

**UNIVERSIDAD CENTRAL
VICERRECTORÍA ACADÉMICA**

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**PROPUESTA DE DISEÑO ELECTRÓNICO DE UN
INVERNADERO CON TECNOLOGÍA DE BAJO COSTO PARA
LA SIEMBRA DE LECHUGA EN EL CENTRO NACIONAL
ESPECIALIZADO EN ELECTRÓNICA DEL INA HEREDIA,
UTILIZANDO LOS DATOS SUMINISTRADOS POR SENSORES
ELECTRÓNICOS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DEL 2025**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

ESTUDIANTE: FABIÁN GERARDO DELGADO MARÍN

TUTOR: ING. DIEGO ALONSO RAMÍREZ ROJAS

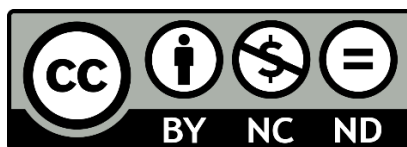
SEDE METROPOLITANA, COSTA RICA

Junio, 2025

Carta de entendimiento

San José, 02 de agosto de 2025.

Yo, **Fabián Gerardo Delgado Marín**, cédula de identidad número **1 1082 0209**, estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica, en condición de autor del Trabajo Final de Graduación titulado: **“Propuesta de diseño electrónico de un invernadero con tecnología de bajo costo para la siembra de lechuga en el Centro Nacional Especializado en Electrónica del INA Heredia, utilizando los datos suministrados por sensores electrónicos durante el primer semestre del 2025”**, acepto que este documento tenga la más amplia difusión pública a través de la Internet por medio del depósito en el repositorio de acceso abierto de la biblioteca de la Universidad Central bajo la siguiente licencia:



Esta obra está sujeta a la licencia Reconocimiento-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

Firma

Tabla de contenido

CARTA DE ENTENDIMIENTO	II
LISTA DE TABLAS	IV
LISTA DE FIGURAS	V
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS	VI
DEDICATORIAS	VII
AGRADECIMIENTOS	VIII
EPÍGRAFE	IX
RESUMEN	1
CAPÍTULO I. PROBLEMA	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 ANTECEDENTES.....	7
1.4.1 <i>Antecedentes nacionales</i>	7
1.4.2 <i>Antecedentes internacionales</i>	14
1.5 PROYECCIONES	17
1.5.1 <i>Alcances</i>	18
1.5.2 <i>Limitaciones</i>	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	20
2.1 INTRODUCCIÓN	20
2.2 DEFINICIÓN DE AGRONOMÍA	21
2.3 AGRICULTURA	21
2.3.1 <i>Definición</i>	21
2.3.2 <i>Orígenes y evolución de la agricultura</i>	22
2.3.3 <i>Agricultura convencional y el impacto en el medio ambiente</i>	32
2.3.4 <i>Características de la agricultura tradicional</i>	33
2.4 AGRICULTURA EN COSTA RICA	35
2.4.1 <i>Siembra de lechuga en terreno abierto</i>	40

2.4.2 Ventajas de siembra de lechuga en terreno abierto	41
2.4.3 Desventajas de siembra de lechuga en terreno abierto.....	41
2.4.4 Tipo de suelo para la siembra de lechuga	42
2.4.5 Insumos requeridos para la siembra tradicional de lechuga.....	44
2.5 INVERNADEROS	46
2.5.1 Definición.....	46
2.5.2 Tipos de invernaderos.....	47
2.5.3 Ventajas de los invernaderos	47
2.5.4 Desventajas de los invernaderos	48
2.6 ELECTRÓNICA.....	49
2.6.1 Definición.....	49
2.6.2 Componentes electrónicos.....	50
2.6.3 Software.....	66
2.6.4 Entorno de desarrollo integrado (IDE).....	67
A. Paso #1: Descargar el software de Arduino	68
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	75
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	75
3.2 MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	76
3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	78
3.4 VARIABLES DE ANÁLISIS	78
3.5 INSTRUMENTOS	80
3.5.1 Calibración de los sensores de humedad SEN0193.....	80
3.5.2 Calibración de la medición de la cantidad de agua utilizada para el riego	82
3.5.3 Calibración y ajuste de los goteros para el sistema de riego.....	83
3.6 PROCESO PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	84
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
5.1 CONCLUSIONES	108
5.2 RECOMENDACIONES	110
CAPÍTULO VI. PROPUESTA.....	112
6.1 INTRODUCCIÓN	112
6.2 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO BÁSICO EXPERIMENTAL.....	112
6.3 DISEÑO AMPLIADO PARA APLICACIÓN EN INVERNADERO GRANDE	114

