual de riego de manera regular, la exposición a la luz solar natural y la falta de sistemas automáticos para controlar las variables lumínicas, la humedad ambiental o la temperatura fueron parte de estas condiciones. Este conjunto de datos posibilitó la creación de un estándar que representa el crecimiento de las plantas en condiciones normales de cultivo.

El grupo experimental, que fue el segundo grupo, estuvo formado por plantas que se cultivaron en la incubadora automatizada creada en este estudio. En este ambiente controlado, se mantuvo la humedad del sustrato a través de un sistema de riego automático que se basa en la lectura de sensores, la iluminación fue optimizada regulando la intensidad y dirección de las lámparas UV, y las condiciones ambientales fueron supervisadas constantemente. Además, el sistema conservó automáticamente niveles de operación ideales que benefician los procesos fisiológicos del crecimiento de las plantas.

Los dos grupos fueron cultivados al mismo tiempo con el fin de asegurar que los factores externos fueran iguales y reducir el impacto de las fluctuaciones climáticas o estacionales. Esta ejecución paralela posibilitó una comparación directa y fiable entre el rendimiento del cultivo en condiciones tradicionales y el ofrecido por la incubadora automatizada. Se realizó una comparación directa entre el cultivo tradicional, que se desarrolló en condiciones naturales, y la incubadora automatizada para determinar el rendimiento de esta última. Para este propósito, se examinaron indicadores como la tasa de crecimiento, el promedio de hojas, el periodo de desarrollo hasta llegar al tamaño comercial, la homogeneidad en el crecimiento.

El método automatizado mantuvo condiciones ideales a través del control de la humedad en el sustrato, la regulación de la luz UV y el monitoreo permanente de las variables ambientales, mientras que el cultivo convencional dependió del riego manual y de las cambiantes condiciones del entorno. Esta comparación posibilitó determinar los avances que se pueden atribuir al ambiente controlado creado por la incubadora, lo cual demostró el efecto del control automatizado en la calidad del cultivo y la eficacia de su crecimiento.

*VI-II. Periodo de monitoreo:* Se llevó a cabo el monitoreo experimental en el primer ciclo de crecimiento de la lechuga, que es una fase crucial donde se sientan las bases del desarrollo vegetativo. Se consideró que tres semanas (21 días) era un periodo de seguimiento adecuado desde la germinación para notar diferencias significativas en la morfología de las plantas y en su tasa de crecimiento. Los niveles de radiación lumínica, la temperatura, la humedad del suelo y la humedad relativa en el interior de la incubadora se registraron automáticamente con el sistema integrado de monitoreo cada cinco minutos. Esta documentación continua posibilitó la obtención de un registro minucioso del comportamiento del entorno controlado.

Por otro lado, las variables morfológicas del cultivo, como la altura de la planta y la cantidad de hojas verdaderas, se midieron a mano cada tres días para observar cómo progresaba el crecimiento vegetativo. Además, se llevaron a cabo observaciones visuales cada semana para determinar características cualitativas, como el color de las hojas, la fuerza general, la homogeneidad del desarrollo y cualquier posible indicio de tensión fisiológica. El análisis de tendencias de crecimiento y la comparación objetiva entre el grupo control y el grupo cultivado en la incubadora

automatizada fueron posibles gracias a la observación sistemática y constante de estas variables.

*VI-I2. Método de evaluación del desempeño:* Para probar de manera científica la eficacia de la incubadora automatizada creada, se definió una técnica de evaluación que se basa en indicadores medibles del rendimiento operativo del sistema y del crecimiento vegetal. Esta perspectiva permitió examinar el efecto que tiene la supervisión ambiental, así como el control automatizado de la iluminación UV y del riego, en el crecimiento de *Lactuca sativa*, además de establecer la eficacia del prototipo al lado de un cultivo convencional.

Se basó la evaluación en un análisis comparativo entre el grupo experimental, que fue cultivado en una incubadora automatizada, y el grupo control, que fue cultivado en condiciones tradicionales. Se tomaron en cuenta factores vinculados al crecimiento de las plantas, la regularidad del desarrollo, la condición fitosanitario, el uso de recursos y la eficacia operativa del sistema.

*VI-I3. Indicadores de crecimiento vegetal:* Se utilizaron indicadores morfológicos en gran medida utilizados en investigaciones agronómicas para evaluar el desarrollo de las plantas, ya que posibilitan la caracterización objetiva del crecimiento y la condición fisiológica del cultivo. Se midió la altura de la planta en centímetros, desde la base del tallo hasta la hoja más alta, como indicador del crecimiento vertical y del vigor vegetal. Asimismo, se registró el número de hojas verdaderas, contabilizando únicamente aquellas completamente desarrolladas, debido a su relación directa con la capacidad fotosintética y el estado fisiológico de la planta.

Además, se registró el tiempo que las plantas necesitaron para llegar a un tamaño significativo, lo cual permitió la valoración de la disminución del ciclo de producción. Además, se llevaron a cabo observaciones cualitativas del estado general de las hojas, teniendo en cuenta factores como la uniformidad, el color, la turgencia y la presencia de enfermedades o daños. Esto fue con el propósito de evaluar el estado fitosanitario del cultivo. Estos indicadores posibilitaron establecer el impacto del microclima controlado en la calidad y el crecimiento de las plantas.

#### *VI-J. Análisis de eficiencia del sistema.*

Se evaluó la eficiencia del sistema tomando en cuenta su habilidad para mantener las condiciones de cultivo ideales con poca intervención humana, asegurando así un funcionamiento autónomo y una estabilidad ambiental. Para este propósito, se examinaron criterios vinculados con la estabilidad de la humedad del sustrato en el intervalo ideal para el crecimiento de las plantas, el control apropiado de la temperatura y la humedad relativa del aire, la regulación automática del alumbrado UV según las condiciones identificadas por los sensores y el funcionamiento autónomo y puntual del sistema de riego.

Se verificó que el sistema de riego solo se activó cuando los niveles de humedad bajaron del límite fijado, evitando así tanto la escasez de agua como el exceso que podría perjudicar al crecimiento de las raíces. Asimismo, se examinó el potencial del sistema de ventilación pasiva y del confinamiento estructural para mantener un microclima estable en la incubadora, disminuyendo así el impacto de los cambios ambientales externos. Además, se examinó la habilidad del sistema para producir datos de monitoreo de manera constante y fiable. Para comprobar la exactitud de las mediciones, la estabilidad del control ambiental y la respuesta automática que el sistema tiene frente a cambios en

las condiciones internas, se examinaron los datos guardados en la tarjeta SD. Este estudio posibilitó la detección de tendencias de conducta del microambiente y la verificación de la estabilidad del sistema a lo largo de extensos periodos operativos.

Se tuvo en cuenta, también, el consumo de energía del sistema como una medida adicional de eficiencia, analizando la utilización prudente de los actuadores y la iluminación artificial, que funcionan solamente cuando las condiciones lo exigen. Este método ayuda a mejorar el rendimiento del prototipo y a disminuir el consumo de energía durante su operación constante. Se consideró que el sistema operaba de manera eficaz cuando las variables ambientales se mantuvieron dentro de los límites apropiados para el cultivo, cuando los actuadores reaccionaron adecuadamente a las señales de control y cuando el sistema funcionó de forma independiente sin requerir intervención manual, asegurando así un ambiente estable y propicio para el crecimiento de las plantas.

*VI-J1. Análisis de variables del cultivo:* Para evaluar el desempeño de la incubadora automatizada y su influencia en el desarrollo vegetal, se consideraron variables asociadas al crecimiento físico de las plantas, al desarrollo fenológico y a las condiciones ambientales controladas dentro del sistema. El análisis conjunto de estos parámetros permitió relacionar el microclima generado en la cámara de cultivo con la respuesta fisiológica del cultivo.

Se consideró la altura de la planta como una variable del crecimiento vegetal, ya que es un indicador de la elongación y el vigor celular, los cuales están determinados por la temperatura, la radiación luminosa y la disponibilidad de agua. El diámetro del tallo se utilizó para evaluar la resistencia de la planta y su estado general, mientras que el área foliar fue analizada por su relación directa con la capacidad de fotosíntesis. El número de hojas se empleó, además, como un indicador del desarrollo vegetal y de la velocidad de crecimiento. Para determinar la adecuación de las condiciones iniciales del sustrato, se examinaron los días que tardó en germinar; además, se tomó como indicador de eficiencia productiva el tiempo necesario para llegar al tamaño óptimo de cosecha. Se lograron detectar eventuales situaciones de estrés ambiental a través de la observación de la floración temprana. Asimismo, se utilizaron los grados de día de crecimiento para calcular el desarrollo fisiológico acumulado a partir de la energía térmica que el sistema ha registrado.

La humedad relativa del aire y la temperatura son dos variables medioambientales que se monitorean, ya que tienen un impacto en el equilibrio hídrico de la planta, la transpiración y la actividad metabólica. La radiación luminosa, la cual se mide a través del sensor UV, hizo posible que se ajustara la iluminación artificial en los momentos en que los niveles eran insuficientes, asegurando así las condiciones óptimas para la fotosíntesis. Para impedir el estrés hídrico y propiciar la asimilación de nutrientes, se mantuvo la humedad del sustrato a través de un riego automatizado en niveles ideales. El estudio conjunto de estas variables posibilitó determinar el vínculo entre el control automatizado del microclima y la expansión del cultivo, demostrando que la regulación de la temperatura, el manejo de la humedad y el suministro controlado de luz propician un crecimiento vegetal parejo y eficaz en situaciones controladas.

*VI-J2. Consumo energético del sistema:* Se llevó a cabo una evaluación del consumo de energía vinculado con la operación de los componentes eléctricos y electrónicos principales del sistema, con el fin de establecer si el prototipo es sostenible y viable operativamente. Esta evaluación posibilitó la estimación de la demanda energética

en condiciones normales de funcionamiento y la valoración del diseño en cuanto a su eficiencia en términos de consumo racional de energía.

La estimación del consumo de energía se realizó teniendo en cuenta la utilización eléctrica de los sensores ambientales, la pantalla LCD, el microcontrolador, las lámparas UV y la bomba de agua. La estimación se hizo tomando como base el tiempo de funcionamiento real de cada elemento, poniendo un énfasis particular en el periodo activo de la luz artificial porque es el que mayor demanda energética tiene el sistema, y también en los ciclos intermitentes de activación de la bomba de riego. Se comprobó que los actuadores solo funcionan cuando las condiciones del ambiente lo exigen, lo cual disminuye el funcionamiento innecesario y mejora la eficiencia del consumo de electricidad. Esta perspectiva de control automatizado ayuda a optimizar la eficiencia energética del sistema, lo cual lo hace apto para ser utilizado en aplicaciones domésticas o en espacios con recursos energéticos limitados.

Además, el hecho de que los sensores y el microcontrolador necesiten poca potencia posibilita la continuidad del monitoreo sin que se vea incrementado sustancialmente el consumo total, lo cual contribuye a un desempeño sostenido y prolongado del sistema.

*VI-J3. Uso eficiente del agua en el sistema:* En lo que respecta al aprovechamiento del recurso hídrico, se analizó la eficacia del sistema de riego automatizado como un factor fundamental para mantener la sostenibilidad de las cosechas. El sistema puso en marcha la bomba solo cuando el nivel de humedad del sustrato bajó por debajo del límite fijado, lo que permitió evitar riegos innecesarios y disminuir el despilfarro de agua. Se examinó la estabilidad del microambiente radicular, la frecuencia con que se activa el riego y cuán bien puede el sistema conservar niveles de humedad adecuados. Esta regulación exacta posibilitó proporcionar solo la cantidad de agua necesaria para la planta, evitando tanto el déficit de agua como la saturación del sustrato, lo cual podría causar asfixia en las raíces y el crecimiento de patógenos.

El suministro controlado de agua contribuye además a conservar las propiedades físicas del sustrato, evitando la compactación y favoreciendo una adecuada aireación del sistema radicular. De esta manera, el riego automatizado no solo optimiza el uso del recurso hídrico, sino que también mejora las condiciones fisiológicas para el desarrollo vegetal. La regulación automática del riego es una táctica eficaz para emplear el agua de manera responsable. Esto es particularmente importante en las áreas urbanas o en lugares donde el acceso a este recurso hídrico es restringido.

## VII. RESULTADOS

Los resultados que se lograron a lo largo del diseño, la construcción y la implementación de una incubadora automatizada con riego regulado para el cultivo de *Lactuca sativa* se exponen en este capítulo. Se detallan las pruebas efectuadas para comprobar su funcionamiento y evaluar su desempeño bajo condiciones controladas, organizando los resultados de acuerdo con los objetivos específicos establecidos.

### VII-A. *Diseño estructural de la incubadora*

Para diseñar una estructura funcional, económica y duradera, se creó un prototipo compacto hecho de acero al carbono de bajo coste. Este fue protegido con pintura anticorrosiva para resistir las condiciones húmedas generadas por el riego.

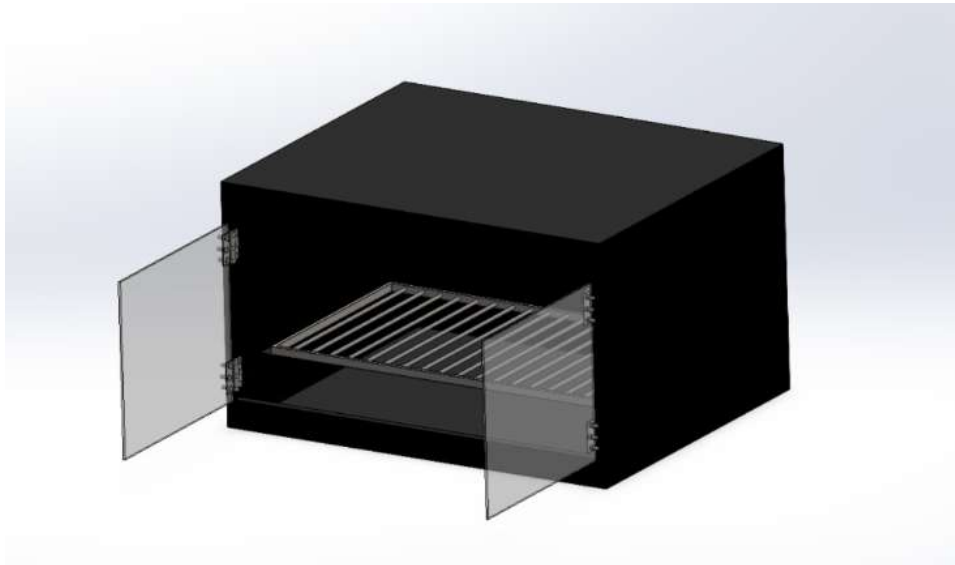


Figura 24. Estructura de la incubadora. Fuente: Los Autores.

En la figura 24 muestra la comprensión tridimensional del sistema que permite visualizar la disposición interna de la rejilla de soporte y el acceso frontal mediante compuertas abatibles. Se crearon detallados planos técnicos que posibilitaron la construcción exacta de la incubadora automatizada, como parte del proceso de realización del prototipo. Estos planos fueron la base para que la estructura se fabricara y ensamblara de manera apropiada, garantizando que los componentes mecánicos estuvieran correctamente dispuestos y el sistema de cultivo se integrara de forma funcional.

Los planos incluyeron el detalle dimensional de la rejilla de apoyo y del soporte de la maceta, componentes esenciales para garantizar que durante la operación las cargas estén bien distribuidas y el contenedor sea estable. Asimismo, se definieron los lugares de fijación estructural, la localización de los sensores y actuadores, así como las áreas reservadas para el sistema de riego y el cableado, posibilitando un ensamblaje eficiente y ordenado.

### VII-B. *Construcción del prototipo*

Para concretar el diseño estructural sugerido, se realizó la construcción del prototipo de la incubadora automatizada utilizando procedimientos tradicionales de fabricación metálica. Esta fase posibilitó comprobar la factibilidad de construcción del diseño y garantizar que los componentes funcionales y mecánicos del sistema estén correctamente

integrados.

La estructura principal fue elaborada utilizando perfiles metálicos de acero al carbono, que se eligieron por su resistencia a nivel mecánico, bajo costo y disponibilidad comercial. Para formar la estructura rectangular que brinda soporte y estabilidad al sistema, los componentes estructurales fueron soldados y cortados. Después, se colocó la rejilla de metal interna, que tiene como propósito sostener la maceta del cultivo y asegurar una distribución apropiada de cargas y resistencia ante el peso del sustrato húmedo.



Figura 25. Fabricación del armazón metálico y colocación de la rejilla de soporte del contenedor de cultivo. Fuente: Los Autores.

En la figura 25 se presenta el proceso de fabricación y consiste en la verificación de escuadras y alineaciones, así como el ensamblaje del bastidor estructural. Esto garantiza que el conjunto sea estable y rígido. Además, se incorporó la base interna donde está el contenedor de cultivo, lo que facilita su inserción y extracción para tareas de mantenimiento.

Después de que la estructura metálica fue terminada, se cubrió el gabinete con paneles protectores. Esto creó una cámara cerrada que posibilita mantener las condiciones internas controladas y proteger los componentes electrónicos del ambiente exterior. La superficie metálica fue tratada con pintura anticorrosiva para evitar que la corrosión ocurriera debido a la humedad producida por el sistema de riego, lo que mejoró la resistencia del prototipo ante ambientes húmedos y su durabilidad.



Figura 26. Prototipo final con gabinete protector y compuertas de acceso. Fuente: Los Autores.

En la figura 26 se muestra el prototipo final y como se colocaron compuertas frontales abatibles hechas de material transparente que permiten el acceso al área de cultivo sin modificar en gran medida las condiciones internas del microambiente. El resultado es un gabinete que, siendo compacto y robusto, tiene una funcionalidad diseñada para trabajar en espacios pequeños y ofrecer la protección necesaria al sistema automatizado.

#### *VII-C. Construcción y montaje del sistema de cultivo y riego*

El ensamblaje de los sistemas eléctrico y de riego se llevó a cabo después de que la construcción estructural del prototipo fue completada, con el propósito de integrar las partes responsables de la automatización y asegurar la operación conjunta de la incubadora.