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÉNDICES Y ANEXOS	144
ANEXO 1	144
NOTA: IMAGEN DE LA IZQUIERDA CORRESPONDE A LAS CAMAS DE CULTIVO INSTALADAS EN EL INA DE HEREDIA POR FUNCIONARIOS DEL NÚCLEO AGROPECUARIO. IMAGEN DE LA DERECHA CORRESPONDE AL INVERNADERO EN EL QUE SE INSTALÓ EL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL ELECTRÓNICO.144	
ANEXO 2	145

Lista de tablas

Tabla 1 Mediciones tomadas para la calibración de los sensores de humedad	82
Tabla 2 Pruebas de calibración y ajuste del patrón de riego	83
Tabla 3 Insumos y costos de producción de una cosecha convencional de lechuga.....	87
Tabla 4 Componentes y cálculo del costo de la fórmula madre.....	90
Tabla 5 Insumos y costos de una cosecha en invernadero de 500 <i>m</i> ²	91
Tabla 6 Cálculo y consumo de datos móviles utilizados por el teléfono router	99
Tabla 7 Monitoreo y control del consumo de datos móviles	100
Tabla 8. Datos obtenidos de sensores y dispositivos electrónicos durante las muestras tomadas	107
Tabla 9 Costo del equipo y materiales invernadero de 175 <i>m</i> ²	118
Tabla 10 Proyección de ganancia de una cosecha de lechugas con 10 camas de cultivo	119

Lista de figuras

Figura 1 Modos de operación y consumo de energía de un ESP32	57
Figura 2 Menú de preferencias en el IDE de Arduino	69
Figura 3 Librerías utilizadas en el proyecto.....	70
Figura 4 Código para calibración de sensores.....	81
Figura 5 Costos de una cosecha tradicional de lechuga en 500 m ²	88
Figura 6 Costos de una cosecha de lechuga en invernadero de 500 m ²	89
Figura 7 Niveles máximos de temperatura durante el día	93
Figura 8 Aparición de insectos por niveles altos de humedad.....	95
Figura 9 Interfaz en ThingSpeak para monitoreo de humedad en las plantas.....	97
Figura 10 Notificación de ThingSpeak y campo para el monitoreo del estado de la bomba	98
Figura 11 Comparación entre plantas: ambiente controlado y ambiente no controlado	101
Figura 12 Interfaz web desde dispositivo móvil para el monitoreo y control del invernadero...	103
Figura 13 Cosecha de las primeras lechugas	105
Figura 14 Diseño y componentes del sistema de riego.....	108
Figura 15 Diagrama eléctrico del diseño experimental del invernadero	113
Figura 16 Diagrama eléctrico del diseño para invernadero de 175 m ²	116
Figura 17 Distribución de las camas de cultivo dentro del Invernadero.....	117

Abreviaturas, siglas y acrónimos

ADC: Analogic Digital Converter. Convertidor analógico digital

AMD: Advance Micro Devices. Fabricante de procesadores a nivel mundial

AP: Agricultura de precisión

API: Application Programming Interface. Interfaz de Programación de Aplicaciones

ARESEP: Autoridad Reguladora de Servicios Públicos

Byte: Unidad de medida de almacenamiento de datos. 1 byte equivale a 8 bits de información

CC: Corriente continua

CD: Corriente directa

CENATE: Centro Nacional de Alta Tecnología en Electrónica

CI: Circuito integrado

CPU: Central Processing Unit. Unidad Central de Procesamiento

dBm: Decibeles miliwatts. Unidad de medida de la potencia en señales de radiofrecuencia

DSI: Display Serial Interface

GAM: Gran Área Metropolitana

GHz: 1×10^9 Hz

GPIO: General Purpose Input Output. Entradas y salidas de uso general

GPM: Galones por minuto

GPS: Global Positioning System. Sistema de posicionamiento global

HDMI: High Definition Mulimedia Interface

Hz: Hertz, unidad de medida de la frecuencia en el sistema internacional

IA: Inteligencia artificial

IDE: Integrated Development Environment. Entorno de desarrollo integrado

INA: Instituto Nacional de Aprendizaje

IoT: Internet of Things. Internet de las cosas

IP: Internet Protocol

KB: Kilo bytes

LCD: Liquid Crystal Display. Pantalla de cristal líquido

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

Mbps: Millones de bits por segundo

MHz: 1×10^6 Hz

NTC: Negative Temperature Coefficient. Coeficiente de Temperatura Negativo

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PMU: Power Management Unit. Unidad de Administración de Energía

PSI: Pounds per Square Inch. Libras por pulgada cuadrada

PWM: Pulse Width Modulation. Modulación por ancho de pulso

QFN: Quad Flat No-lead

RAM: Random Access Memory

RF: Radiofrecuencia

ROI: Return on Investment. Retorno sobre la inversión

ROM: Read Only Memory

RTC: Real Time Clock

SAR: Successive Approximation Register. Registro de aproximación sucesiva

SoC: System on a Chip

SRAM: Static Random Access Memory

TI: Tecnologías de la información

TMSC: Temperature Sensor Measurement Control

UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Transmisor receptor asíncrono Universal

ULP: Ultra Low-Power

URL: Uniform Resource Locator. Localizador uniforme de recursos

USB: Universal Serial Bus. Bus serie de comunicación universal

Ω : Unidad de medida de la resistencia eléctrica en el sistema internacional de medidas

Dedicatorias

A mi amada esposa Johanna Barboza Abarca, a mis hijas Daniela Delgado Barboza y Nohemy Delgado Barboza y a mi hijo Josué Delgado Barboza, quienes han sido los mejores testigos del esfuerzo realizado durante estos últimos diez años y han vivido, de manera intensa, todo el proceso de mi vida universitaria. Ellos son las personas que me han apoyado y han estado a mi lado en los momentos de frustración y dificultad. Son quienes han tenido que soportar y limitarse ante el sacrificio económico, y, sobre todo, ante la inversión de tiempo que demanda estudiar y prepararse profesionalmente.

A mis queridos padres Manuel Gerardo Delgado Sandí y Grace María Marín Araya, por haber hecho el esfuerzo tan grande de enviarme a primaria y secundaria. En medio de carencias y dificultades económicas, nunca me negaron el estudio y siempre me apoyaron, aún durante mis estudios universitarios.

A mi sobrina Paulina, porque, cuando hizo falta dinero para continuar, ella me apoyó y ha estado pendiente en este largo proceso.

¡Para ellos, con todo mi cariño!

Agradecimientos

A Dios, primeramente, por el don de la vida y por darme la salud necesaria para lograr esta meta tan importante en mi carrera profesional y personal.

A doña Consuelo, quien de Dios goce, por apoyarme económicamente.

A mi tutor Diego Ramírez, por el seguimiento, orientación y consejo.

A mi abuela “Mamá”, quien, sin saber, colaboró con mis estudios.

A mi jefatura en el INA, por autorizarme a realizar este proyecto.

A mis estudiantes Gregorio Abarca, Brayan Ramírez, Joswell Pérez, Jefferson Villalobos y Justin Loredó, por su gran aporte y colaboración en el proyecto.

A la persona experta en agricultura Fabián Agüero León, muchas gracias, Toca, por su valiosa colaboración y por su anuencia y disposición en colaborar.

¡Para todos ellos, mi más sincero agradecimiento!

Epígrafe

“Porque no hay nada más placentero que la satisfacción de disfrutar los bienes y las metas alcanzados con dedicación, esfuerzo, humildad y, sobre todo, con agradecimiento”

Fabián Delgado Marín

Resumen

Durante el primer semestre del 2025, se llevó a cabo una investigación cuyo objetivo fue proponer el diseño de un sistema electrónico de bajo costo para un invernadero específicamente orientado al cultivo de lechuga. Esto se desarrolló en el Centro Nacional Especializado en Electrónica del Instituto Nacional de Aprendizaje Heredia y tuvo como eje central la utilización de sensores electrónicos para monitorear el entorno.

La metodología empleada es de tipo mixta, pues combina enfoques cualitativos y cuantitativos. Por un lado, se entrevistó a un productor agrícola de Escazú para comprender las prácticas tradicionales de siembra en terreno abierto y los costos relacionados. Por otro lado, se realizó una siembra experimental en un pequeño invernadero, monitoreando variables claves como temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo mediante sensores electrónicos.

En ese sentido, se utilizaron un microcontrolador ESP32, dos sensores de humedad del suelo SEN0193, un sensor DHT11, un medidor de caudal de agua y dos servomotores de rotación continua MG996, los cuales se encargaron de abrir y cerrar una malla de sombreado. Los resultados evidenciaron que es factible implementar un sistema de bajo costo, además de que sí se puede disminuir la cantidad de agua aplicada en cada riego y maximizar el uso del recurso hídrico.

La propuesta abre la puerta a futuras aplicaciones, tanto a nivel educativo, como a niveles más grandes de producción, y representa un ejemplo concreto de cómo la electrónica puede responder a necesidades reales en el ámbito agrícola costarricense.