Cunado se realizo el montaje del sistema se integraron las tiras de iluminación UV en la parte superior de la cámara de cultivo, permitiendo una distribución uniforme de la radiación sobre las bandejas de siembra, tal como se observa en la Figura 1. Esta disposición asegura que las plantas reciban iluminación homogénea, favoreciendo la fotosíntesis y el crecimiento controlado.

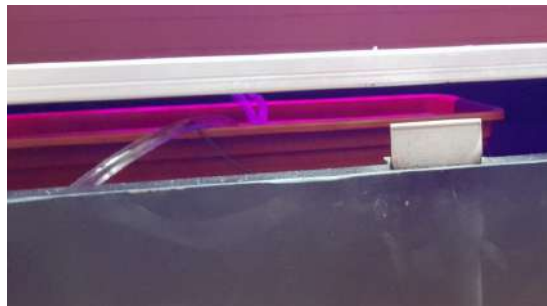


Figura 27. Instalacion de riego. Fuente: Los Autores.

En la figura 27 se muestra que el sistema de riego automatizado fue instalado mediante mangueras flexibles conectadas a una microbomba, las cuales conducen el agua directamente hacia el sustrato. Esta configuración permite una distribución uniforme del agua, evitando zonas secas o saturadas dentro de la maceta.

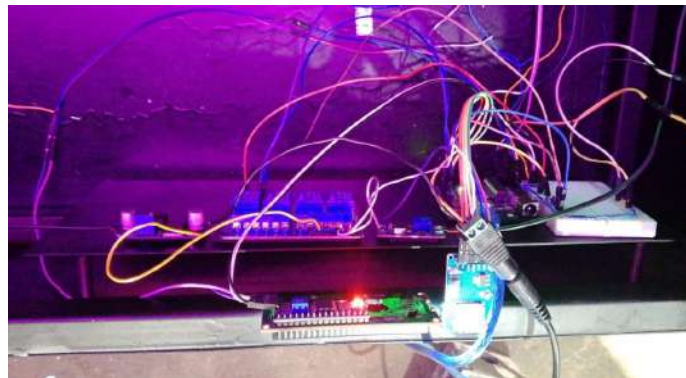


Figura 28. Organización del sistema eléctrico. Fuente: Los Autores.

En la figura 28 se muestra La organización del sistema electrónico que se realizó sobre paneles internos con el propósito de optimizar el aprovechamiento del espacio disponible y facilitar las labores de mantenimiento, inspección y sustitución de componentes . Esta disposición permite mantener un orden estructurado del cableado, proteger los circuitos frente a daños mecánicos y reducir la posibilidad de interferencias eléctricas. Además, el montaje en paneles internos contribuye a mejorar la ventilación de los dispositivos electrónicos y a preservar la integridad del sistema frente a la humedad generada por el riego.

En esta sección se integran el microcontrolador, pantalla LCD, el módulo de relés y las conexiones del sistema, constituyendo el núcleo de control del prototipo. El microcontrolador ejecuta las rutinas programadas para automatizar los procesos, mientras que el módulo de relés permite la conmutación segura de los dispositivos de mayor consumo, como la iluminación y la bomba de riego. La distribución ordenada de los conductores y puntos de conexión facilita la identificación de cada circuito, simplifica el diagnóstico de fallas y permite futuras ampliaciones, contribuyendo a la confiabilidad, seguridad eléctrica y eficiencia del sistema automatizado.

#### VII-D. Pruebas del sistema automatizado de iluminación UV

Con el objetivo de asegurar que dentro de la incubadora existan niveles apropiados de radiación lumínica, se estableció un sistema automatizado de iluminación UV que puede encenderse si los sensores identifican que la radiación es insuficiente. Este sistema posibilita la conservación de condiciones de luz constantes, lo que favorece el crecimiento homogéneo del cultivo y los procesos de fotosíntesis.



Figura 29. Lámpara UV encendida sobre del cultivo de lechuga. Fuente: Los Autores.

La Figura 29 muestra la ubicación de las lámparas UV en la parte superior del cuarto de cultivo, disposición que permite que la radiación lumínica se distribuya de manera homogénea sobre toda el área sembrada. Esta distribución uniforme se mantiene ya que el sensor detecta un nivel suficiente de radiación y mantiene las luminarias encendidas, asegurando una iluminación constante en la zona de cultivo. Esta configuración reduce la formación de zonas de sombra que podrían afectar el desarrollo equilibrado de las plantas y favorece que las hojas reciban luz de forma continua, optimizando la captación de energía necesaria para la fotosíntesis, especialmente durante las etapas iniciales de crecimiento. Además, contribuye a mejorar la eficiencia del sistema de iluminación dentro del microambiente controlado.



Figura 30. Mensaje del sistema “Baja UV – luces” durante condiciones lumínicas insuficientes. Fuente: Los Autores.

En la Figura 30 se evidencia el mensaje de activación por baja radiación (“Baja UV – luces”), confirmando la respuesta automática del sistema ante condiciones lumínicas insuficientes. El funcionamiento automático se supervisa mediante la interfaz de monitoreo, la cual muestra el estado de la radiación detectada y la activación de las luces UV, permitiendo verificar en tiempo real el comportamiento del sistema. Esta activación automática responde a la necesidad de mantener condiciones lumínicas adecuadas para el desarrollo fisiológico de las plantas dentro de un ambiente controlado. Cuando el sensor detecta que la radiación incidente es insuficiente, el microcontrolador interpreta esta condición como un déficit lumínico que podría afectar los procesos de fotosíntesis, elongación celular y formación de biomasa. En consecuencia, el sistema activa las luces UV/LED como fuente complementaria de iluminación, asegurando que el cultivo reciba la energía necesaria para sostener su crecimiento y mantener un desarrollo uniforme.

Sí el ciclo de tres horas de exposición lumínica termina, las luces Uv se regula apagando para evitar la sobreexposición lumínica, ya que una iluminación excesiva puede afectar negativamente el desarrollo fisiológico de las plantas. Aunque la luz es indispensable para la fotosíntesis, una exposición prolongada puede provocar estrés lumínico, deshidratación, incremento de la temperatura foliar y daños en los tejidos vegetales, reduciendo la eficiencia fotosintética. Además, los cultivos requieren de períodos de oscuridad para llevar a cabo las funciones respiratorias y metabólicas propias de su ciclo natural. Por lo tanto, el sistema automatizado regula los periodos de encendido y apagado, sosteniendo un balance entre la iluminación y el descanso biológico, lo que promueve un desarrollo saludable y mejora la eficiencia energética.

#### VII-E. Pruebas de funcionamiento de las variables y activación de riego

Para validar el funcionamiento integral del sistema automatizado de la incubadora, se llevaron a cabo ensayos experimentales dirigidos a verificar el funcionamiento de los módulos de control, sensores y actuadores en situaciones reales de cultivo. Estas pruebas hicieron posible comprobar la aptitud del sistema para funcionar de forma independiente, sostener condiciones ambientales apropiadas y registrar datos importantes para el monitoreo del crecimiento de las plantas.



Figura 31. Monitoreo de la variables. Fuente: Los Autores.

En la figura 31 se muestra que se verificó el funcionamiento del sistema de monitoreo ambiental en la etapa de evaluación, que mide constantemente la humedad relativa del aire, la temperatura interna y la humedad del sustrato. La pantalla LCD del sistema muestra en tiempo real estas variables, como la humedad ambiental, la temperatura interna y la humedad del suelo. Esta interfaz posibilita el monitoreo del estado del microambiente sin requerir herramientas externas.

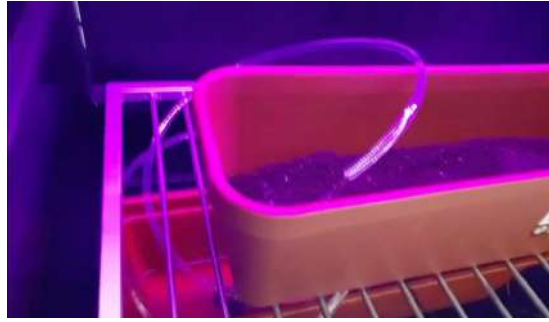


Figura 32. Activación de riego. Fuente: Los Autores.

En la figura 32 se confirmó que el sistema de riego se activa automáticamente cuando la humedad del sustrato cae por debajo del límite definido. Se lleva a cabo la distribución de agua a través de una manguera conectada al sistema, lo que asegura que el sustrato sea irrigado de manera uniforme. Este procedimiento garantiza que las condiciones sean apropiadas para el crecimiento inicial de las plántulas y previene el estrés hídrico.

Tiempo(s)	UV_Voltaje	UV_mW/cm <sup>2</sup>	Humedad del suelo	Humedad del aire	Luces	Bomba
423189	0.97	0.039	62.00	0.76	ON	OFF
423489	0.98	0.040	63.00	0.76	ON	OFF
423789	0.98	0.040	63.00	0.76	ON	OFF
424089	0.98	0.039	61.00	0.76	ON	OFF
424390	0.98	0.039	61.00	0.74	ON	OFF
424690	0.97	0.039	61.00	0.74	ON	OFF
424990	0.97	0.039	61.00	0.74	ON	OFF
425190	0.97	0.038	61.00	0.73	ON	OFF
425890	0.96	0.037	60.00	0.72	ON	OFF

Figura 33. Extracción de datos de la tarjeta SD. Fuente: Los Autores.

En la tabla de la figura 33 se muestra el almacenamiento de datos a través del registro ininterrumpido promediado de tres horas de funcionamiento en la tarjeta SD. Los datos que se recopilan incluyen la medición del medioambiente y el estado de funcionamiento del sistema, lo cual posibilita el análisis posterior de cómo se comporta el microclima interno.

Según la información recopilada, el sistema funciona de manera estable y óptima, manteniendo todas las variables en los márgenes establecidos para que el cultivo se desarrolle correctamente. La humedad del suelo se mantiene en cifras apropiadas (aproximadamente 60-63 %), a la vez que el voltaje y la radiación UV permanecen invariables, lo cual demuestra que hay suficiente agua disponible para las plantas. Además, la humedad del aire se mantiene constante, lo que ayuda a establecer un microclima controlado dentro de la incubadora. Las luces se mantienen encendidas para asegurar la cantidad de luz necesaria para el crecimiento, y la bomba de riego permanece apagada porque la humedad del sustrato está en un nivel adecuado, lo que previene el exceso de agua y garantiza una

utilización eficaz del sistema automático de riego.

Se constató en las pruebas operativas que el sistema opera de forma autónoma, sin necesitar intervención manual para supervisar el ambiente, controlar el riego o registrar datos. Esta automatización disminuye la exigencia de supervisión ininterrumpida y ayuda a que las condiciones del cultivo se mantengan estables.

#### *VII-F. Evaluación del desempeño del crecimiento*

Se comparó el crecimiento de *Lactuca sativa* durante un lapso de 21 días con el cultivo hecho a través del método tradicional, con la finalidad de establecer la eficacia de la incubadora automatizada creada. Los indicadores morfológicos y fisiológicos del desarrollo vegetal son los que se analizaron en la evaluación, ya que posibilitan medir de manera objetiva el impacto del control automatizado de riego, la iluminación UV-A y las condiciones ambientales internas. En este estudio, se registró cada semana la altura de la planta, el número de hojas y el color del follaje; al final del periodo de crecimiento.

*VII-F1. Altura de la planta:* Se observó un aumento gradual en ambos métodos de cultivo durante el tiempo de evaluación, lo que demuestra la factibilidad del crecimiento vegetal en diversas condiciones. Comenzamos desde la etapa de germinación:



Figura 34. Método tradicional germinación. Fuente: Los Autores.

En la figura 34 (método tradicional), la germinación está en una etapa muy temprana. La mayor parte de los alvéolos presentan solamente el sustrato húmedo, con poca emergencia visible de plántulas. Se observa únicamente un brote disperso con cotiledones que apenas se han desplegado, lo cual señala una germinación irregular y un crecimiento lento al principio. Esta variabilidad puede estar relacionada con factores ambientales no controlados,

tales como cambios en la temperatura, humedad irregular y una exposición variable a la luz.



Figura 35. Método incubadora germinación. Fuente: Los Autores.

En la figura 35 (método en incubadora), se presenta una condición de germinación más homogénea. A pesar de que las plántulas están todavía en una etapa temprana, la emergencia es más uniforme por todo el recipiente, lo que indica condiciones más propicias para el crecimiento inicial. El control de la luz, la humedad estable y la estabilidad térmica dentro de la incubadora contribuyen a que las semillas se activen metabólicamente y a que tengan un desarrollo más robusto. En la segunda semana de crecimiento, la comparación entre la incubadora y método tradicional evidencia diferencias notables en la altura de las plántulas, la uniformidad del desarrollo y el vigor vegetativo.



Figura 36. Método tradicional crecimiento segunda semana. Fuente: Los Autores.

En la figura 36 presenta un desarrollo desigual que representa el método tradicional. Se pueden observar plántulas con diferencias notables en su altura: las hay que tienen el tallo muy alargado (lo que podría ser una búsqueda de luz), y otras se mantienen pequeñas o crecen lentamente. Además, se reconocen alveolos con plántulas débiles o sin germinación, lo cual demuestra que las condiciones de la temperatura, la humedad y la exposición a la luz son variables.



Figura 37. Método incubadora crecimiento segunda semana. Fuente: Los Autores.

En la figura 37, que representa el sistema de incubadora, se nota un aumento más uniforme y vertical. Las plántulas tienen cotiledones bien desarrollados y tallos cortos pero fuertes, lo cual señala que están creciendo de manera compacta y sana. La altura es relativamente uniforme entre las plantas, reflejando condiciones ambientales estables, disponibilidad constante de humedad y una iluminación controlada que favorece la fotosíntesis sin provocar etiolación. En la segunda semana y media de desarrollo, se pueden notar diferencias más acentuadas en el crecimiento, la altura de las plántulas y la uniformidad del follaje:



Figura 38. Método tradicional crecimiento segunda y semana media. Fuente: Los Autores.

En la figura 38 el crecimiento sigue siendo irregular, que representa el método tradicional. Se observan plántulas de altura variable, algunas con tallos débiles y largos, y otras que se mantienen pequeñas o con un desarrollo escaso. Unas cuantas plantas tienen una ligera inclinación o marchitez y varias cavidades muestran germinación incompleta. Esto puede deberse a cambios en la humedad del sustrato, a que la ventilación es variable y a que la luz no se distribuye de manera equitativa. Estas circunstancias producen una competencia por los recursos y causan un desarrollo morfológico desigual.



Figura 39. Método incubadora crecimiento segunda semana y media. Fuente: Los Autores.

En la Figura 39 se muestra en relación al sistema de incubadora, se nota un desarrollo más uniforme y compacto. Las plantas tienen alturas parecidas, hojas más grandes y el follaje distribuido de manera uniforme. La fortaleza de los tallos y el verde vibrante son señales de un correcto proceso de fotosíntesis y un buen estado fisiológico. Un microambiente estable, una iluminación regulada y un suministro de agua constante favorecen un desarrollo balanceado y disminuyen el estrés en las plantas.

En la tercera semana de crecimiento, las diferencias en el estado fisiológico, la altura y el desarrollo morfológico entre el sistema tradicional y el cultivo en incubadora automatizada son muy evidentes.



Figura 40. Método tradicional crecimiento tercera semana. Fuente: Los Autores.

La Figura 40 representa el método tradicional, muestra un desarrollo de las plántulas demasiado largo y desor-

ganizado. Los tallos son finos, frágiles y tienen una elongación destacada, un fenómeno llamado etiolación. Este se origina debido a la falta de luz o a una distribución irregular de la misma. Las plantas presentan inclinación y entrelazamiento, así como hojas pequeñas y mal desarrolladas, lo que señala un vigor vegetativo débil y una mala eficacia de la fotosíntesis. Este modelo de crecimiento indica la presencia de competencia por la luz y condiciones ambientales no apropiadas.



Figura 41. Método incubadora crecimiento tercera semana. Fuente: Los Autores.

Por el contrario, en la Figura 41, correspondiente al sistema de incubadora, las plantas presentan un desarrollo compacto, uniforme y fisiológicamente saludable. Se observa una altura equilibrada, hojas bien formadas y un follaje denso con color verde intenso, indicadores de un adecuado contenido de clorofila y una fotosíntesis eficiente. La iluminación controlada, junto con la estabilidad térmica y la humedad constante, favorecen un crecimiento estructural firme y homogéneo.

Tiempo	Método	Altura de la planta (promedio)	Número de hojas (promedio cm)	Coloración del follaje (promedio)
<b>1 semana</b>	Tradicional	0.5 – 1.0	0 – 1	Verde claro irregular
	Incubadora	0.8 – 1.2	1 (cotiledones)	Verde claro uniforme
<b>2 semanas</b>	Tradicional	1.5 – 3.0	0 – 1	Verde pálido desigual
	Incubadora	2.5 – 4.0	2 – 3	Verde uniforme
<b>2,5 semanas</b>	Tradicional	3.0 – 5.5	1 – 2.2	Verde claro con variaciones
	Incubadora	4.0 – 6.0	2.5 – 4	Verde brillante uniforme
<b>3 semanas</b>	Tradicional	6.0-9.0	1.5 – 3	Verde pálido a amarillento
	Incubadora	5.0 – 7.0	4 – 6	Verde intenso uniforme

Figura 42. Comparación del crecimiento y desarrollo foliar de Lactuca sativa entre el método tradicional y la incubadora. Fuente: Los Autores.

En la tabla de la figura 42 compara el crecimiento de las plántulas cultivadas con el sistema de incubadora automatizada y con el método tradicional, tomando en cuenta la altura media, el número de hojas y la coloración del follaje en diferentes etapas de desarrollo, para resumir las diferencias detectadas durante el periodo evaluativo.