Capítulo I. Problema

1.1 Planteamiento del problema

En Costa Rica, existe una gran cantidad de personas que dependen directamente de la producción agrícola y son parte esencial de la cadena de valor que hace posible disfrutar de una gran variedad de alimentos indispensables en las mesas de los costarricenses. En ese sentido, cerca del 70% de la canasta básica es producida por el sector agrícola, generando una cantidad importante de empleos (Romero Calvo y Solórzano Quintana, 2023). Los productos agrícolas tienen algo en común: necesitan de un suelo y de agua para crecer y, posteriormente, proceder con su cosecha.

Lo anterior supone que, si se logran aprovechar, de una manera más eficiente, estos dos recursos (suelo y agua), traería muchas ventajas no solo para las personas productoras agrícolas, sino también, para el medio ambiente. Dicha idea estaría alineada a la propuesta de sostenibilidad que tanta relevancia ha tomado en las últimas décadas.

Por consiguiente, si se toman en cuenta los datos de Torres Cobo (2024) sobre el incremento en la demanda de agua del sector agrícola que se espera para el año 2050 debido al aumento de la población mundial, es imperativo tomar medidas para controlar el recurso hídrico. Asimismo, el uso intensivo del recurso suelo se ve afectado por sustancias químicas como los plaguicidas, los cuales poco a poco van degradándolo y modificando las características originales de este recurso natural (Silva Arroyave y Correa Restrepo, 2009).

Aunado a todo lo anterior, la población mundial cada año aumenta. Según la ONU (DESA, 2019), aproximadamente para el año 2050, el planeta estaría alcanzando los 9000 millones de habitantes. Al considerar que todas las personas tienen la necesidad básica de alimentación y que cubrir esa necesidad exige cada vez más recursos, disminuir el impacto en la agricultura se convierte en un reto. Todo esfuerzo dirigido a resolver esta problemática debe considerarse de suma importancia porque genera un impacto directo sobre la población actual y las futuras generaciones.

En este contexto global, el estudio busca disminuir los costos de producción y de recurso hídrico en el cultivo de lechuga a través del método de siembra en invernadero utilizando tecnología de bajo costo en el primer semestre del 2025 en Costa Rica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proponer el diseño electrónico de un invernadero con tecnología de bajo costo para la siembra de lechuga aplicado para el Centro Nacional Especializado en Electrónica del INA Heredia, utilizando los datos suministrados por sensores electrónicos durante el primer semestre del 2025.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Determinar las condiciones y características para la siembra de lechuga por medio del método tradicional en terreno abierto en el cantón de Escazú, que tiene características similares al cantón Central de Heredia según información suministrada por un productor agrícola de la zona durante el primer semestre del 2025.

2. Analizar los costos de producción de una cosecha de lechuga por medio del método tradicional de siembra, tomando como referencia información aportada por un agricultor con experiencia de la zona del cantón de Escazú durante el primer semestre del 2025.

3. Analizar datos de temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo de una cosecha de lechuga por medio de una siembra en invernadero ubicado en el cantón Central de la provincia de Heredia, utilizando sensores y componentes electrónicos de bajo costo durante el primer semestre del 2025.

1.3 Justificación

Esta investigación surge a raíz de una instalación de dos camas de cultivo como las apreciadas en el anexo 1 que hiciera personal docente del Núcleo Agropecuario al Centro Nacional Especializado en Electrónica del Instituto Nacional de Aprendizaje. Es necesario manifestar que se facilitaron dos camas de cultivo, las cuales se instalaron en dicho centro y la propuesta fue ponerlas a disposición de los estudiantes y del personal docente, con el fin de aplicar los conocimientos de electrónica en la agricultura.

Dicha situación despertó el interés por realizar el proyecto; en primer lugar, porque se visualizó una oportunidad de realizar una colaboración a una especialidad que ha experimentado muchos cambios importantes desde la Primera Revolución Industrial, sobre todo con la evolución de los grandes avances tecnológicos (Santos, 2018). En segundo lugar, la electrónica es una ingeniería que se ha convertido en una especialidad transversal con muchas otras profesiones y actividades (Rodríguez Soto, 2024).

Asimismo, en las últimas décadas, se han experimentado muchas variaciones en las condiciones climáticas, siendo una tendencia general a lo largo del planeta (Echeverri, 2009). Esto ha provocado que, en lugares donde se acostumbraba a tener periodos de lluvia o sequía bien definidos, ahora se extiendan o se acorten, lo cual afecta significativamente los procesos tradicionales de siembra a cielo abierto y todo lo relacionado con las actividades agropecuarias. Ello genera pérdidas de cultivos, incrementos en los costos de producción y disminución en las ganancias de los productores (Galindo, et al., 2022).

Por lo anterior, a nivel internacional, ha tomado fuerza el término “agricultura de precisión” (AP), en donde se recurre al uso de tecnología que procesa y analiza datos con el objetivo de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, lo cual, a la postre, repercute en la productividad, rentabilidad, calidad y sostenibilidad de las actividades agrícolas (Hernández, 2021).

Sin embargo, este término en Costa Rica no es ampliamente conocido y no existe una política pública que incentive o promueva la digitalización del sector agropecuario de

una manera integral y sostenida, por tanto, representa un gran reto para el sector agropecuario (Rodríguez Soto, 2024).

La tecnología en la producción agrícola aporta datos relevantes que, con métodos tradicionales de siembra, no se podrían obtener. A partir de esta información, se pueden tomar decisiones para controlar, por ejemplo, la temperatura y, sobre todo, la cantidad de agua requerida en el riego de las plantas. Este factor es muy importante porque, según Romero Calvo y Solórzano Quintana (2023), la falta de recurso hídrico es determinante para el desarrollo de los cultivos. Por ende, si este recurso comienza a escasear, el impacto sería considerable.

Incorporar la tecnología en diferentes campos abre paso a la innovación, a la oportunidad de mejora y al desarrollo rural de comunidades, lo cual tiene el poder de transformar sociedades (Rodríguez Soto, 2024). La agricultura de precisión aporta esa innovación empleando elementos tecnológicos que establecen estrategias para el uso necesario de los insumos en la producción agrícola. Lo anterior permite la existencia de más precisión en cuanto a cantidades y tiempos, e impacta positivamente en la gestión agropecuaria de las empresas, tanto en aspectos económicos, como ambientales (Leiva, 2003).

Así mismo, la tecnología permite, por ejemplo, poder referenciar sitios geográficamente vía satélite a través de la utilización de sistemas de posicionamiento global (GPS). Por consiguiente, el hacer uso de todos los datos de esas áreas para una aplicación puntual y precisa de pesticidas o fertilizantes se convierte en una herramienta esencial para el manejo de insumos y la formulación de estrategias que permitan atender las diferentes limitaciones de acuerdo con las características de los terrenos.

Por otra parte, Marote (2010) señala que el Internet ha provocado un auge tecnológico que permite procesar datos a una velocidad superior, lo cual ha abierto el paso a un nuevo término llamado Web 2.0, que se utiliza con el fin de pasar de una agricultura de precisión a una agricultura basada en la decisión, utilizando el gran volumen de datos suministrados por los equipos para minimizar costos de producción.

Por ende, la aplicación de la tecnología en la agricultura ayuda a comprender mejor los procesos productivos a través de la evaluación de las variables en sitios específicos para identificar y corregir problemas. Dicha situación contribuye a la toma de decisiones en los negocios agropecuarios, teniendo el potencial de poder descubrir problemas que antes no se habían identificado (Leiva, 2003).

Es necesario recalcar que la innovación y la tecnología han ido cambiando las actividades agrícolas tradicionales, ya que permiten eficiencia y mayor precisión. La utilización de componentes electrónicos para medir temperatura y humedad ha demostrado que se puede mejorar el consumo de agua e impactar positivamente en la productividad, disminuyendo los desperdicios de recursos y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental (Tovar Soto, et al., 2019).

Muchos procesos agrícolas, que se han logrado automatizar, han permitido un monitoreo y control por medio de los datos recopilados por sensores electrónicos, los cuales pueden ajustar en tiempo real el riego para los cultivos, aplicando cantidades de agua más exactas y reduciendo, por ejemplo, los costos operativos (Moncada González y González Torres, 2020).

Por otra parte, otro aspecto donde la electrónica ha tenido un impacto significativo es en los sistemas de monitoreo de detección de plagas, pues posibilita la aplicación en tiempo real y exacta de plaguicidas en áreas específicas por medio de la activación de mecanismos. Esto supone un ahorro en insumos, lo cual es beneficioso para la salud y el medio ambiente (Tovar Soto, et al., 2019).

Considerando lo anterior, no se deben escatimar esfuerzos e iniciativas que promuevan el uso de la tecnología en la agricultura, ya que esto contribuye a resolver problemas reales y tiene muchas ventajas, como el aumento de la producción, además de suponer ahorros considerables y no generar contaminación, entre otras (Marco Brown y Reyes Gil, 2003). La tecnología en la agricultura no solo mejora la eficiencia en el uso de recursos, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental debido a la optimización del uso de agua al reducir el impacto ambiental y promover una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

En este mismo orden de ideas, se reconoce la importancia de realizar inversión en el campo de la tecnología agrícola por su valioso aporte a la mejora de los productos al impactar positivamente no solo en el uso racional de los recursos naturales, sino también influyendo en las condiciones socioeconómicas de muchos países (French, et al., 2014).