*VII-F2. Número de hojas:* El número de hojas es un indicador directo de la fuerza vegetativa y del avance fisiológico de las plántulas. Las diferencias notables en la uniformidad y el ritmo de crecimiento foliar durante el periodo de evaluación entre el método tradicional y el sistema de incubadora automatizada son evidentes. Los cotiledones iniciales surgen en la primera semana con los dos métodos, pero en el método tradicional su aparición es irregular y hay vacíos sin plántulas, lo que hace que muchas presenten entre 0 y 1 hojas. Por otro lado, la incubadora presenta una emergencia más uniforme, con cotiledones explicados uniformemente y un establecimiento más constante desde el principio.

En la segunda semana, las plántulas que han sido criadas en la incubadora muestran entre 2 y 3 hojas verdaderas, crecen de manera compacta y con una distribución balanceada. En el método convencional, por otro lado, predominan las plántulas con 0 a 1 hoja verdadera, mientras que otras tienen un desarrollo más lento, lo cual indica una heterogeneidad fisiológica. Hacia la segunda semana y media, el sistema automatizado promueve el crecimiento de las hojas, llegando a tener entre 2.5 y 4 hojas verdaderas por planta; esto amplía la zona de fotosíntesis. Sin embargo, en el método tradicional se mantienen diferencias notables, con valores cercanos a 1 o 2 hojas y una densidad foliar inferior.

Las plantas cultivadas en incubadora muestran de 4 a 6 hojas bien desarrolladas durante la tercera semana, lo cual indica un crecimiento vigoroso y un balance fisiológico apropiado. Según el método tradicional, las plantas tienen entre 1.5 y 3 hojas, que normalmente son más pequeñas y crecen de manera irregular a causa de la competencia por la luz y los procesos de etiolación.

*VII-F3. Coloración del follaje:* El color de las hojas es un indicativo visual del estado fisiológico de las plantas, porque muestra la concentración de clorofila, el balance nutricional y la eficacia fotosintética. Se observan diferencias significativas entre el sistema de incubadora automatizada y el método tradicional, según lo demuestra el análisis comparativo. Los dos métodos tienen cotiledones de un verde claro, típico del crecimiento inicial, durante las primeras fases de germinación. Sin embargo, en el método convencional, la tonalidad es irregular a causa de las fluctuaciones en la humedad del sustrato y la exposición a la luz; por otro lado, en la incubadora, el color es más uniforme.

La uniformidad cromática se hace más perceptible en el sistema automatizado alrededor de la segunda semana y media, en la que el follaje adquiere un verde brillante uniforme. El cultivo tradicional, por su parte, presenta variaciones de tonalidad y una intensidad cromática más baja debido a la inhomogeneidad en la distribución de la luz y las fluctuaciones ambientales.

Las plantas que se desarrollaron en la incubadora durante la tercera semana tienen follaje verde, con un tono uniforme e intenso, lo cual es indicativo de una buena salud fisiológica y de una actividad fotosintética eficaz. En contraste, en el método convencional se ven hojas amarillentas o de un verde pálido y señales de etiolación. Estos hallazgos demuestran que un microambiente regulado propicia la producción de clorofila y el equilibrio fisiológico, lo cual fomenta un follaje más robusto y saludable.

*VII-F4. Análisis comparativo del desempeño:* El estudio del rendimiento del crecimiento de *Lactuca sativa* a lo largo de los 21 días de evaluación hizo posible que se evidenciaran diferencias notables entre el cultivo tradicional y

el que se lleva a cabo en la incubadora automatizada. El sistema controlado demostró una emergencia más uniforme y simultánea desde la fase de germinación, lo cual contribuyó a un establecimiento inicial más estable. Las plantas que se cultivaron en la incubadora mostraron, a partir de la segunda semana, una altura media más elevada, tallos más robustos y un crecimiento compacto. En cambio, las plántulas del método tradicional evidenciaron alargamiento excesivo, desarrollo irregular y espacios vacíos de germinación, lo cual está relacionado con variaciones en el ambiente y una distribución no uniforme de la luz.

En lo que se refiere a los indicadores fisiológicos, el sistema automatizado fomentó una cantidad más elevada de hojas verdaderas y una expansión foliar más uniforme, con un promedio de cuatro a seis hojas bien desarrolladas hacia la tercera semana. Además, el follaje tuvo un color más uniforme e intenso, lo que indica una fotosíntesis efectiva y una mayor concentración de clorofila. En contraste, las hojas pequeñas, los colores no uniformes y las señales de etiolación fueron características del cultivo tradicional. En resumen, los hallazgos indican que la iluminación UV-A, el microambiente interno y la gestión automatizada del riego contribuyen a un desarrollo más óptimo de las plantas, una uniformidad morfológica más elevada y un crecimiento más robusto.

#### *VII-G. Justificación estructural de la iluminación fija y ausencia de orientación mecánica.*

El diseño del sistema de iluminación de la incubadora se concibió como una configuración estática de alta precisión, priorizando la estabilidad del microambiente interno, la confiabilidad de las mediciones y la seguridad operativa del prototipo. Aunque en la fase conceptual se consideró la orientación mecánica de las luminarias, las pruebas preliminares evidenciaron que una disposición fija permitía un control más estable y repetible de las condiciones internas.

Desde la perspectiva del control del microclima, la incubadora funciona como una cámara cerrada destinada a mantener valores estables de temperatura y humedad relativa. La integración de elementos móviles en el sistema de iluminación podría generar corrientes de aire internas y aportes térmicos indeseados, alterando la estabilidad del ambiente controlado y afectando la precisión de las mediciones registradas por los sensores ambientales. Por esta razón, se priorizó una estructura estanca que garantice condiciones constantes y lecturas confiables durante todo el ciclo de cultivo.

En términos de distribución lumínica, la instalación cenital fija permitió obtener una irradiación directa y uniforme sobre el área de cultivo. El acabado interior en negro mate fue seleccionado intencionalmente para absorber la radiación excedente y eliminar reflexiones internas, creando un entorno de absorción controlada. Esta configuración evita el ruido lumínico producido por rebotes de luz y asegura que la radiación recibida por las plantas provenga exclusivamente de la fuente directa, permitiendo una correlación precisa entre la intensidad lumínica medida por el sensor y la energía realmente absorbida por el cultivo.

Asimismo, la iluminación cenital fija favorece un fototropismo controlado, ya que las plantas responden únicamente al vector de luz descendente. Esto evita crecimientos irregulares provocados por reflejos laterales y promueve un desarrollo vertical uniforme, contribuyendo a la formación de estructuras foliares compactas y fisiológicamente saludables.

Desde el punto de vista estructural y de seguridad operativa, la fijación rígida de las luminarias proporciona estabilidad mecánica en un entorno con presencia constante de humedad debido al sistema de riego automatizado. Esta configuración reduce riesgos asociados a vibraciones, desplazamientos o fallas en conexiones eléctricas, incrementando la fiabilidad del sistema durante su funcionamiento continuo. Adicionalmente, el acabado interior oscuro contribuye a la absorción de radiación UV excedente, reduciendo posibles fugas lumínicas hacia el exterior y protegiendo tanto al usuario como a los componentes internos frente a la degradación por exposición prolongada a radiación ultravioleta.

Los resultados experimentales demostraron que esta configuración de iluminación estática permitió mantener una irradiancia uniforme y condiciones ambientales estables, favoreciendo un crecimiento homogéneo del cultivo. Por lo tanto, la ausencia de orientación mecánica no representa una limitación funcional, sino una decisión de diseño orientada a mejorar la precisión experimental, la estabilidad del microclima y la seguridad del sistema.

Como línea de trabajo futuro, se recomienda evaluar recubrimientos reflectantes internos combinados con sistemas de orientación lumínica ajustable, con el propósito de analizar posibles mejoras en la eficiencia energética y en la distribución difusa de la radiación.



## IX. PRESUPUESTO

La siguiente tabla muestra la distribución del presupuesto asignado, incluyendo los costos asociados a cada componente y recurso empleado en el desarrollo del proyecto.

Tabla II  
PRESUPUESTO DEL LA INCUBADORA DE LACTUCA SATIVA

Unidad	Componente	Precio (USD)
1	Maceta de plástico rectangular magnolia 18lts de capacidad	\$8,31
2	Planchas de acero negro de 2mm (122x244cm)	\$400
2	Planchas de acrílico de 6mm (120x90cm)	\$80
1	Paquete de 140 termoencogibles de diferentes medidas y colores.	\$6,20
2	Sensor de temperatura y humedad DTH22	\$15.79
1	Módulo step-down LM2596 input 4.5-40 VDC output 1.23-37V 3A con display	\$3.86
1	Módulo de 4 relés para Arduino	\$3,50
1	Adaptador electrónico de 5V-2A	\$4.55
1	Módulo adaptador I2C	\$3
1	Tira LED UV-A Phyto Lamp 5V (365-385 nm) - 1 tira (1m)	\$9.94
1	Módulo Sensor Luz Ultravioleta Uv ML8511	\$24
1	Paquete de jumpers	\$5
1	Pantalla LCD 1602 con I2C Arduino	\$7
1	Bomba de agua DC 5V 3M 100L/H	\$6
1	Arduino UNO	\$11
1	Módulo lectura escritura Micro SD	\$5
1	Tarjeta micro SD (32 GB) para registro	\$12.8
<b>TOTAL</b>		<b>\$606</b>

## REFERENCIAS

- [1] J. Roberts, *Todos los seres vivos: La gran carrera por entender la vida en la Tierra*. TAURUS, 2024.
- [2] National Geographic Society, *Half of Earth's Oxygen Comes from the Ocean*, <https://www.nationalgeographic.com/science/article/source-of-half-earth-s-oxygen-gets-little-credit>, [En línea]. Consultado el 4 de noviembre de 2025, 2023.
- [3] M. Soto-Hernández et al., «La fotosíntesis,» *Logos Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 2*, vol. 8, n.º 15, págs. 22-23, 2021.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *State of the World's Forests 2023: Deforestation Trends and Drivers*, <https://www.fao.org/documents/card/en?details=cb9360en>, [En línea]. Consultado el 4 de noviembre de 2025, 2023.
- [5] Universidad Politécnica Salesiana, «Pastos y forrajes del Ecuador 2021,» Universidad Politécnica Salesiana, inf. téc., 2021, [En línea]. Consultado el 4 de noviembre de 2025. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19019/4/PASTOS%20Y%20FORRAJES%20DEL%20ECUADOR%202021.pdf>.
- [6] G. M. Garnacho Saucedo, R. Salido Vallejo y J. C. Moreno Giménez, «Efectos de la radiación solar y actualización en fotoprotección,» *Anales de Pediatría*, vol. 92, n.º 6, 377.e1-377.e9, 2020, [En línea]. Consultado el 4 de noviembre de 2025. DOI: 10.1016/j.anpedi.2020.04.014. dirección: <https://analesdepediatria.org/es-efectos-radiacion-solar-actualizacion-fotoproteccion-articulo-S1695403320301661>.

- [7] J. Mulec, «Phototrophs in Caves,» en *Cave Ecology. Ecological Studies*, vol. 235, O. T. Moldovan, Kováč y S. Halse, eds., [En línea]. Consultado el 12 de junio de 2025, Springer, Cham, 2018, págs. 91-106. DOI: 10.1007/978-3-319-98852-8\_6. dirección: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-98852-8\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-98852-8_6).
- [8] Ayuda en Acción. «Efectos del cambio climático en la economía mundial.» [En línea]. Consultado el 4 de noviembre de 2025. (2020), dirección: <https://ayudaenaccion.org/blog/sostenibilidad/efectos-cambio-climatico-economia/>.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Sixth Assessment Report: Climate Change and the Biosphere*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/>, [En línea]. Consultado el 4 de noviembre de 2025, 2023.
- [10] J. Moreno. «Cambios bruscos de temperatura: cómo afectan a los cultivos y cómo moderar la respuesta de las plantas.» [En línea]. Consultado el 12 de junio de 2025. (2023), dirección: <https://ecoculturebs.com/cambios-bruscos-de-temperatura-como-afectan-a-los-cultivos-y-como-moderar-la-respuesta-de-las-plantas/>.
- [11] World Health Organization. «Radiación ultravioleta.» [En línea]. Consultado el 12 de junio de 2025. (2022), dirección: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ultraviolet-radiation>.
- [12] Venalsol Smart Light S.L. «Luz ultravioleta en horticultura: impacto y usos en el crecimiento de plantas.» [En línea]. Consultado el 4 de noviembre de 2025, Venalsol Smart Light Blog. (2024), dirección: <https://venalsol.com/es/blog/iluminacion-led/luz-ultravioleta-en-horticultura-impacto-y-usos-en-el-crecimiento-de-plantas.html>.
- [13] SolidPowerLED Blog. «Luz UV para plantas: definición, tipos y ventajas en la agricultura.» [En línea]. Consultado el 12 de junio de 2025. (2022), dirección: <https://solidpowerled.com/luz-uv-para-plantas-definicion-tipos-y-ventajas-en-la-agricultura/>.
- [14] Photon Force Ltd. «What is a SPAD Array?» [En línea]. Consultado el 12 de junio de 2025. (2024), dirección: <https://www.photon-force.com/what-is-a-spad-array/>.
- [15] Y. M. Bar-On, R. Phillips y R. Milo, «The biomass distribution on Earth,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, n.º 25, págs. 6506-6511, 2018.
- [16] A. Cantwell-Jones, J. Ball, D. Collar et al., «Global plant diversity as a reservoir of micronutrients for humanity,» *Nature Plants*, vol. 8, n.º 3, págs. 225-232, 2022.
- [17] VGD. «Radiación ultravioleta y sus efectos sobre las plantas.» [En línea]. Consultado el 23 de octubre de 2025. (2024), dirección: <https://vgd-led.com/es/Plantas-con-efectos-de-radiaci%C3%B3n-ultravioleta/>.
- [18] H. Heuberger, U. Praeger, M. Georgi, G. Schirmacher, J. Grasmann y W. H. Schnitzler, «Precision stressing by UV-B radiation to improve quality of spinach under protected cultivation,» en *VII International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Production, Pest Management and Global Competition 659*, 2004, págs. 201-206.
- [19] X. Chen. «Combinar tecnología y naturaleza para crear robots-plantas».» [En línea]. Consultado el 23 de octubre de 2025. (2021), dirección: <https://www.swissinfo.ch/spa/combinar-tecnolog%C3%ADa-y-naturaleza-para-crear-robots-plantas/46509854>.
- [20] L. F. Lozano-Castellanos, L. M. Navas-Gracia, I. C. Lozano-Castellanos y A. Correa-Guimaraes, «Technologies Applied to Artificial Lighting in Indoor Agriculture: A Review,» *Sustainability*, vol. 17, n.º 7, pág. 3196, 2025, [En línea]. Consultado el 23 de octubre de 2025. DOI: 10.3390/su17073196. dirección: <https://doi.org/10.3390/su17073196>.

- [21] H. Satria, M. Aldhi, S. Susilawati, P. Irwandi y A. E. Ridha, «Impact of Using Automatic Smart Control Technology Using UV Rays on Hydroponic Chili Plants,» *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, vol. 3, n.º 1, págs. 12-17, 2023.
- [22] J. M. Jiménez Alvarado y K. J. Sigüenza Brito, «Diseño y construcción de un reactor para el tratamiento de aguas residuales del proceso de tintura en la industria de la paja toquilla, empleando radiación UV y nanopartículas de dióxido de titanio como catalizador,» 2025.
- [23] J. A. Puerta-Ortiz y J. Morales-Aramburo, «Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes,» *Revista Colombiana de Cardiología*, vol. 27, págs. 61-71, 2020.
- [24] J. Rodríguez, P. Silva y L. Gomez, «Efectos de la radiación UV en respuestas fisiológicas de cultivos hortícolas,» *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 95, págs. 10-18, 2015, Accedido: 14-feb-2026. DOI: 10.1016/S0981-9428(15)30063-2.
- [25] A. del artículo, «Título del artículo,» *Redalyc*, vol. 49, n.º 006, 2022, Accedido: 13-feb-2026.
- [26] J. P. Fina, «Estudio del efecto de la radiación UV-B en plantas,» 2017.
- [27] A. del trabajo, *Determinación de los cambios físico-químicos y sensoriales por efecto de radiación UV-C en lechuga (Lactuca sativa) variedad Capitata*, <https://repositorio.uta.edu.ec/items/0ef1b0ab-19e8-4c60-8788-f7040988ccdc>, Accedido: 13-feb-2026, 2025.
- [28] E. D. de Villegas Álvarez, M. D. C. Menéndez, M. S. Martínez, M. C. Alonso y N. R. Viera, «Radiación ultravioleta. Fotoenvejecimiento cutáneo,» *MediSur*, vol. 3, n.º 1, págs. 14-33, 2005.
- [29] Proain. «Proain.» (2026), dirección: <https://proain.com/> (visitado 13-02-2026).
- [30] A. en la página, «Título del artículo en MDPI,» *Agronomy*, vol. 10, n.º 6, pág. 761, 2020, Accedido: 13-feb-2026. DOI: 10.3390/agronomy10060761.
- [31] E. Marino, M. Braun et al., «Modeling of radiation effects in plant tissues under UV exposure,» *European Physical Journal Plus*, vol. 132, pág. XXX, 2017, Accedido: 13-feb-2026. DOI: 10.1140/epjp/i2017-11298-x.
- [32] N. R. Baker, «Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo,» *Annual Review of Plant Biology*, vol. 59, págs. 89-113, 2008, Accedido: 13-feb-2026. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.
- [33] J. Emiliani, «Estudio del rol de distintas enzimas que participan en la vía de síntesis de flavonoides en la respuesta a la radiación UV-B en plantas,» 2014.
- [34] A. Rodríguez, M. López y J. Hernández, «Effect of UV radiation on plant physiological processes: Insights from studies on lettuce,» *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 129, págs. 45-52, 2013, Accedido: 14-feb-2026. DOI: 10.1016/S1011-1344(13)00194-2.
- [35] S. Gómez Vega, «Niveles de radiación ultravioleta (UV) en la ciudad de Ayacucho periodo 2006-2011 e incidencia de cáncer de piel en la población,» 2017.
- [36] Bures, *Iluminación artificial en agricultura*, [https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/iluminaci\\_n\\_artificial\\_en\\_agricultura.\\_bures\\_20250](https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/iluminaci_n_artificial_en_agricultura._bures_20250), Accedido: 17-feb-2026, 2025.
- [37] M. Amodio, A. Derossi y G. Colelli, «Modeling phenolic content during storage of cut fruit and vegetables: A consecutive reaction mechanism,» *Journal of Food Engineering*, vol. 140, págs. 1-8, 2014.
- [38] R. Barbato, A. Frizzo, G. Friso, F. Rigoni y G. Giacometti, «Degradation of the D1 protein of photosystem-II reaction centre by ultraviolet-B radiation requires the presence of the functional manganese on the donor side,» *European Journal of Biochemistry*, vol. 227, n.º 3, págs. 723-729, 1995.
- [39] I. Benzie y J. Strain, «The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay,» *Analytical Biochemistry*, vol. 239, n.º 1, págs. 70-76, 1996.

- [40] J. Bornman, «New trends in photobiology: Target sites of UV-B radiation in photosynthesis of higher plants,» *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 4, n.º 2, págs. 145-158, 1989.
- [41] W. Brand-Williams, M. Cuvelier y C. Berset, «Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity,» *Food Science and Technology*, vol. 28, págs. 25-30, 1995.
- [42] J. Dale, «The control of leaf expansion,» *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, vol. 39, págs. 267-295, 1988.
- [43] W. Du, R. Avena-Bustillos, A. Breksa y T. McHugh, «Effect of UV-B light and different cutting styles on antioxidant enhancement of commercial fresh-cut carrot products,» *Food Chemistry*, vol. 134, n.º 4, págs. 1862-1869, 2012.
- [44] W. Du, R. Avena-Bustillos, A. Breksa y T. McHugh, «UV-B light as a factor affecting total soluble phenolic contents of various whole and fresh-cut specialty crops,» *Postharvest Biology and Technology*, vol. 93, págs. 72-82, 2014.
- [45] V. Giaconi y M. Escaff, *Cultivo de hortalizas*, 15.ª ed. Santiago, Chile: Editorial Universitaria, 2004.
- [46] J. Gilsanz, *Hidroponía*. Montevideo, Uruguay: INIA, 2007.
- [47] S. Hagen, G. Borge, G. Bengtsson et al., «Phenolic contents and other health and sensory related properties of apple fruit (*Malus domestica* Borkh cv. Aroma): Effect of postharvest UV-B irradiation,» *Postharvest Biology and Technology*, vol. 45, n.º 1, págs. 1-10, 2007.
- [48] B. Harbaum-Piayda, B. Walter, G. Bengtsson, E. Hubbermann, W. Bilger y K. Schwarz, «Influence of pre-harvest UV-B irradiation and normal controlled atmosphere storage on flavonoid and hydroxycinnamic acid contents of pak choi,» *Postharvest Biology and Technology*, vol. 56, págs. 202-208, 2010.
- [49] D. Hoagland y D. Arnon, *The water-culture method for growing plants without soil*, California Agricultural Experiment Station, Circular No. 347, 1950.
- [50] D. Jacobo-Velázquez y L. Cisneros-Zevallos, «Correlations of antioxidant activity against phenolic content revisited: A new approach in data analysis for food and medicinal plants,» *Journal of Food Science*, vol. 74, n.º 9, R107-R113, 2009.
- [51] S. Kataria y K. Guruprasad, «Intraspecific variations in growth, yield and photosynthesis of sorghum varieties to ambient UV (280–400 nm) radiation,» *Plant Science*, vol. 196, págs. 85-92, 2012.
- [52] VGD-LED, *Rayonnements UV et effets sur les plantes*, <https://vgd-led.com/su/rayonnements-uv-effets-plantes/>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [53] B. L. Chiriboga Erazo y N. J. Mondragon Cortez, «Simulación usando labview de la radiación incidente sobre superficies bajo diferentes condiciones aplicando un modelo de la irradiancia solar basado en transmitancia,» B.S. thesis, 2011.
- [54] Helioesfera, *Irradiancia, irradiación y radiación solar*, <https://www.helioesfera.com/irradiacion-irradiacion-y-radiacion-solar/>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [55] U. I. Industrial, *Irradiancia, irradiación y radiación solar*, <https://blogs.udima.es/ingenieria-industrial/irradiacion-irradiacion-y-radiacion-solar/>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [56] A. M. Vélez-Pereira, E. Vergara Vásquez, W. Barraza Coronell y D. Agudelo Yepes, «Determinación de un modelo paramétrico para estimar la radiación solar,» *Ingenium*, vol. 7, n.º 18, pág. 11, 2013. DOI: 10.21774/ing.v7i18.347.

- [57] A. M. Vélez-Pereira, E. L. Vergara-Vásquez, W. D. Barraza-Coronell y D. C. Agudelo-Yepes, «Evaluación de un modelo estadístico para estimar la radiación solar en Magdalena, Colombia,» *TecnoLógicas*, vol. 18, n.º 35, pág. 35, 2015. DOI: 10.22430/22565337.196.
- [58] E. R. A. Larico, «Determinación de la energía solar para el diseño bioclimático de viviendas en la ciudad de Juliaca Región Puno,» Tesis de mtría., Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru), 2017.
- [59] J. Jiménez. «Crema solar: así funciona el protector solar sobre la piel.» Accessed: Nov. 17, 2025. (jun. de 2018), dirección: <https://www.xataka.com/medicina-y-salud/crema-solar-asi-functiona-protector-solar-piel>.
- [60] P. A. Q. Mejía, «Estudio in vitro de la supervivencia en células tumorales irradiadas con un acelerador lineal de uso clínico,» Tesis doct., Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012.
- [61] O. Cuadrado Vega, «Cosmética solar: el envejecimiento prematuro y la protección solar,» *Ciencia y Salud Virtual*, vol. 3, n.º 1, pág. 123, 2011. DOI: 10.22519/21455333.299.
- [62] C. Girado-Polo y L. Gónima-Gónima, «Algoritmo teórico para la estimación de la radiación solar global para una atmósfera despejada,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 42, n.º 162, pág. 104, 2018. DOI: 10.18257/raccefyn.610.
- [63] C. Julian-Benitez, «Estimación de la radiación solar en Iquitos,» *Folia Amazónica*, vol. 1, n.º 1-2, pág. 117, 2006. DOI: 10.24841/fa.v1i1-2.100.
- [64] H. A. Salinas Freire, O. Pérez Ones y S. Rodríguez Muñoz, «Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos,» *Revista ION*, vol. 32, n.º 1, págs. 7-20, 2019. DOI: 10.18273/revion.v32n1-2019001.
- [65] A. Lira-Oliver, «Radiación solar invisible y arquitectura,» *Bitácora Arquitectura*, n.º 35, pág. 116, 2017. DOI: 10.22201/fa.14058901p.2017.35.59713.
- [66] M. Corrales P. y V. Villegas Z., «Determinación de la cantidad de radiación solar incidente en paramentos verticales en W/m<sup>2</sup>h°C en diferentes direcciones a partir de la radiación horizontal incidente en la ciudad de Huaraz — Perú,» *Aporte Santiaguino*, vol. 6, n.º 1, pág. 43, 2013. DOI: 10.32911/as.2013.v6.n1.517.
- [67] I. Galindo, «Solar radiation information for energy technologists,» *Geofísica Internacional*, vol. 26, n.º 3, págs. 375-392, 1987. DOI: 10.22201/igeof.00167169p.1987.26.3.1311.
- [68] M. Armijos Cabrera, V. González Jaramillo y A. Fries, «Caracterización de variables meteorológicas a ser usadas como fuentes de energía en la región sur del Ecuador,» *Revista Geoespacial*, vol. 15, n.º 2, pág. 13, 2019. DOI: 10.24133/geoespacial.v15i2.1348.
- [69] S. M. UMich, *Energía nuclear benéfica para la agricultura*, [https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/382-numero-44/713-energia-nuclear-benefica-para-la-agricultura.html?tmpl=component&componentStyle=blog\\_3&print=1](https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/382-numero-44/713-energia-nuclear-benefica-para-la-agricultura.html?tmpl=component&componentStyle=blog_3&print=1), Accedido: 17-feb-2026, 2026.
- [70] A. Dsouza, L. Newman, T. Graham y E. D. Fraser, «Exploring the landscape of controlled environment agriculture research: A systematic scoping review of trends and topics,» *Agricultural Systems*, vol. 209, pág. 103 673, 2023, Accedido: 19-feb-2026. DOI: 10.1016/j.agsy.2023.103673.
- [71] D. Despommier, «The vertical farm: Controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations,» *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 2011.
- [72] H. Dou y et al., «Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments,» *Horticulturae*, 2017.

- [73] H. Dou y et al., «Responses of sweet basil to different daily light integrals in photosynthesis, morphology, yield, and nutritional quality,» *HortScience*, 2018.
- [74] A. Dsouza y et al., «A conceptual framework for incorporation of composting in closed-loop urban controlled environment agriculture,» *Sustainability*, 2021.
- [75] C. Eigenbrod y et al., «Urban vegetable for food security in cities: A review,» *Agronomy for Sustainable Development*, 2015.
- [76] M. Falagas y et al., «Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses,» *FASEB Journal*, 2008.
- [77] K. Folta, «Breeding new varieties for controlled environments,» *Plant Biology*, 2019.
- [78] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. Rome, Italy: FAO, 2017.
- [79] J. Germer y et al., «Skyfarming: An ecological innovation to enhance global food security,» *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 2011.
- [80] A. Glaros y et al., «Horizon scanning and review of the impact of five food and food production models for the global food system in 2050,» *Trends in Food Science and Technology*, 2021.
- [81] M. R. Intellect, *Leading Controlled Environment Agriculture (CEA) Companies*, <https://www.marketresearchintellect.com/es/blog/leading-controlled-environment-agriculture-companies/>, Accedido: 15-feb-2026, 2026.
- [82] Unknown, «Effect of temperature on photosynthesis of lettuce adapted to different light and temperature conditions,» *Scientia Horticulturae*, 1980.
- [83] I. Seginer, «Optimal greenhouse production under economic constraints,» *Agricultural Systems*, 1989.
- [84] C. Spitters, H. Toussaint y J. Goudriaan, «Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part I: Components of incoming radiation,» *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986.
- [85] E. Van Henten y et al., «Optimal control of greenhouse climate,» *Agricultural Systems*, 1994.
- [86] B. Acock, D. Charles-Edwards, D. Fitter, D. Hand, L. Ludwig y J. Warren-Wilson, «The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy models,» *Journal of Experimental Botany*, 1978.
- [87] J. Bensink, «On morphogenesis of lettuce leaves in relation to light and temperature,» *Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen*, 1971.
- [88] T. J. Ferrari, *Introduction to Dynamic Simulation*. Unknown, Unknown.
- [89] J. France y J. Thornley, *Mathematical Models in Agriculture*. Butterworths, 1984.
- [90] J. Goudriaan y H. Van Laar, «Calculation of daily totals of the gross CO<sub>2</sub> assimilation of leaf canopies,» *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1978.
- [91] E. Van Henten, «Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control,» *Agricultural Systems*, vol. 45, n.º 1, págs. 55-72, 1994, Accedido: 19-feb-2026. DOI: 10.1016/S0308-521X(94)90280-1.
- [92] A. Online, *Resif Greenhouse Technologies*, <https://www.agriexpo.online/es/prod/resif-greenhouse-technologies/product-190969-146976.html>, Accedido: 15-feb-2026, 2026.
- [93] AgriTech Tomorrow, *New York City, The Epicenter of Controlled Environment Agriculture (CEA)*, <https://www.agritechtomorrow.com/article/2021/09/new-york-city-the-epicenter-for-controlled-environment-agriculture-cea/13208>, Accedido: 22-mar-2022, 2021.

- [94] L. Albright, A. Both y A. Chiu, «Controlling greenhouse light to a consistent daily integral,» *Transactions of the ASAE*, vol. 43, págs. 421-431, 2000.
- [95] American Society of Agricultural Engineers, *Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses*, [https://ceac.arizona.edu/sites/default/files/asae\\_-\\_heating\\_ventilating\\_and\\_cooling\\_greenhouses.pdf](https://ceac.arizona.edu/sites/default/files/asae_-_heating_ventilating_and_cooling_greenhouses.pdf), ANSI/ASAE EP406.4 JAN03, 2003.
- [96] Athena Sustainable Materials Institute, *LCA, LCI, LCIA, LCC: what's the difference?* <http://www.athenasmi.org/resources/about-lca/whats-the-difference/>, Accedido: 19-nov-2022, 2017.
- [97] C. Barrett, «Overcoming global food security challenges through science and solidarity,» *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 103, n.º 2, págs. 422-447, 2021.
- [98] G. Bartzas, D. Zaharaki y K. Komnitsas, «Life cycle assessment of open field and greenhouse cultivation of lettuce and barley,» *Information Processing in Agriculture*, vol. 2, págs. 191-207, 2015.
- [99] Azud, *Cultivo de lechuga*, <https://azud.com/cultivo/lechuga/>, Accedido: 15-feb-2026, 2026.
- [100] P. Wu y et al., «Urban Controlled Environment Agriculture: A High-Level Review of Economic, Environmental, and Social Drivers and Outcomes,» *Sustainability*, vol. 13, n.º 17, pág. 9609, 2021, Accedido: 19-feb-2026. DOI: 10.3390/su13179609.
- [101] S. Graefe, A. Buerkert y E. Schlecht, «Trends and gaps in scholarly literature on urban and peri-urban agriculture,» *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 115, págs. 143-158, 2019. DOI: 10.1007/s10705-019-10017-1.
- [102] C. Aubry, J. Ramamonjisoa, M.-H. Dabat, J. Rakotoarisoa, J. Rakotondraibe y L. Rabeharisoa, «Urban agriculture and land use in cities: An approach with the multi-functionality and sustainability concepts in the case of Antananarivo (Madagascar),» *Land Use Policy*, vol. 29, págs. 429-439, 2012. DOI: 10.1016/j.landusepol.2011.08.009.
- [103] S. Lovell, «Multifunctional urban agriculture for sustainable land use planning in the United States,» *Sustainability*, vol. 2, págs. 2499-2522, 2010. DOI: 10.3390/su2082499.
- [104] M. Contesse, B. van Vliet y J. Lenhart, «Is urban agriculture urban green space? A comparison of policy arrangements for urban green space and urban agriculture in Santiago de Chile,» *Land Use Policy*, vol. 71, págs. 566-577, 2018. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.11.013.
- [105] A. Martínez y A. Leyva, «La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos,» *Cultivos Tropicales*, vol. 35, n.º 1, págs. 11-20, 2014.
- [106] Educo, *Las ventajas de tener un huerto urbano en casa*, <https://www.educo.org/blog/las-ventajas-de-tener-un-huerto-urbano-en-casa>, Accedido: 17-feb-2026, 2026.
- [107] Z. Teng, Y. Luo, J. Sun et al., «Effect of Far-Red Light on Biomass Accumulation, Plant Morphology, and Phytonutrient Composition of Ruby Streaks Mustard at Microgreen, Baby Leaf, and Flowering Stages,» *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 72, n.º 17, págs. 9587-9598, 2024. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c06834.
- [108] X. Zhao, M. Wang, X. Mao et al., «Full-Color Fluorescence of Carbonization-Triggered Carbon Dots for Multifunctional Light Module: Implications for Plant Lighting,» *ACS Applied Nano Materials*, vol. 7, n.º 6, págs. 5933-5942, 2024. DOI: 10.1021/acsanm.3c05660.
- [109] A. Sharma, C. Manpoong, V. S. Devadas, B. D. Kartha, H. Pandey y M. Wangsu, «Crop Hydroponics, Phyto-hydroponics, Crop Production, and Factors Affecting Soilless Culture,» *ACS Agricultural Science & Technology*, vol. 2, n.º 6, págs. 1134-1150, 2022. DOI: 10.1021/acsagscitech.2c00243.