1.4 Antecedentes

A continuación, se describen algunos antecedentes de proyectos, investigaciones o documentos nacionales e internacionales relevantes para el presente trabajo investigativo. Además, se detallan sus autores, el tema y la importancia que aporta a este proyecto. Cabe mencionar que, a nivel nacional, son muy pocas las referencias encontradas directamente aplicadas al cultivo de la lechuga (Rodríguez Soto, 2024).

1.4.1 Antecedentes nacionales

Usualmente, en Costa Rica, uno de los sistemas de riego más utilizados es el riego por goteo. Este sistema disminuye el gasto de recurso hídrico favoreciendo la calidad y cantidad de las cosechas. Por esto, la tesis de Rojas Picado (2021) titulada: *“Diseño de un sistema de riego por goteo para hortalizas en ocho invernaderos, Páramo, Pérez Zeledón”*, es relevante para este trabajo, pues menciona y define conceptos claves utilizados en el cultivo de hortalizas.

La autora describió que el invernadero era básicamente una estructura cubierta de materiales transparentes, cuyo propósito era mantener un microclima en su parte interna, en donde se desarrollaban las plantas en condiciones óptimas. Los factores climáticos como temperatura, humedad y luminosidad tienen una relación directa con el correcto desarrollo de las plantas en general. Según Rojas Picado (2021), en Costa Rica, un tipo de invernadero muy utilizado era el que tenía techo plástico y sin paredes con el propósito de proteger las plantas de los golpeteos de las gotas de lluvia.

Continuando con los aportes de la investigación, la misma autora apuntaba a que, cuando la humedad relativa dentro de un invernadero era muy alta, no permitía la transpiración de las plantas. Por lo tanto, se generaban las condiciones para la aparición

de enfermedades. Como otro dato importante, añadió que la humedad del aire, como también se le conoce, no tenía un impacto directo en el crecimiento de los cultivos (Rojas Picado, 2021).

Asimismo, Rojas Picado (2021) hizo referencia a la fertilización por medios orgánicos. En ese sentido, destacó que agregar compostaje al suelo para aportar los nutrientes necesarios a los cultivos era una muy buena opción, además de que contribuía con la conservación de los suelos y mejoraba su capacidad de retener humedad, lo cual facilitaba las labores de cultivo y la germinación de las semillas.

En cuanto al riego por goteo, que es el más utilizado en Costa Rica, tiene la gran ventaja de mantener un suministro constante y uniforme, el cual contribuía a un manejo responsable del recurso hídrico y reducía las posibilidades de proliferación de enfermedades. Por esto, aunque existen otros métodos de riego, por ejemplo, el riego por gravedad, el primero supone mayores beneficios al ser la única consideración, para este tipo de riego, el acceso al equipo requerido y las condiciones del cultivo (Rojas Picado, 2021).

Del mismo modo, Rojas Picado (2021) mencionó las ventajas de contemplar la distancia de siembra y las consideraciones para diseñar un sistema de riego. La autora aporta información indispensable para el diseño hidráulico y el tipo de goteros existentes con el propósito de que el agua llegue directamente a las raíces de las plantas. Todo esto se desarrolló por medio de análisis en laboratorio y pruebas realizadas en el campo.

De manera similar, cuando se desea implementar el uso de tecnología en la siembra y desarrollo de productos agrícolas, se debe contemplar la inversión inicial del proyecto para definir la viabilidad y rentabilidad. La investigación realizada por Rodríguez Villegas (2022) llamada: *“Sistema de riego por goteo y fertirriego automatizado con sensores de humedad y telemetría para maíz (zea mays) Jicaral, Puntarenas, 2020”*, muestra la inversión inicial de un proyecto de automatización de riego y fertilización para plantas de maíz, y de esta, se extraen los costos iniciales.

El autor consideró indicadores financieros, tales como inversión inicial, costos, gastos, ingresos, utilidad, valor actual neto, tasa interna de retorno, costo beneficio y periodo de recuperación descontado. Todos estos indicadores forman parte de un análisis financiero cuyo propósito es tener elementos de sustento para aprobar o rechazar la puesta en marcha de un proyecto (Rodríguez Villegas, 2022). Al final, el autor logró ejecutar el sistema de riego automatizado para el maíz.

Por otra parte, tiene relevancia para este proyecto porque describe muy bien los diferentes tipos de riego y sus características. El riego por gravedad donde el terreno debe estar nivelado y cuya principal característica es que el terreno se humedece por completo, requiriendo un buen control para el manejo de plagas. El riego por aspersión, donde supone un costo de inversión alto con la característica que se puede adaptar a muchos terrenos y se puede automatizar. Además, el riego por goteo se caracteriza por tener la facilidad de aplicar fertilizantes por medio de tubería de polietileno y por el gran ahorro de consumo de agua que implica (Rodríguez Villegas, 2022).