- [110] Y. Dong, S. Abbas, A. Alam et al., «Light spectra and photoperiods interactively influence growth, development, and reproductive traits of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae),» *Crop Protection*, vol. 202, pág. 107 537, 2026. DOI: 10.1016/j.cropro.2026.107537.
- [111] A. Hernández-Lara, D. Almeida, T. F. F. da Silveira et al., «A Combination of LED and Compost to Improve *Spinacia oleracea* L. Quality and Chemical Composition,» *Horticulturae*, vol. 12, n.º 2, pág. 165, 2026. DOI: 10.3390/horticulturae12020165.
- [112] V. Obeysekara, T. A. Perera, L. N. C. De Silva y K. D. Sandaruwan, «GrowSphere: Intelligent Hydroponic System for Effortless Cultivation of Leafy Vegetables,» *IEEE Access*, vol. 14, págs. 2320-2334, 2026. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3650029.
- [113] C. Y. Moreno-Aguilera, R. O. Herrera-Arroyo, M. Santoyo-Mora et al., «Evaluation of LED Spectral Treatments on Morphological and Nutritional Parameters of Swiss Chard (*Beta vulgaris* var. *ciela*) in a Controlled Environment Agriculture System,» *Agriculture*, vol. 16, n.º 2, pág. 165, 2026. DOI: 10.3390/agriculture16020165.
- [114] J. H. Lee, E. A. Kim, Y. Sunwoo et al., «Light Spectrum Strategies to Optimize Yield and Physiological Performance of Korean Thistle (*Cirsium setidens* (Dunn) Nakai) in a Closed-type Plant Production System,» *Journal of People, Plants, and Environment*, vol. 28, n.º 6, págs. 799-823, 2025. DOI: 10.11628/ksppe.2025.28.6.799.
- [115] S. Tsiaparas, P. Kuchem, J. Krämer et al., «Influence of red- and blue-dominant light spectra on the biosynthesis of mono- and sesquiterpenes in mint (*Mentha × piperita*) essential oil,» *Food Chemistry*, vol. 496, pág. 146 731, 2025. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.146731.
- [116] M.-S. Yeom y M.-M. Oh, «Tailoring red, green, and blue LED spectra to improve yield and quality of *Glehnia littoralis*,» *Scientific Reports*, vol. 15, n.º 1, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-05402-5.
- [117] Z. N. Salem y M. A. Ahmed, «Effect of nutrient solution and substrates on the growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in hydroponic systems,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1549, n.º 1, pág. 012 097, 2025. DOI: 10.1088/1755-1315/1549/1/012097.
- [118] Blasstech, *Temperatura del suelo: clave para una agricultura óptima y sostenible*, <https://blasstech.cl/temperatura-del-suelo-clave-para-una-agricultura-optima-y-sostenible/>, Accedido: 16-feb-2026, 2026.
- [119] G. L. Silveira, M. G. F. Lima, G. B. dos Reis, M. J. Palmieri y L. F. Andrade-Vieria, «Toxic effects of environmental pollutants: Comparative investigation using *Allium cepa* L. and *Lactuca sativa* L.,» *Chemosphere*, vol. 178, págs. 359-367, 2017, Accedido: 19-feb-2026. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.048. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517304113>.
- [120] R. Grube, E. Brennan y E. Ryder, «Characterization and genetic analysis of a lettuce (*Lactuca sativa* L.) mutant, weary, that exhibits reduced gravitropic response in hypocotyls and inflorescence stems,» *Journal of Experimental Botany*, vol. 54, n.º 385, págs. 1259-1268, 2003.
- [121] R. Hay y J. Porter, *The Physiology of Crop Yield*. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2006, págs. 35-47.
- [122] I. Hiroshi, «The effects of temperature on the germination and radicle growth of photosensitive lettuce seed,» *Plant and Cell Physiology*, vol. 5, n.º 4, págs. 429-439, 1964.
- [123] A. Jarma, T. Rengifo y H. Araméndiz-Tatis, «Fisiología de estevia (*Stevia rebaudiana*) en función de la radiación en el Caribe Colombiano. II. Análisis de crecimiento,» *Agronomía Colombiana*, vol. 24, n.º 1, págs. 38-47, 2006.

- [124] M. Lynch y B. Walsh, *Genetics and Analysis of Quantitative Traits*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 1998.
- [125] W. Nascimento, «Preventing thermoinhibition in a thermosensitive lettuce genotype by seed imbibition at low temperature,» *Scientia Agricola*, vol. 60, n.º 3, págs. 477-480, 2003.
- [126] EOS, *Cultivo de lechuga*, <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-lechuga/>, Accedido: 16-feb-2026, 2026.
- [127] H. Wang, Z. Huang, M. Sun, R. Ma, C. Zhang y Z. Li, «Effects of Far-Red Light on Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Growth, Photosynthetic Efficiency, and Nutrient Accumulation in Controlled Environment Agriculture,» *Plants*, vol. 13, n.º 15, pág. 2051, 2024. DOI: 10.3390/plants13152051. dirección: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/15/2051>.
- [128] C. Du, Z. Li y M. Gong, «The adaptation to heat and chilling stresses and relation to antioxidant enzymes of maize seedlings induced by salicylic acid,» *Plant Physiology Communications*, vol. 41, págs. 19-22, 2005.
- [129] K. Townsley, K. Brennan y L. Huckins, «Massively parallel techniques for cataloguing the regulome of the human brain,» *Nature Neuroscience*, vol. 23, págs. 1509-1521, 2020. DOI: 10.1038/s41593-020-00744-3.
- [130] Y. Han, Z. Chen, S. Lv et al., «MADS-box genes and gibberellins regulate bolting in lettuce (*Lactuca sativa* L.),» *Frontiers in Plant Science*, vol. 7, pág. 1889, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.01889.
- [131] M. Galland, R. Huguet, E. Arc, G. Cuffe, D. Job y L. Rajjou, «Dynamic proteomics emphasizes the importance of selective mRNA translation and protein turnover during Arabidopsis seed germination,» *Molecular and Cellular Proteomics*, vol. 13, págs. 252-268, 2014. DOI: 10.1074/mcp.M113.031435.
- [132] P. Yang, X. Li, X. Wang, H. Chen, F. Chen y S. Shen, «Proteomic analysis of rice (*Oryza sativa*) seeds during germination,» *Proteomics*, vol. 7, págs. 3358-3368, 2007. DOI: 10.1002/pmic.200700124.
- [133] W. Wang, I. Møller y S. Song, «Proteomic analysis of embryonic axis of *Pisum sativum* seeds during germination and identification of proteins associated with loss of desiccation tolerance,» *Journal of Proteomics*, vol. 77, págs. 68-86, 2012. DOI: 10.1016/j.jprot.2012.07.001.
- [134] S. Kim, S. Kang, Y. Wang, S. Kim, H. Hwang y K. Kang, «Analysis of embryonic proteome modulation by GA and ABA from germinating rice seeds,» *Proteomics*, vol. 8, págs. 3577-3587, 2008. DOI: 10.1002/pmic.200800093.
- [135] L. Rajjou, M. Belghazi, R. Huguet et al., «Proteomic investigation of the effect of salicylic acid on Arabidopsis seed germination and establishment of early defense mechanisms,» *Plant Physiology*, vol. 141, págs. 910-923, 2006. DOI: 10.1104/pp.106.080804.
- [136] R. Yacoubi, C. Job, M. Belghazi, W. Chaibi y D. Job, «Proteomic analysis of the enhancement of seed vigour in osmoprimed alfalfa seeds germinated under salinity stress,» *Seed Science Research*, vol. 23, págs. 99-110, 2013. DOI: 10.1017/S0960258512000335.
- [137] H. Catão, D. Cardoso, G. Maciel, L. Gomes, A. Siquieroli y F. Neves, «Artificial neural networks discriminate lettuce seeds with different levels of thermoinhibition,» *Journal of Seed Science*, vol. 45, e202345016, 2023. DOI: 10.1590/2317-1545v45261573.
- [138] ALER. «Región: ¿Ciudades inteligentes, Internet de las cosas, inteligencia artificial al servicio de la ciudadanía?» (2021), dirección: <https://aler.org/region-ciudades-inteligentes-internet-de-las-cosas-inteligencia-artificial-al-servicio-de-la-ciudadania/> (visitado 13-02-2026).
- [139] E. Tsoumalakou, E. Mente, K. A. Kormas et al., «Precise Monitoring of Lettuce Functional Responses to Minimal Nutrient Supplementation Identifies Aquaponic System's Nutrient Limitations and Their Time-

- Course,» *Agriculture*, vol. 12, n.º 8, pág. 1278, 2022. DOI: 10.3390/agriculture12081278. dirección: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/8/1278>.
- [140] J. Rakocy, D. Bailey, R. Shultz y E. Thoman, «Update on Tilapia and Vegetable Production in the UVI Aquaponic System,» en *Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, Manila, Philippines: Creative Unlimited, 2004.
- [141] B. Delaide, G. Delhay, M. Dermience, J. Gott, H. Soyeurt y M. Jijakli, «Plant and Fish Production Performance, Nutrient Mass Balances, Energy and Water Use of the PAFF Box, a Small-Scale Aquaponic System,» *Aquacultural Engineering*, vol. 78, págs. 130-139, 2017. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2017.06.002.
- [142] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *The State of World Fisheries and Aquaculture*. Rome, Italy: FAO, 2014.
- [143] L. Robaina, J. Pirhonen, E. Mente, J. Sánchez y N. Goosen, «Fish Diets in Aquaponics,» en *Aquaponics Food Production Systems*, S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen y G. Burnell, eds., Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019, págs. 333-352, ISBN: 978-3-030-15942-9.
- [144] A. Endut, A. Jusoh, N. Ali, W. Wan Nik y A. Hassan, «A Study on the Optimal Hydraulic Loading Rate and Plant Ratios in Recirculation Aquaponic System,» *Bioresource Technology*, vol. 101, págs. 1511-1517, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.040.
- [145] A. Graber y R. Junge, «Aquaponic Systems: Nutrient Recycling from Fish Wastewater by Vegetable Production,» *Desalination*, vol. 246, págs. 147-156, 2009. DOI: 10.1016/j.desal.2008.03.048.
- [146] G. Rafiee, C. Ros Saad, M. Kamarudin, M. Ismail y K. Sijam, «Effects of Supplementary Nutrient in an Aquaponic System for Production of Ornamental Red Tilapia (*Oreochromis* sp.) and Lettuce (*Lactuca sativa* var. Longifolia),» *Survey in Fisheries Sciences*, vol. 5, págs. 65-75, 2019.
- [147] J. Rakocy, «Aquaponics: Integrating Fish and Plant Culture,» en *Aquaculture Production Systems*, 2012, págs. 344-386.
- [148] H. Roosta, «Effects of Foliar Spray of K on Mint, Radish, Parsley and Coriander Plants in Aquaponic System,» *Journal of Plant Nutrition*, vol. 37, págs. 2236-2254, 2014. DOI: 10.1080/01904167.2014.920384.
- [149] N. Kasozi, R. Tandlich, M. Fick, H. Kaiser y B. Wilhelmi, «Iron Supplementation and Management in Aquaponic Systems: A Review,» *Aquaculture Reports*, vol. 15, pág. 100221, 2019. DOI: 10.1016/j.aqrep.2019.100221.
- [150] A. Molassiotis, G. Tanou, G. Diamantidis, A. Patakas e I. Therios, «Effects of 4-Month Fe Deficiency Exposure on Fe Reduction Mechanism, Photosynthetic Gas Exchange, Chlorophyll Fluorescence and Antioxidant Defense in Two Peach Rootstocks Differing in Fe Deficiency Tolerance,» *Journal of Plant Physiology*, vol. 163, págs. 176-185, 2006. DOI: 10.1016/j.jplph.2005.03.008.
- [151] B. Delaide, S. Goddek, J. Gott, H. Soyeurt y M. Jijakli, «Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics,» *Water*, vol. 8, n.º 10, pág. 467, 2016. DOI: 10.3390/w8100467.
- [152] C. Nicoletto, C. Maucieri, A. Mathis et al., «Extension of Aquaponic Water Use for NFT Baby-Leaf Production: Mizuna and Rocket Salad,» *Agronomy*, vol. 8, n.º 5, pág. 75, 2018. DOI: 10.3390/agronomy8050075.
- [153] C. Galego, *El cultivo en hidropónico de lechuga es más rentable que en tierra*, <https://www.campogalego.es/el-cultivo-en-hidroponico-de-lechuga-es-mas-rentable-que-en-tierra/>, Accedido: 16-feb-2026, 2026.
- [154] A. Adak y et al., «A computational framework for modeling and predicting maize senescence: integrating UAV phenotyping, logistic growth, and genomics,» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025.

- [155] A. Afzal y et al., «Leaf thickness to predict plant water status,» *Biosystems Engineering*, 2017.
- [156] W. Li y et al., «Visible-infrared image matching based on parameter-free attention mechanism and target-aware graph attention mechanism,» *Expert Systems with Applications*, 2024.
- [157] Z. Liao y et al., «Potential of texture from SAR tomographic images for forest aboveground biomass estimation,» *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020.
- [158] X. Zhang y et al., «Non-destructive monitoring method for protected-lettuce based on multi-source image features and multi-modal attention mechanism,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. xxx, pág. xxx, 2026, Accedido: 19-feb-2026. DOI: 10.1016/j.compag.2026.1110.
- [159] J. Ma y et al., «Estimating above ground biomass of winter wheat at early growth stages using digital images and deep convolutional neural network,» *European Journal of Agronomy*, 2019.
- [160] A. Mortensen y et al., «Segmentation of lettuce in coloured 3D point clouds for fresh weight estimation,» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018.
- [161] M. Ojo y et al., «Estimating hydroponic lettuce phenotypic parameters for efficient resource allocation,» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024.
- [162] Y. Ren y et al., «Dual-extraction modeling: a multi-modal deep-learning architecture for phenotypic prediction and functional gene mining of complex traits,» *Plant Communications*, 2024.
- [163] A. Reyes-Yanes y et al., «Real-time growth rate and fresh weight estimation for little gem romaine lettuce in aquaponic grow beds,» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020.
- [164] Z. Rui y et al., «High-throughput proximal ground crop phenotyping systems – a comprehensive review,» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024.
- [165] M. Sandmann y et al., «Optical methods for the non-destructive estimation of leaf area index in kohlrabi and lettuce,» *Scientia Horticulturae*, 2013.
- [166] J. Shi y et al., «Simultaneous and nondestructive diagnostics of nitrogen/magnesium/potassium-deficient cucumber leaf based on chlorophyll density distribution features,» *Biosystems Engineering*, 2021.
- [167] A. Vit y et al., «Length phenotyping with interest point detection,» *Unknown Journal*, Unknown.
- [168] A. Aragón, *En las lechugas se logrará la oxidación retardada de las hojas*, <https://www.asesoresaragon.org/post/en-las-lechugas-se-lograra-la-oxidacion-retardada-de-las-hojas-248959>, Accedido: 16-feb-2026, 2026.
- [169] A. Aalok, A. Tripathi y P. Soni, «Vermicomposting: A better option for organic solid waste management,» *Journal of Human Ecology*, vol. 24, n.º 1, págs. 59-64, 2008.
- [170] M. Ansorena, *Sustratos propiedades y caracterización*. Madrid, España: Mundi-Prensa, 1994.
- [171] J. Arguello, L. Seisdedos, M. Díaz Goldfarb, E. Fabio, S. Núñez y A. Ledesma, «Modificaciones anatómicas y fisiológicas inducidas por residuos sólidos agrícolas (vermicompuesto) en plantines de lechuga (*Lactuca sativa* L.),» *YTON Revista Internacional de Botánica Experimental*, vol. 82, págs. 289-295, 2013.
- [172] L. Bárbaro, M. Karlanian, O. Valenzuela, C. Gallardo, J. González y C. Del Pardo, *Caracterización y evaluación de sustratos de siembra utilizados para el cultivo de especies ornamentales*, Disponible en <http://inta.gov.ar/documentos/caracterizacion-y-evaluacion-de-sustratos-de-siembra-utilizados-para-el-cultivo-de-especies-ornamentales-1/>, 2011.
- [173] L. Barbaro, A. Mazzoni, M. Karlanian, M. Fernandez y D. Morisigue, «Cenizas del volcán Puyehue como sustrato para plantas,» *Horticultura Argentina*, vol. 33, n.º 81, págs. 44-53, 2014.

- [174] M. Basheer y O. Agrawal, «Effect of vermicompost on the growth and productivity of tomato plant (*Solanum lycopersicum*) under field conditions,» *International Journal of Recent Scientific Research*, vol. 4, n.º 3, págs. 247-249, 2013.
- [175] C. Carranza, O. Lancho, D. Miranda y B. Chaves, «Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) 'Batavia' cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá,» *Agronomía Colombiana*, vol. 27, n.º 1, págs. 41-48, 2009.
- [176] M. De Boodt, O. Verdonck e I. Cappaert, «Method for measuring the water release curve of organic substrates,» *Acta Horticulturae*, vol. 37, págs. 2054-2062, 1974.
- [177] J. De Grazia, P. Tiftonell y A. Chiesa, «Efecto de sustratos con compost y fertilización nitrogenada sobre la fotosíntesis, precocidad y rendimiento del pimiento (*Capsicum annun*),» *Ciencia e Investigación Agraria*, vol. 34, n.º 3, págs. 195-204, 2006.
- [178] J. Di Rienzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C. Robledo, *InfoStat versión 2013*, Disponible en <http://www.infostat.com.ar>, 2013.
- [179] J. Domínguez, C. Lazcano y M. Brandón, «Influencia del vermicompost en el crecimiento de plantas. Aportes para la elaboración de un concepto objetivo,» *Acta Zoológica Mexicana*, vol. 26, n.º 2, págs. 359-371, 2010.
- [180] M. Fermino, «Métodos de análise para caracterização física de substratos para plantas,» Tesis doct., Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil, 2003.
- [181] P. Noguera, M. Abad, R. Puchades, A. Maqueira y V. Noguera, «Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium,» *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 34, págs. 593-605, 2003.
- [182] L. Paul y J. Metzger, «Impact of vermicompost on vegetable transplant quality,» *HortScience*, vol. 40, n.º 7, págs. 2020-2023, 2005.
- [183] M. Tatleri, V. Abdossi y Z. Ardebili, «The effects of different levels of vermicompost on growth and development of *Dracaena marginata*,» *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, vol. 4, n.º 4, págs. 784-786, 2013.
- [184] Antropocene, *Lactuca sativa*, <https://antropocene.it/es/2022/12/28/lactuca-sativa-3/>, Accedido: 13-feb-2026, 2022.
- [185] I. Tringosvska y T. Dintcheva, «Vermicompost as substrate amendment for tomato transplant production,» *Sustainable Agriculture Research*, vol. 1, n.º 2, págs. 115-122, 2012.
- [186] B. U. A. de Puebla, *Repositorio Institucional BUAP – Documento académico*, <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/b396398c-8747-44f4-a926-b4461666885d>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [187] Fruiver, *Iceberg*, <https://fruiver.com/iceberg/>, Accedido: 13-feb-2026, 2026.
- [188] O. Valenzuela, V. Lallana y A. Guerrero, «Caracterización física y química de lombricompuestos originados a partir de residuos de conejeras, estiércol vacuno y residuos domiciliarios,» *Revista Científica Agropecuaria*, vol. 2, n.º 1, págs. 45-48, 1998.
- [189] B. U. A. de Puebla, *Documento académico del repositorio BUAP*, <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/12bc5d71-836c-4006-a795-5634c224df33/content>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [190] A. E. Carrión Sarmiento, «Efecto de cuatro niveles de un bioactivador orgánico (Crecinitro) en la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. Iceberg),» Tesis de grado, 2025.
- [191] U. de San Carlos de Guatemala, *Repositorio USAC - Documento académico*, <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8303/>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.

- [192] U. de San Carlos de Guatemala, *Documento académico del Repositorio USAC*, <http://193.122.196.39:8080/xmlui/handle/10521/376>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [193] B. Capon, *Botany for Gardeners*, 3rd. Portland, OR, USA: Timber Press, 2019, Consultado en Google Books: <https://books.google.com.ec/books?id=WpfGDwAAQBAJ>.
- [194] W. S. Judd, C. S. Campbell, E. A. Kellogg, P. F. Stevens y M. J. Donoghue, *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach*, 3rd. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates, 2016, Consultado en Google Books: <https://books.google.com.ec/books?id=t0sPDQAAQBAJ>.
- [195] U. de San Carlos de Guatemala, *Repositorio USAC – Documento académico*, <http://www.repositorio.usac.edu.gt/7869/>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [196] U. C. de Santa María, *Registro académico del Repositorio ALiCiA*, [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM\\_ce3f0ba7c0fa2379d2aca125bc4e91db](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_ce3f0ba7c0fa2379d2aca125bc4e91db), Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [197] M. R. Niño de Guevara Zegarra, «Efecto del abonamiento orgánico en base a compost y biol en el rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. capitata en La Joya Antigua,» Tesis de grado, 2005.
- [198] S. F. Layza Paaredes, «Efecto del Biol como complemento a la fertilización nitrogenada en la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. Iceberg),» Tesis de grado, 2025.
- [199] F. Perez Leal, «Comparativo de tres sistemas hidropónicos (sistema de control automatizado, semi automatizado y no automatizado) en el rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*) en Pucallpa,» Tesis de grado, 2016.
- [200] A. Chino Labra, «Efecto de tres tipos de abono orgánico en la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. Iceberg y Boston) bajo condiciones ambientales del distrito de San Jerónimo – Región Cusco,» Tesis de grado, 2020.
- [201] Agroes, *Lechugas: descripción, morfología y ciclo*, <https://www.agroes.es/cultivos-agricultura/cultivos-huerta-horticultura/lechuga/402-lechugas-descripcion-morfologia-y-ciclo>, Accedido: 17-feb-2026, 2026.
- [202] E. J. Quispe Montoro, «Comportamiento agronómico de ocho cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.) según las etapas fenológicas principales en la costa central,» Accedido: 18-feb-2026, Tesis doct., Universidad Nacional Agraria La Molina, 2024.
- [203] A. Kumar, R. Yadav, S. Gupta et al., «Identification of genotypes and marker validation for grain filling rate and grain filling duration in wheat under conservation agriculture,» *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, vol. 78, págs. 309-316, 2018.
- [204] F. Carini, A. Cargneltitti, R. Pezzini, J. de Souza, G. Chaves y A. Procedi, «Nonlinear models for describing lettuce growth in autumn-winter,» *Ciencia Rural*, vol. 50, n.º 12, 2020.
- [205] C. Birch, «A New Generalized Logistic Sigmoid Growth Equation Compared with the Richards Growth Equation,» *Annals of Botany*, vol. 83, págs. 713-723, 1999.
- [206] S. Archontoulis y F. Miguez, «Nonlinear Regression Models and Applications in Agricultural Research,» *Agronomy Journal*, vol. 107, págs. 786-798, 2015.
- [207] Q. Li y et al., «Describing Lettuce Growth Using Morphological Features with Nonlinear Models,» *Agronomy*, vol. 12, n.º 4, pág. 860, 2022, Accedido: 18-feb-2026. DOI: 10.3390/agronomy12040860.
- [208] U. Karadavut, C. Palta, K. Kokten y A. Bakoglu, «Comparative Study on Some Non-linear Growth Models Describing Leaf Growth of Maize,» *International Journal of Agriculture and Biology*, vol. 12, págs. 227-230, 2010.

- [209] A. Tsoularis y J. Wallace, «Analysis of logistic growth models,» *Mathematical Biosciences*, vol. 179, págs. 21-55, 2002.
- [210] R. Veloso, L. Winkelstroter, M. Silva et al., «Selection and classification of multivariate nonlinear models for broilers,» *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, vol. 68, págs. 191-200, 2016.
- [211] Y. Wang, S. Yang, W. Qian y X. Li, «Forecasting New Product Diffusion Using Grey Time-Delayed Verhulst Model,» *Journal of Applied Mathematics*, pág. 625 028, 2013.
- [212] F. Shaikh, Q. Ji, P. Shaikh, N. Mirjat y M. Uqaili, «Forecasting China's natural gas demand based on optimised nonlinear grey models,» *Energy*, vol. 140, págs. 941-951, 2017.
- [213] C. Paine, T. Marthews, D. Vogt et al., «How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: An update for ecologists,» *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 3, págs. 245-256, 2012.
- [214] W. Wardhani y P. Kusumastuti, «Describing the height growth of corn using Logistic and Gompertz model,» *Agrivita Journal of Agricultural Science*, vol. 35, págs. 237-241, 2013.
- [215] C. Muianga, J. Muniz, M. Nascimento, T. Fernandes y T. Savian, «Description of the Growth Curve of Cashew Fruits in Nonlinear Models,» *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 38, págs. 22-32, 2016.
- [216] A. Mello, M. Toebe, R. de Souza et al., «Nonlinear models in the height description of the Rhino sunflower cultivar,» *Ciencia Rural*, vol. 52, n.º 8, 2022.
- [217] T. Ribeiro, T. Savian, T. Fernandes y J. Muniz, «The use of the nonlinear models in the growth of pears of 'Shinseiki' cultivar,» *Ciencia Rural*, vol. 48, n.º 7, 2018.
- [218] R. Pezzini, A. Cargnelutti, C. de Bem et al., «Gompertz and Logistic models for morphological traits of sudangrass cultivars during sowing seasons,» *Semina: Ciências Agrárias*, vol. 40, págs. 3399-3417, 2019.
- [219] EOS, *Cultivo de lechuga*, <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-lechuga/>, Accedido: 13-feb-2026, 2026.
- [220] U. N. A. L. Molina, *Documento del repositorio: (título específico si lo hay)*, <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1e53fb26-566b-41f1-b7b6-fb080b8ce231/content>, Accedido: 18-feb-2026, 2026.
- [221] T. Harwood, F. Al Said, S. Pearson, S. Houghton y P. Hadley, «Modelling uncertainty in field grown iceberg lettuce production for decision support,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 71, págs. 57-63, 2010, Accedido: 18-feb-2026. DOI: 10.1016/j.compag.2009.12.003.
- [222] J. Hansen y et al., «Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya,» *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004.
- [223] J. Hansen y et al., «Using a general circulation model to forecast regional wheat yields in northeast Australia,» *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004.
- [224] L. Incrocci y et al., «Soil-less indoor-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.): approaching the modelling task,» *Environmental Modelling & Software*, 2006.
- [225] P. Racsco y et al., «A serial approach to local stochastic weather models,» *Ecological Modelling*, 1991.
- [226] H. Strandman y et al., «A procedure for generating synthetic weather records in conjunction of climatic scenario for modelling of ecological impacts of changing climate in boreal conditions,» *Ecological Modelling*, 1993.
- [227] T. Wheeler y et al., «Effects of temperature on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and the implications for assessing the impacts of potential climate change,» *European Journal of Agronomy*, 1993.
- [228] F. Al Said, *The effect of temperature and photoperiod on growth and development of iceberg lettuce (*Lactuca sativa* L.)* Tesis o documento académico, 2000.

- [229] E. Barrow y et al., «Climate change scenarios with high spatial and temporal resolution for agricultural applications,» *Forestry*, 1995.
- [230] M. Borg, *Getting Ready For Summer*, Tesco Internal Report, 1998.
- [231] W. Dullforce, *Analysis of the growth of winter glasshouse lettuce varieties*.
- [232] T. Harwood, «A dynamic three-dimensional plant-microclimate model, .<sup>Ec</sup>ospace»,» Tesis doct., University of Reading, 1996.
- [233] T. Harwood y et al., «A dynamic three-dimensional plant-microclimate model .<sup>Ec</sup>ospace»,» *Aspects of Applied Biology*, 1996.
- [234] R. Mercados, *La mayor adaptabilidad en lechuga Iceberg*, <https://revistamercados.com/la-mayor-adaptabilidad-en-lechuga-iceberg/>, Accedido: 13-feb-2026, 2025.
- [235] B. Arduino, «Arduino uno,» *Datasheet.(Downloaded: 13 Jun 2020)*. <https://datasheet.octopart.com/A000066-Arduino-datasheet-38879526.pdf>, 2015.
- [236] J. S. Pérez, J. E. M. Buitrago y L. E. B. Torres, «Implementación de un sistema de monitoreo de temperatura ambiente, humedad relativa y calidad del ambiente en áreas críticas de una IPS,» 2024.
- [237] N. Miura, T. Chiba, H Yamada y S Baba, «Development of Silicon-on-Insulator (SOI) Uv Sensor IC,» *OKI Technical Review*, vol. 74, n.º 3, págs. 38-39, 2007.
- [238] L. A. Rivera Marchant, «Efecto de la radiación ultravioleta-B en la capacidad antioxidante de lechugas (*Lactuca sativa* L.) "baby"hidropónicas,» Repositorio Institucional Universidad de Chile, Memoria para optar al título de Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile, 2014. dirección: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148401>.
- [239] C. A. Ricaurte Rincón et al., «Análisis del efecto de la implementación de tecnología IoT en cultivos de *Lactuca sativa* (lechuga) en invernaderos en Colombia para promover la agricultura sostenible,»
- [240] L. Antonini, J. R. Osio y J. A. Rapallini, «Lector de tarjetas SD en microcontrolador NXP,» en *II Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería (ITE)(La Plata, 2013)*, 2013.
- [241] B. L. Duarte Burgos et al., «Desarrollo de un prototipo de sistema de riego automatizado para un cultivo de fresa,»
- [242] J. Aux y L. Benavides, «Control automatizado de un sistema de riego y fertirriego,» 2015.
- [243] Naylamp Mechatronics. «Módulo Relay 4 canales 5VDC optoacoplado.» Ficha técnica de producto. (s.f.), dirección: <https://naylampmechatronics.com/drivers/152-modulo-relay-4-canales-5vdc.html>.
- [244] V. R. Machaca Limahuay, «Elaboración de un sistema electrónico para el control y monitoreo del consumo de agua potable mediante un servidor web,» 2025.
- [245] J. Rodríguez Montes et al., «Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED,» 2019.
- [246] R. P. Cabascango Tisalema y A. R. Chasi Masabanda, «Construcción de un prototipo electrónico inteligente para la incubación artificial de huevos.,» 2024.

## X. CONCLUSIONES

Se pudo verificar que el control del microambiente ejerce un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo de *Lactuca sativa*, evidenciando que la regulación precisa de variables como la humedad, el riego y la iluminación constituye un factor determinante en la calidad fisiológica del cultivo. La implementación de una incubadora automatizada permitió generar un entorno estable y controlado, reduciendo la variabilidad asociada a las condiciones externas y proporcionando parámetros óptimos para el desarrollo vegetal. Esta estabilidad ambiental favoreció procesos fundamentales como la fotosíntesis, la transpiración y la absorción de nutrientes, traduciéndose en un crecimiento uniforme y saludable.

En relación con el objetivo general planteado, se logró diseñar y construir una incubadora automatizada capaz de optimizar el crecimiento de la lechuga mediante la regulación de la intensidad lumínica, especialmente en el espectro UV. La integración de un sistema de control permitió ajustar los niveles de radiación de acuerdo con los requerimientos del cultivo, evitando tanto la sobreexposición como la deficiencia lumínica. Este equilibrio contribuyó a mantener una morfología compacta, reducir la elongación excesiva del tallo (etiología) y promover una pigmentación más intensa, asociada a un adecuado desarrollo fotosintético.

Desde el punto de vista estructural, la selección de acero al carbono recubierto con pintura anticorrosiva demostró ser una alternativa técnicamente viable y económicamente accesible para entornos con alta humedad relativa. Este material ofreció la resistencia mecánica necesaria para soportar el sistema de cultivo y los componentes electrónicos, al mismo tiempo que protegió los elementos sensibles frente a la corrosión y el deterioro prematuro. Además, el diseño estructural facilitó las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, incrementando la vida útil del sistema y reduciendo los costos operativos a largo plazo.

En cuanto al sistema de iluminación automatizada, los ensayos experimentales evidenciaron que la regulación dinámica de la radiación UV permitió mantener niveles constantes de intensidad lumínica, garantizando una distribución homogénea sobre el dosel vegetal. La configuración cenital fija contribuyó a la estabilidad térmica y lumínica dentro del microambiente, evitando sombras irregulares y diferencias en el crecimiento entre plantas. Esta uniformidad se reflejó en mayor consistencia en el tamaño, número de hojas y coloración del cultivo evaluado.

Por su parte, el sistema de riego automatizado respondió de manera eficiente a las variaciones en la humedad del sustrato, activándose cuando los valores descendían por debajo del umbral previamente establecido. Este mecanismo de retroalimentación permitió suministrar agua de forma oportuna y controlada, evitando tanto el estrés hídrico por déficit como la saturación excesiva del sustrato. La hidratación homogénea favoreció el desarrollo radicular y optimizó la absorción de nutrientes, impactando positivamente en el crecimiento general del cultivo. Asimismo, la automatización redujo la intervención manual, minimizando errores humanos y mejorando la eficiencia operativa del sistema.

Los resultados comparativos entre el cultivo desarrollado en la incubadora y el método convencional evidenciaron diferencias significativas en términos de uniformidad, vigor y calidad visual. Durante los 21 días de evaluación, las plantas cultivadas en el sistema automatizado presentaron mayor número de hojas, un color verde más intenso y una estructura más compacta. La germinación fue más homogénea y el desarrollo fisiológico mostró mayor estabilidad, confirmando la influencia directa del control ambiental en las primeras etapas del ciclo productivo.

Adicionalmente, la reducción de la variabilidad ambiental contribuyó a minimizar factores de estrés abiótico que comúnmente afectan el rendimiento en sistemas tradicionales. La estabilidad en temperatura, humedad e iluminación permitió mantener condiciones cercanas a los rangos óptimos de crecimiento, mejorando la eficiencia metabólica de la planta y favoreciendo una producción más predecible. Esto representa una ventaja considerable para sistemas de producción en espacios reducidos, agricultura urbana o entornos con limitaciones climáticas.

En términos de aplicabilidad, el sistema desarrollado constituye una alternativa viable para pequeños productores, proyectos de investigación y entornos educativos, ya que combina automatización, control ambiental y eficiencia en el uso de recursos. La posibilidad de adaptar parámetros como la intensidad lumínica, la frecuencia de riego y los niveles de humedad abre la puerta a futuras investigaciones orientadas a optimizar distintos cultivos o evaluar respuestas fisiológicas bajo condiciones controladas.

Finalmente, se concluye que la incubadora automatizada diseñada no solo cumple con los objetivos planteados, sino que demuestra el potencial de la integración tecnológica en la agricultura de precisión. El control del microambiente, apoyado en sistemas automatizados, representa una herramienta eficaz para mejorar la calidad, uniformidad y rendimiento de *Lactuca sativa*. En consecuencia, este tipo de soluciones tecnológicas puede contribuir al fortalecimiento de sistemas productivos sostenibles, eficientes y adaptables a las demandas actuales de seguridad alimentaria y optimización de recursos.

## XI. RECOMENDACIONES

Con el fin de optimizar aún más el crecimiento de las plantas y perfeccionar el control del microambiente, se recomienda incorporar sensores adicionales que permitan medir variables complementarias como la concentración de CO<sub>2</sub>, la conductividad eléctrica (CE) y el pH del sustrato. El monitoreo de parámetros facilitaría un control más integral del entorno de cultivo, permitiendo ajustar de manera precisa los niveles de fertilización y ventilación. De esta manera, se podría mejorar la eficiencia fotosintética y la absorción de nutrientes, fortaleciendo el desarrollo fisiológico de las plantas y aumentando la productividad del sistema.

Asimismo, para incrementar la eficiencia energética y la autonomía operativa del prototipo en aplicaciones reales, se sugiere evaluar la implementación de fuentes de energía renovable, particularmente sistemas fotovoltaicos mediante paneles solares. Esta integración permitiría reducir el consumo de energía proveniente de la red eléctrica, disminuir costos operativos y favorecer la sostenibilidad ambiental del sistema. Complementariamente, podría considerarse la incorporación de baterías de almacenamiento energético que garanticen el funcionamiento continuo del sistema ante variaciones en el suministro eléctrico.

Se recomienda también desarrollar e implementar un sistema de monitoreo remoto basado en conectividad inalámbrica (Wi-Fi o tecnología IoT), que permita la supervisión en tiempo real de las variables ambientales y del funcionamiento general del prototipo. La integración de plataformas digitales o aplicaciones móviles facilitaría el registro histórico de datos, el análisis estadístico de parámetros de cultivo y la toma de decisiones basada en información objetiva.

Para investigaciones futuras, se aconseja evaluar el desempeño del sistema con distintas especies hortícolas, comparando variables como tiempo de germinación, tasa de crecimiento, biomasa producida y calidad nutricional. Además, sería pertinente analizar el efecto de diferentes espectros de luz (combinaciones de luz roja, azul, blanca y UV) sobre el desarrollo morfológico y fisiológico de cada especie, con el propósito de determinar configuraciones lumínicas óptimas según el tipo de cultivo.

Del mismo modo, se sugiere estudiar la implementación de cubiertas reflectantes internas o sistemas de orientación regulable, con el fin de optimizar la distribución de la radiación dentro del microambiente. Esto podría contribuir a reducir pérdidas energéticas y mejorar la uniformidad del cultivo. La incorporación de sistemas de control inteligente basados en algoritmos adaptativos o modelos predictivos también podría representar una mejora significativa en la eficiencia del prototipo.

Finalmente, se recomienda realizar estudios de escalabilidad para adaptar el sistema a aplicaciones de mayor capacidad, tanto en agricultura urbana como en producción comercial a pequeña y mediana escala. Dichos estudios deberían considerar aspectos como costos de implementación, consumo energético, mantenimiento, retorno de inversión y viabilidad técnica. La validación en escenarios reales permitiría determinar el potencial del prototipo como una alternativa tecnológica sostenible y competitiva dentro de sistemas de agricultura controlada.