En palabras de Rodríguez Villegas (2022), al sistema de riego por goteo, también se le llama de alta frecuencia, donde se aplican no más de 16 litros por hora por metro lineal de manguera, reduciendo las posibilidades de que la planta se vea afectada por estrés hídrico. Sin embargo, el costo inicial es alto y requiere de un mantenimiento para evitar que los goteros se obstruyan. En este sistema, la idea es no humedecer el 100% del área de las raíces, sino, aproximadamente, un 50%.

Como otro dato considerado de suma importancia, se habla de sistema de automatización cuando se emplea tecnología para la aplicación de las fórmulas nutritivas en los cultivos según la dosis recomendada en cada caso. Esto evita que se cometa algún error en las formulaciones y se aplique a las plantas, lo cual hace suponer que la intervención de las personas en este tipo de actividades sea casi nula (Rodríguez Villegas, 2022).

En la misma línea de antecedentes nacionales, se encuentra el trabajo realizado por Valverde Delgado (2023) denominado: *“Evaluación térmica de un invernadero no automatizado ubicado en la zona de Guápiles mediante el uso de dinámica de fluidos*

computacional (doctoral dissertation, Universidad de Costa Rica)”, se evalúan las variables físicas internas de temperatura, humedad ambiental y repercusiones del viento en el invernadero utilizado para la siembra de lechuga. Por las condiciones climatológicas de la zona de Guápiles, se propuso recurrir a un sistema de ventilación para controlar las variables dentro del invernadero.

En el mismo orden de ideas, el autor destaca cómo se han logrado controlar los cultivos mediante la automatización y los sensores gracias al desarrollo acelerado de la tecnología. Además, hace referencia al término “agricultura protegida” y cómo, a nivel mundial, se ha ido ampliando la cantidad de kilómetros cuadrados dedicados a este método de siembra (Valverde Delgado, 2023).

Para Valverde Delgado (2023), dentro de las recomendaciones para instalar un invernadero, estaba ubicarlo a no menos de 20 metros con el fin de evitar que algún producto agroquímico contaminara el cultivo. Asimismo, consideró la facilidad que debe haber a la hora de la carga y descarga de producto y durante la cosecha. Recomendó instalar rompevientos cuando la velocidad del viento fuera mayor a 40 km/h y elegir una buena orientación del invernadero con el propósito de que exista una buena ventilación que contribuyera a reducir la humedad y la temperatura, y que las plantas reciban la cantidad de luz necesaria.

Además de lo anterior, en esta investigación, se abordó el tema de las dimensiones del invernadero y las repercusiones en el costo de implementar una estructura de estas. Aspectos como material de la estructura, separación entre columnas, partes móviles y mecanismos necesarios para una automatización pueden incrementar el costo del proyecto. Sin embargo, se hizo referencia a un punto muy importante: la relación existente entre inversión o costo inicial de implementar el invernadero con respecto a la rentabilidad del producto cultivado (Valverde Delgado, 2023).

El autor dejó claro que los invernaderos eran estructuras que se podían acondicionar a diferentes características climatológicas, tomando en cuenta que existen lugares donde la temperatura supera los 30° C. Esto implica que se debe recurrir al uso de técnicas para contrarrestar esta situación, como diseñar el invernadero con algún

sistema de ventilación o sombreo. En la región Caribe y América Central, se suelen utilizar invernaderos clasificados como pasivos, ya que el método empleado para favorecer la ventilación es totalmente natural. Este tipo de invernaderos son estructuras de bajo costo y se les considera amigables con el medio ambiente (Valverde Delgado, 2023).

Del mismo modo, añadió la importancia de la velocidad del viento en las concentraciones de dióxido de carbono y lo contraproducente que podía ser para los cultivos. El análisis y cálculos realizados terminó con la instalación final del invernadero, donde posteriormente analizó los datos obtenidos sobre el cultivo de lechuga, destacándose, entre ellos, relevancia de la temperatura y humedad, porcentaje de mortalidad de las plantas, enfermedades que las afectó, sabor y condiciones óptimas para este cultivo, entre otras (Valverde Delgado, 2023).