# ANEXO A PLANOS

Planos de las piezas acotadas del prototipo de una incubadora de lactuca sativa en SOLIDWORKS 2025:



Figura 44. Estructura de acero negro para la base. Fuente: Los autores.

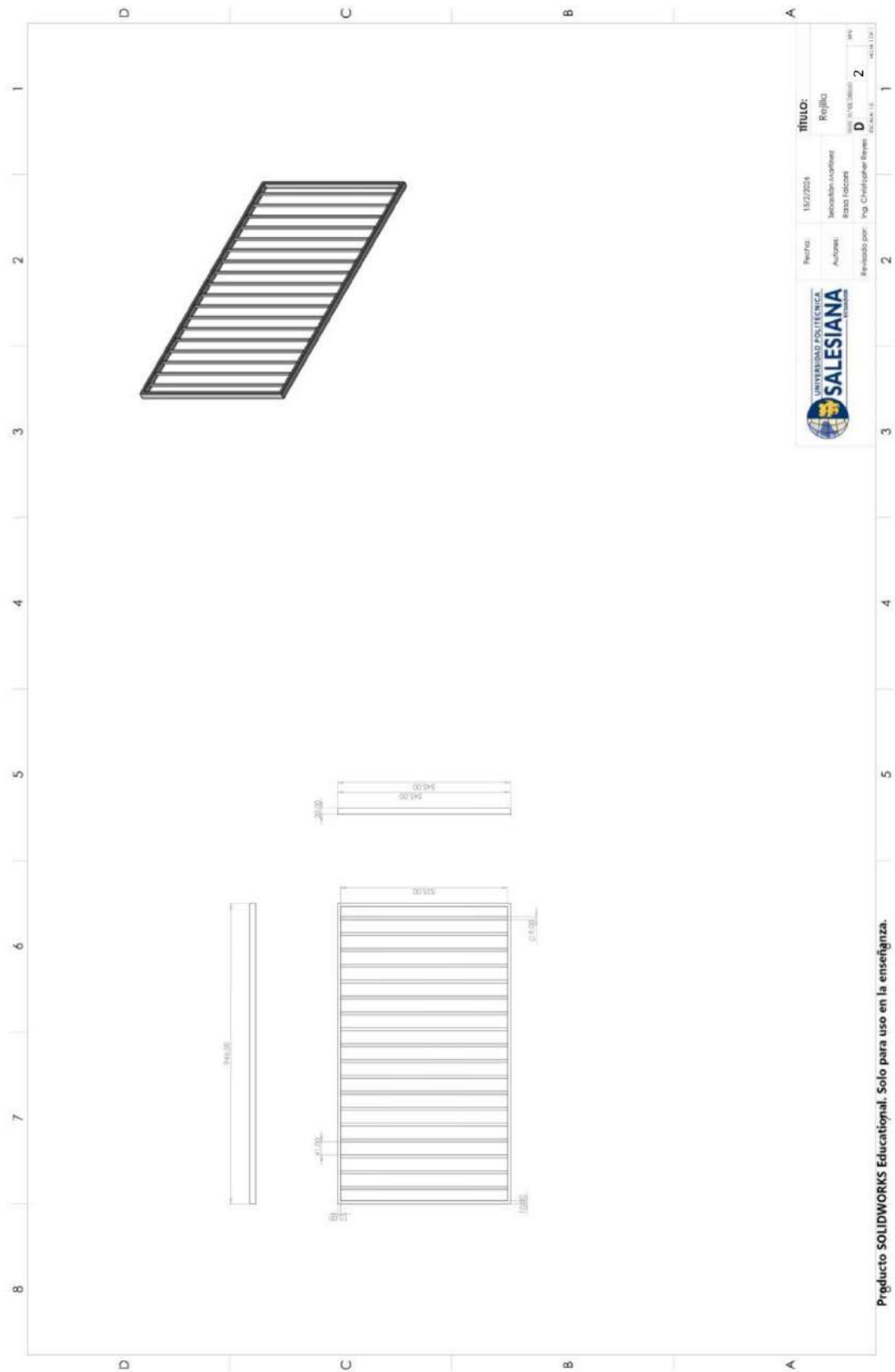


Figura 45. Rejilla de acero inoxidable. Fuente: Los autores.

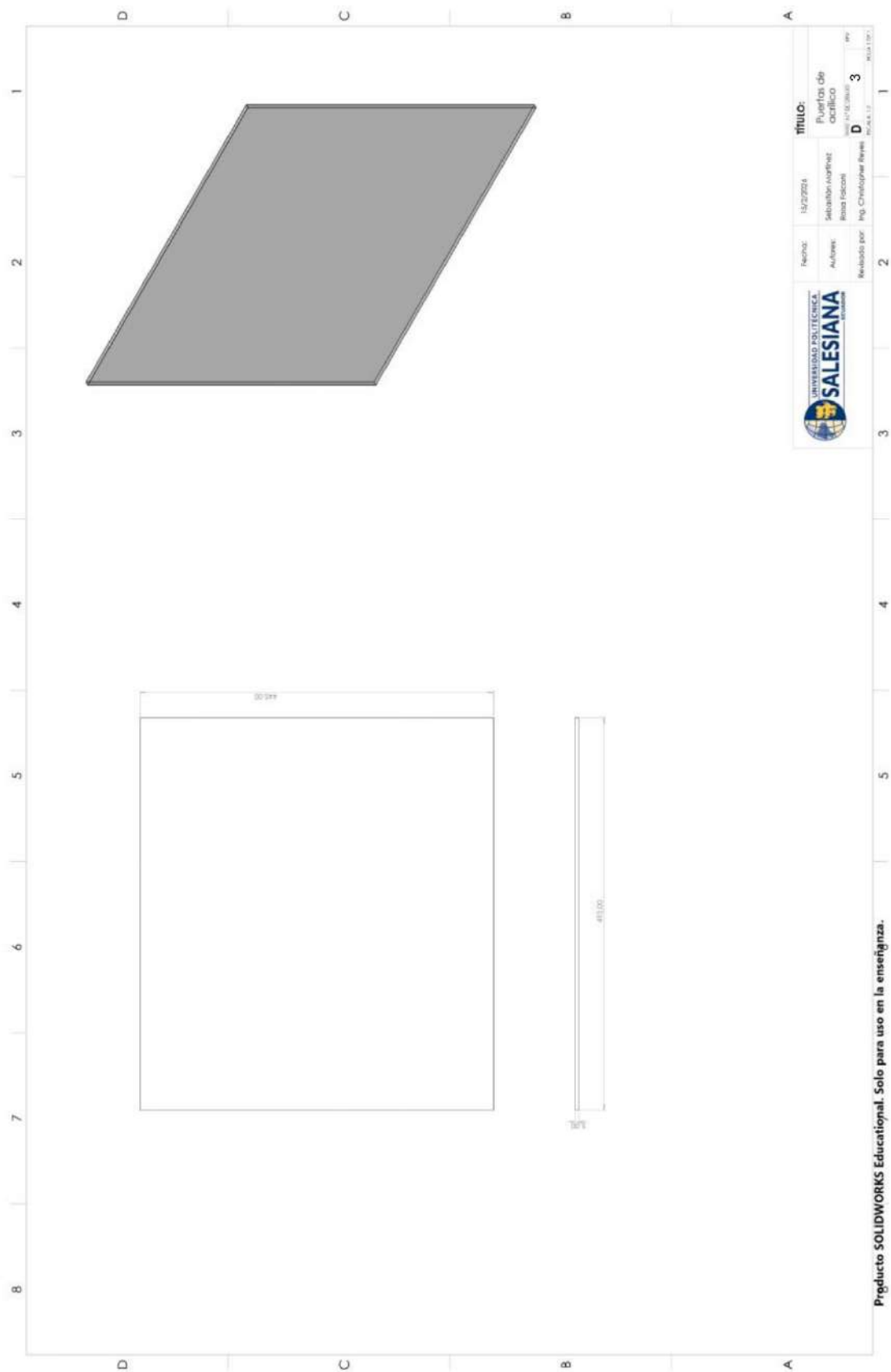


Figura 46. Puertas de acrílico. Fuente: los autores.

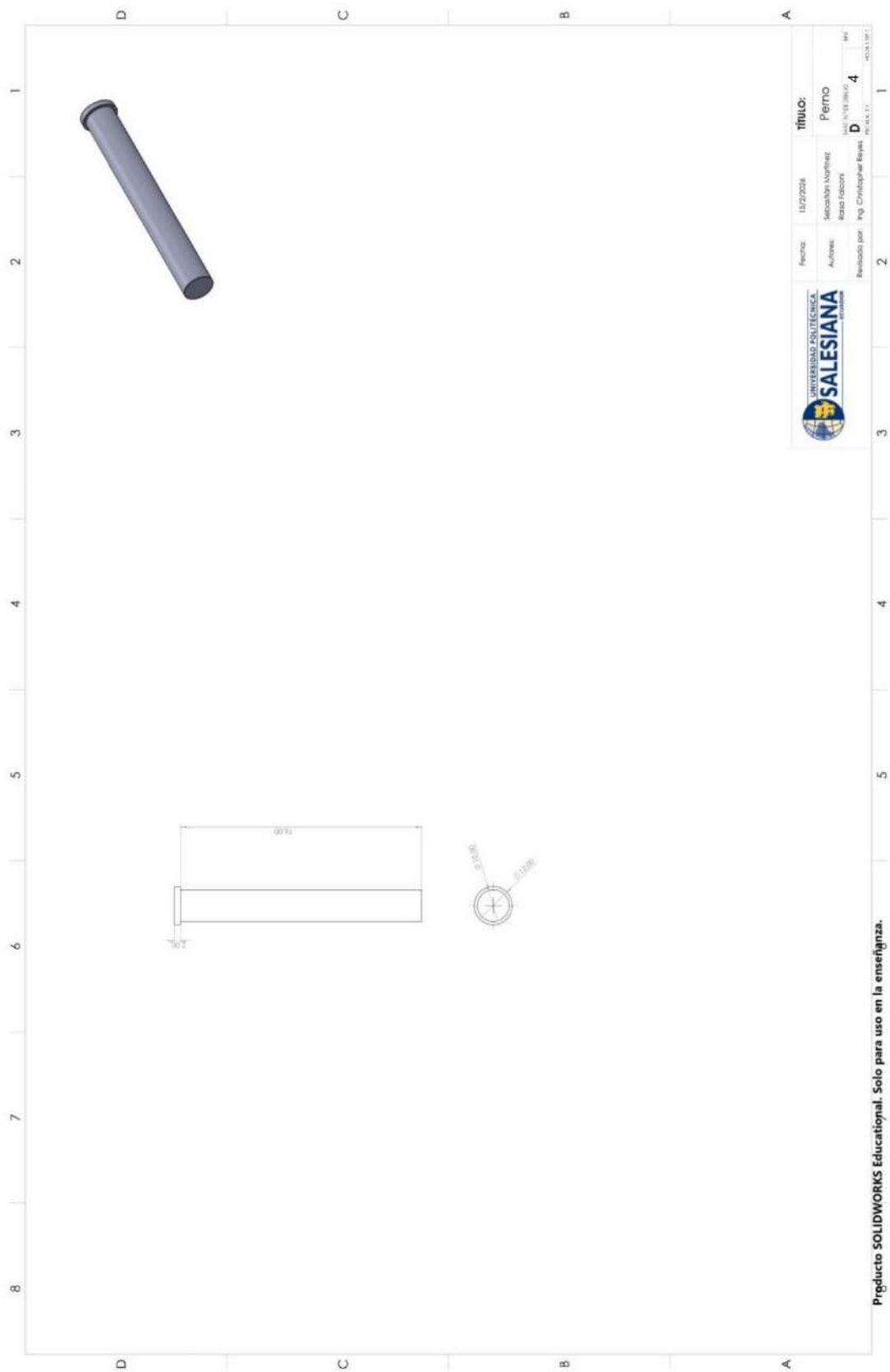


Figura 47. Perno. Fuente: Los autores.

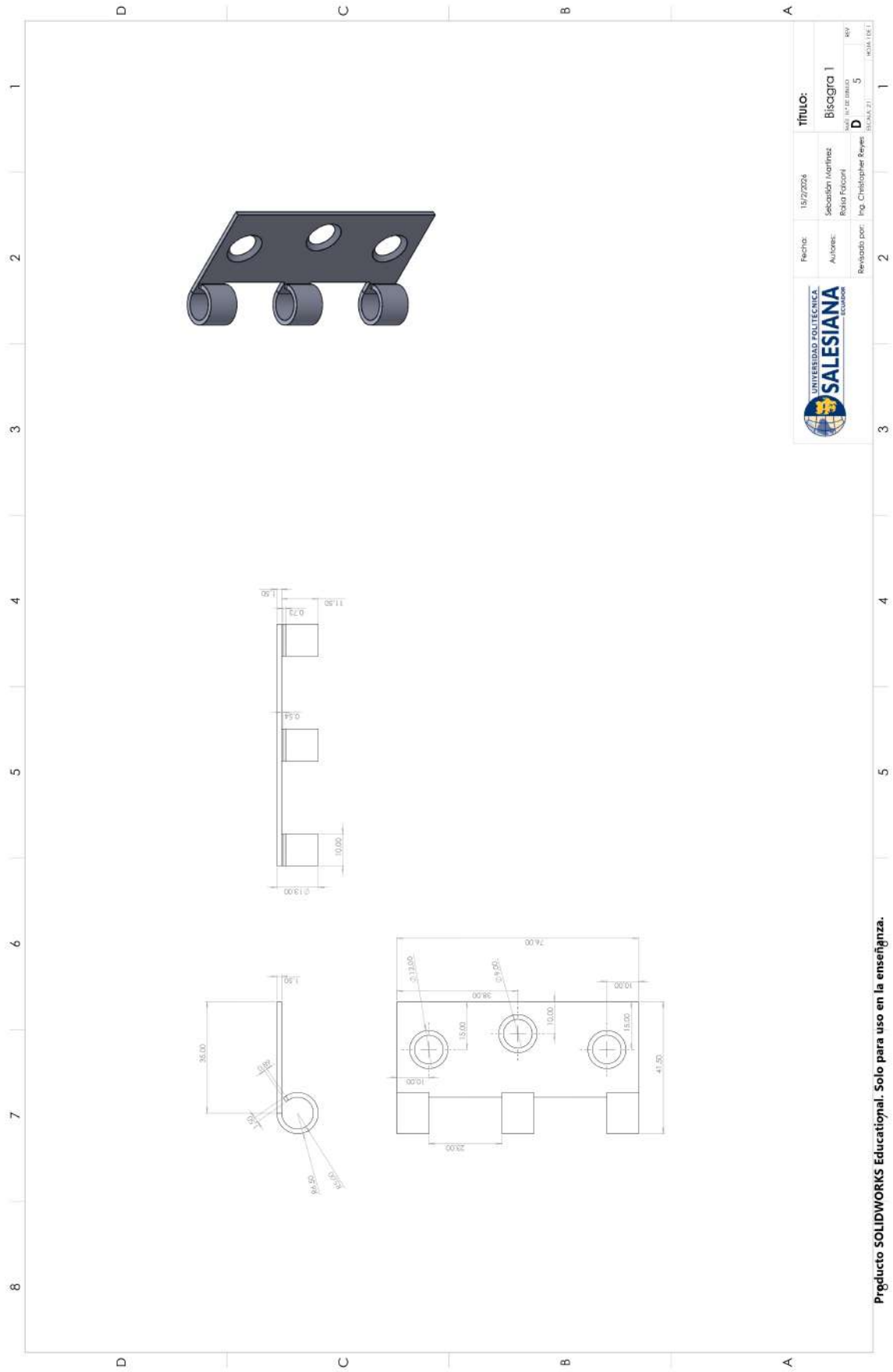


Figura 48. Diseño de bisagra 1 parte. Fuente: Los autores.

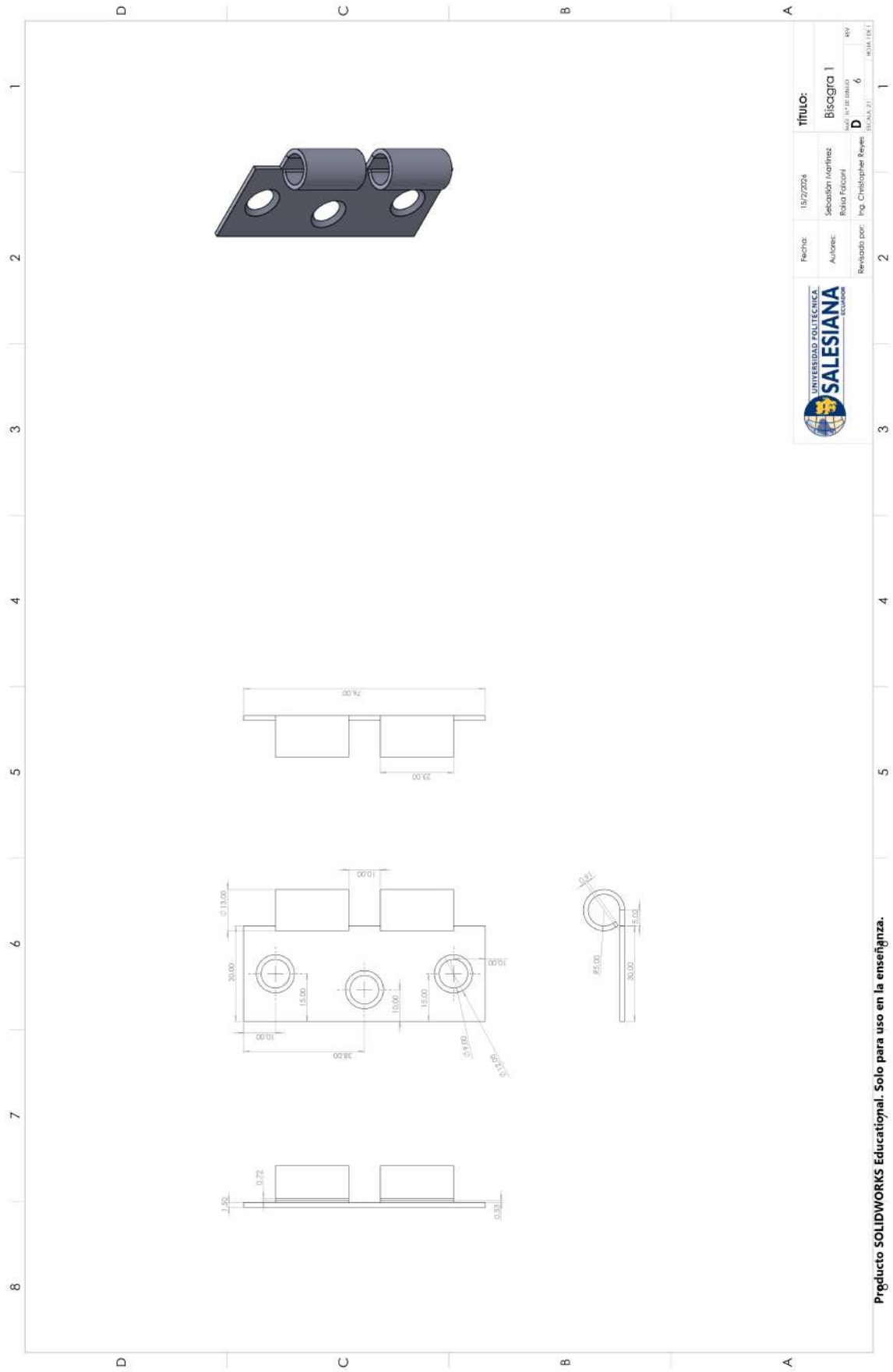


Figura 49. Diseño de bisagra 2 parte. Fuente: Los autores.

ANEXO B  
CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO



Figura 50. Estructura metálica del prototipo de incubadora en proceso de fabricación. Fuente: Los autores.



Figura 51. Corte de paneles mediante máquina CNC para la fabricación del prototipo de incubadora. Fuente: Los autores.



Figura 52. Equipo de soldadura utilizado en la fabricación de la estructura metálica del prototipo. Fuente: Los autores.

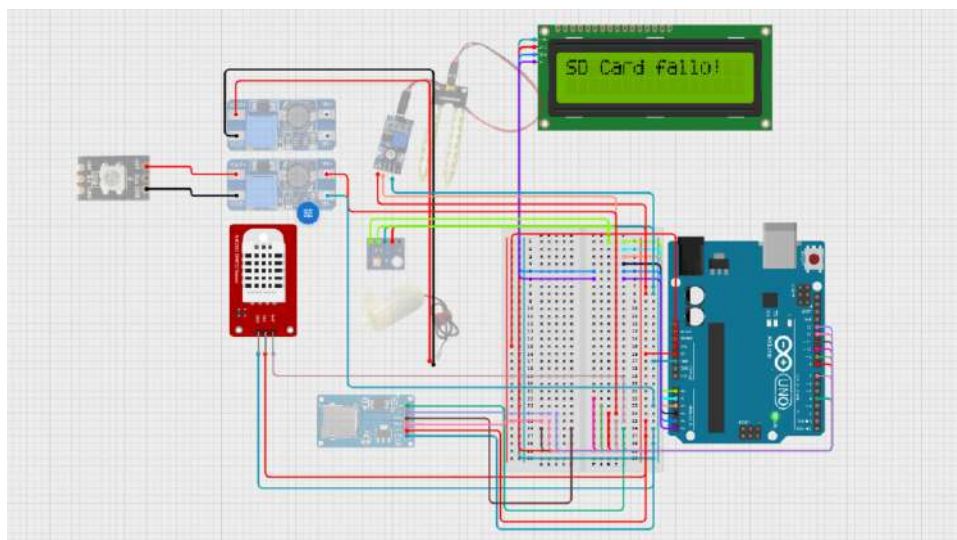


Figura 53. Diagrama de conexiones del sistema de control automatizado basado en Arduino Uno. Fuente: Los autores.

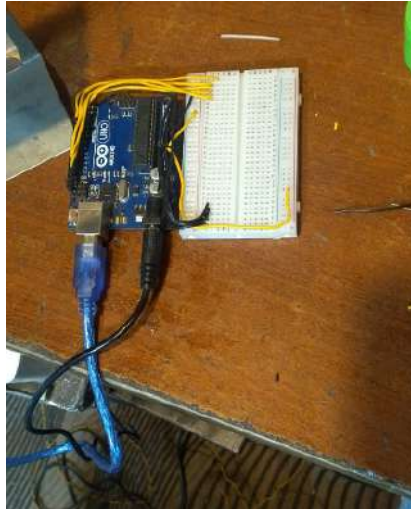


Figura 54. Implementación física del circuito de control en protoboard. Fuente: Los autores.

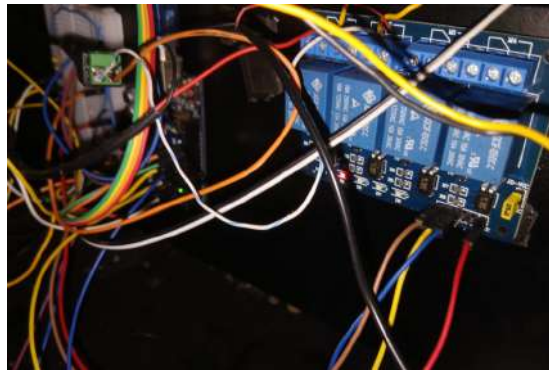


Figura 55. Módulo de relés y sistema de cableado utilizado para el control automatizado de los actuadores del prototipo. Fuente: Los autores.



Figura 56. Sensor digital de intensidad luminosa instalado en la estructura de la incubadora. Fuente: Los autores.



Figura 57. Sensor de humedad del suelo instalado en el sustrato para el monitoreo del riego automático. Fuente: Los autores.

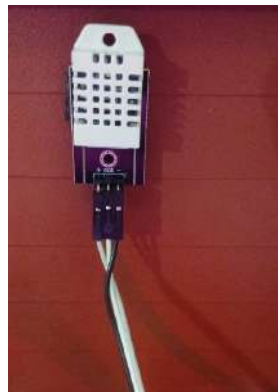


Figura 58. Sensor de temperatura y humedad instalado para el monitoreo ambiental interno. Fuente: Los autores.



Figura 59. Preparación del semillero mediante el llenado de sustrato para la siembra de plántulas. Fuente: Los autores.



Figura 60. Comparación del desarrollo vegetativo en macetas sometidas a control automatizado y condiciones convencionales. Fuente: Los autores.

## ANEXO C

### ALGORITMO DE CÁLCULO DEL ÍNDICE UV Y CLASIFICACIÓN SEGÚN NIVELES DE RADIACIÓN.

```

% Cálculo de radiación UV y dosis recomendada
% para cultivo de lechuga

clc; clear; close all;

% --- Entrada: irradiancia UV medida (W/m^2)
E_UV = input('Ingrese la irradiancia UV medida (W/m^2): ');

if E_UV <= 0
    error('La irradiancia debe ser mayor que cero');
end

% =====
% NIVEL AGRÍCOLA DE RADIACIÓN UV
% =====
if E_UV < 0.05
    nivel_agricola = 'Muy baja';
    efecto = 'Sin efecto fisiologico apreciable';
elseif E_UV < 0.20
    nivel_agricola = 'Baja';
    efecto = 'Estimula levemente el metabolismo vegetal';
elseif E_UV < 0.50
    nivel_agricola = 'Moderada (OPTIMA)';
    efecto = 'Bioestimulacion y produccion de antioxidantes';

```

Figura 61. Primer Script en MATLAB utilizado para el cálculo del índice UV y determinación del tiempo de exposición para el cultivo de Lactuca sativa. Fuente: Los autores.

```

elseif E_UV < 0.50
    nivel_agricola = 'Moderada (OPTIMA)';
    efecto = 'Bioestimulacion y produccion de antioxidantes';
elseif E_UV < 1.0
    nivel_agricola = 'Alta';
    efecto = 'Puede generar estres leve si la exposicion es prolongada';
else
    nivel_agricola = 'Excesiva';
    efecto = 'Riesgo de daño foliar y estres oxidativo';
end

fprintf('\nNivel agricola UV: %s\n', nivel_agricola);
fprintf('Efecto esperado: %s\n', efecto);

% --- Dosis recomendada para lechuga (J/m^2)
dosis_objetivo = 4000; % 4 kJ/m^2

% --- Tiempo de exposición estimado (minutos)
tiempo_min = dosis_objetivo / E_UV / 60;

fprintf('\nTiempo recomendado de exposicion: %.1f minutos\n', tiempo_min);

% --- Simulación de la dosis acumulada
t = linspace(0, tiempo_min * 1.2, 200);
dosis = E_UV .* (t * 60); % J/m^2

```

Figura 62. Segundo Script en MATLAB utilizado para el cálculo del índice UV y determinación del tiempo de exposición para el cultivo de Lactuca sativa. Fuente: Los autores.

```

% --- Gráfica
figure('Color','w');
plot(t, dosis/1000, 'LineWidth', 2);
hold on;
yline(dosis_objetivo/1000, '--', 'Dosis Óptima (4 kJ/m²)', 'LineWidth', 1.5);

xlabel('Tiempo de exposicion (min)');
ylabel('Dosis acumulada (kJ/m²)');
title('Dosis UV Recomendada para Lechuga');
grid on;
legend('Dosis acumulada','Limite optimo','Location','best');

ylim([0, max(dosis_objetivo/1000 * 1.3, max(dosis/1000))]);
xlim([0, max(t)]);

% --- Mensaje final
if E_UV > 1
    disp('△ Reducir intensidad o aumentar distancia.');
```

Figura 63. Tercer Script en MATLAB utilizado para el cálculo del índice UV y determinación del tiempo de exposición para el cultivo de Lactuca sativa. Fuente: Los autores.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
Ingrese la irradiancia UV medida (W/m^2): 0.38

Nivel agricola UV: Moderada (OPTIMA)
Efecto esperado: Bioestimulacion y produccion de antioxidantes

Tiempo recomendado de exposicion: 175.4 minutos
✓ Nivel adecuado para exposicion controlada.
>>
```

Figura 64. Resultado del cálculo del nivel agrícola UV y tiempo de exposición recomendado. Fuente: Los autores.

ANEXO D  
PROGRAMACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA INCUBADORA.

```
#include <Wire.h>
#include <hd44780.h>
#include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h>
#include <DHT.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

#define DHTPIN      7
#define DHTTYPE     DHT22
#define UV_OUT_PIN  A0
#define SOIL_PIN    A2
#define LUZ_UV_PIN  8
#define BOMBA_PIN   9
#define SD_CS_PIN   4

// Parámetros de control
const float HUMEDAD_MIN_SUELO = 30.0;
const float HUMEDAD_MAX_SUELO = 70.0;

const float TEMP_AIRE_MAX      = 29.0;
const float TEMP_AIRE_MIN      = 14.0;
const float HUM_AIRE_MAX       = 85.0;
const float HUM_AIRE_MIN       = 40.0;

const float UV_ON_THRESHOLD    = 1.40;
const float UV_OFF_THRESHOLD   = 1.50;

const unsigned long TIEMPO_LUCES = 10800000UL;
const unsigned long INTERVALO_LOG = 3000000UL;
const unsigned long TIEMPO_INICIAL_OBTENIENDO = 30000UL;

const int FC28_RAW_SECO      = 800;
const int FC28_RAW_MOJADO    = 350;
const int FC28_RAW_MIN       = 300;
const int FC28_RAW_MAX       = 700;

const unsigned long INTERVALO_ROTACION = 10000UL;

unsigned long ultimoCambioPantalla = 0;
byte pantallaActual = 0;

hd44780_I2Cexp lcd;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

bool lucesEncendidas = false;
unsigned long ultimoLog = 0;
unsigned long tiempoInicioLuces = 0;
unsigned long tiempoInicioPrograma = 0;
bool modoObteniendoDatos = true;
float primeraUvVolt = 0.0;

// Función para promediar lecturas analógicas
int averageAnalogRead(int pinToRead) {
  const byte n = 6;
  unsigned long sum = 0;
  for (byte i = 0; i < n; i++) {
    sum += analogRead(pinToRead);
    delay(10);
  }
}
```

```

    }
    return sum / n;
}

// Mapeo de valores flotantes
float mapfloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max) {
    return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}

// Lectura de humedad del sustrato
float leerHumedadSuelo() {
    int raw = averageAnalogRead(SOIL_PIN);
    if (raw < FC28_RAW_MIN || raw > FC28_RAW_MAX) return -1.0;
    float pct = mapfloat((float)raw, FC28_RAW_SECO, FC28_RAW_MOJADO, 0.0, 100.0);
    return constrain(pct, 0.0, 100.0);
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.backlight();
    lcd.print("Iniciando...");

    dht.begin();
    pinMode(LUZ_UV_PIN, OUTPUT);
    pinMode(BOMBA_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LUZ_UV_PIN, HIGH);
    digitalWrite(BOMBA_PIN, HIGH);

    if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
        lcd.clear();
        lcd.print("SD fallo!");
        delay(2000);
    } else {
        File f = SD.open("hidropon.txt", FILE_WRITE);
        if (f) {
            f.println("Tiempo(s),UV_V,UV_mW,H_Suelo%,H_Aire%,Temp_C,Bomba");
            f.close();
        }
    }

    int uvRaw = averageAnalogRead(UV_OUT_PIN);
    primeraUvVolt = 3.3 * (float)uvRaw / 1023.0;
    tiempoInicioPrograma = millis();
}

void loop() {
    unsigned long ahora = millis();

    if (modoObteniendoDatos) {
        if (ahora - tiempoInicioPrograma >= TIEMPO_INICIAL_OBTENIENDO) {
            modoObteniendoDatos = false;
            lcd.clear();
        } else {
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Obteniendo datos");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Espera 30 seg...");
            return;
        }
    }
}

```

```

float hAire = dht.readHumidity();
float tAire = dht.readTemperature();
float hSuelo = leerHumedadSuelo();

// Lectura UV
int uvRaw = averageAnalogRead(UV_OUT_PIN);
float uvVolt = 3.3 * (float)uvRaw / 1023.0;
float uvIntensidad = mapfloat(uvVolt, 0.99, 2.8, 0.0, 15.0);
if (uvIntensidad < 0) uvIntensidad = 0;

// Control de bomba
bool bombaOn = false;
if (hSuelo >= 0.0) {
    if (hSuelo < HUMEDAD_MIN_SUELO) bombaOn = true;
    if (hSuelo >= HUMEDAD_MAX_SUELO) bombaOn = false;
} else {
    bombaOn = true;
}
digitalWrite(BOMBA_PIN, bombaOn ? LOW : HIGH);

// Control de luces UV
if ((primeraUvVolt <= UV_ON_THRESHOLD) && !lucesEncendidas) {
    digitalWrite(LUZ_UV_PIN, LOW);
    lucesEncendidas = true;
    tiempoInicioLuces = ahora;
}
if (lucesEncendidas && (ahora - tiempoInicioLuces >= TIEMPO_LUCES)) {
    digitalWrite(LUZ_UV_PIN, HIGH);
    lucesEncendidas = false;
}

mostrarLCD(uvVolt, uvIntensidad, hAire, tAire, hSuelo);

if (ahora - ultimoLog >= INTERVALO_LOG) {
    guardarDatos(uvVolt, uvIntensidad, hAire, tAire, hSuelo);
    ultimoLog = ahora;
}

delay(2000);
}

void mostrarLCD(float volt, float uvIntensidad, float hAire, float tAire, float hSuelo) {
    unsigned long ahora = millis();

    if (ahora - ultimoCambioPantalla >= INTERVALO_ROTACION) {
        pantallaActual = (pantallaActual + 1) % 4;
        ultimoCambioPantalla = ahora;
        lcd.clear();
    }

    String sensorStatus = "Sistema OK";
    if (isnan(hAire) || isnan(tAire)) sensorStatus = "Falla DHT22";
    else if (tAire > TEMP_AIRE_MAX) sensorStatus = "Alerta: CALOR";
    else if (tAire < TEMP_AIRE_MIN) sensorStatus = "Alerta: FRIO";
    else if (hAire > HUM_AIRE_MAX) sensorStatus = "Humedad ALTA";
    else if (hSuelo < HUMEDAD_MIN_SUELO) sensorStatus = "Suelo SECO";

    switch (pantallaActual) {
        case 0:
            lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("UV:"); lcd.print(volt, 2); lcd.print("V");

```

```

    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Luces: "); lcd.print(lucesEncendidas ? "ON" : "OFF");
    break;

case 1:
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("H.Suelo:");
    if (hSuelo >= 0) lcd.print(hSuelo, 0); else lcd.print("ERR");
    lcd.print("%");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("H.Aire: ");
    if (isnan(hAire)) lcd.print("ERR"); else lcd.print(hAire, 0);
    lcd.print("%");
    break;

case 2:
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temp: "); lcd.print(tAire, 1); lcd.print("C");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Bomba: ");
    lcd.print(digitalRead(BOMBA_PIN) == LOW ? "ON" : "OFF");
    break;

case 3:
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(sensorStatus);
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Log en: ");
    lcd.print((INTERVALO_LOG - (millis() - ultimoLog)) / 1000UL);
    lcd.print("s");
    break;
}
}

void guardarDatos(float volt, float uvIntensidad, float hAire, float tAire, float hSuelo) {
    File f = SD.open("hidropon.txt", FILE_WRITE);
    if (f) {
        f.print(millis() / 1000UL); f.print(",");
        f.print(volt, 2); f.print(",");
        f.print(uvIntensidad, 1); f.print(",");
        f.print(hSuelo, 1); f.print(",");
        f.print(hAire, 1); f.print(",");
        f.print(tAire, 1); f.print(",");
        f.println(digitalRead(BOMBA_PIN) == LOW ? "ON" : "OFF");
        f.close();
    }
}
}

```