Igualmente, según menciona Rodríguez Soto (2024), en su trabajo titulado: *“Digitalización en el sector agropecuario y desarrollo sostenible e inclusivo: experiencias en Costa Rica”*, en el país, se gestó una iniciativa en donde Corea del Sur realizó una donación de dos invernaderos inteligentes para validar la viabilidad productiva y económica de este tipo de tecnologías en Costa Rica, los cuales se instalaron en la Estación Experimental Los Diamantes en el Caribe costarricense. La idea era ubicarlos en áreas distintas con climas diferentes, sin embargo, las características de estas estructuras limitaron la instalación en lugares con pendientes y se optó por colocarlos en la estación experimental.

Además del gran aporte de la investigación realizada por Rodríguez Soto (2024), se concluyó que la tecnología podía favorecer el cultivo de hortalizas en zonas donde las características climatológicas no lo permitían por las altas temperaturas. Además, se debía tomar en cuenta la fuente de agua para la irrigación para evitar contaminación de las plantas. Esto se logra monitoreando variables físicas como temperatura y humedad, entre otras.

Por otra parte, en esta investigación, se hizo mucho énfasis en la importancia de la digitalización en muchos aspectos de la economía, entre ellos, el sector agro. Expuso,

de una manera minuciosa, ventajas, desventajas y conceptos, los cuales hacen que el término agricultura de precisión tenga una gran importancia para crear una sostenibilidad de las producciones y gestionar de una manera eficiente el riego en la agricultura (Rodríguez Soto, 2024).

La importancia de este trabajo continúa cuando se hace mención sobre el hecho de que el uso de tecnologías en este sector no sustituía las actividades económicas tradicionales, más bien las amplía, pero que sí mejoraba las capacidades y competencias de la población dedicada a la actividad agrícola. Era de mucho interés el método de estudios de caso utilizado, lo cual hizo que la investigación tuviera un enfoque cualitativo (Rodríguez Soto, 2024).

Continuando con los aportes de la investigación, se encuentran los impactos positivos aportados por la tecnología en el tema del cultivo del café y cómo mejoró la productividad de las plantas al duplicar la cosecha que, con métodos tradicionales, se realizaba. Además, cómo este hecho marcaba a las familias y, sobre todo, a las personas más jóvenes que, en ocasiones, optaban por abandonar la actividad porque tomaban como referencia los métodos tradicionales de ese cultivo (Rodríguez, 2024).

Finalmente, como último antecedente nacional, se destacó una primera prueba realizada por el sustentante durante el segundo semestre del año 2024 en el Centro Nacional Especializado en Electrónica ubicado en la provincia de Heredia sobre el uso de tecnología en el cultivo de lechuga. En esa ocasión, se monitorearon las variables de temperatura y humedad al registrar, durante un mes completo, estos valores, tomando muestras entre las 11:00 a.m. y 12:30 p.m. Los datos aportados por los sensores fueron claves para entender cómo repercute, sobre todo, la temperatura en el cultivo en esa zona central de Heredia.

Igualmente, dentro de las conclusiones de ese primer análisis, se pudo determinar que las hojas de la lechuga sufrían una afectación visible cuando la temperatura era superior a los 30° C., teniendo que recurrir a la cobertura del techo con bolsas negras para observar la respuesta del cultivo. Como resultado de esta estrategia, se logró

identificar la necesidad de limitar, durante ciertos momentos del día, la incidencia directa de la luz solar sobre las plantas.

Por otra parte, una vez identificados los valores de humedad del suelo por medio de los sensores instalados en el sustrato, se procedió a identificar los valores máximos y mínimos con los cuales las lechugas sufrían de estrés hídrico que afectaban su correcto desarrollo, para posteriormente controlar la activación del sistema de riego.

El invernadero donde se realizaron las pruebas era del tipo pasivo, pues la estructura tenía dos de los cuatro lados totalmente abiertos, lo cual facilitaba una ventilación natural para contribuir con el proceso de renovación del aire. El sistema de riego utilizado fue por goteo, aunque muy improvisado por el tipo de manguera utilizada, sin embargo, resultó ser funcional para el área específica. Aunque el sistema de riego era un tanto deficiente, se logró concluir que no era necesario regar el cultivo varias veces a la semana como se suponía al principio de la prueba. Por ende, no se logró determinar la cantidad de agua utilizada durante ese mes y los sensores de humedad no se calibraron.

En esta misma línea de ideas con respecto al sistema de riego, se pudo concluir la ventaja que proporcionaba el aplicar agua lo más cercano a la raíz de la planta. Esto permitía que las hojas de las lechugas permanecieran secas y evitaba la aparición de enfermedades. De hecho, durante el mes de prueba, se logró observar la presencia de mosca blanca en una cantidad muy pequeña y los niveles de humedad del suelo estaban por arriba del 70%. Cuando la humedad del suelo alcanzó valores entre el 50% y 60%, las hojas mostraban un estado excelente.

Por último, se realizó una inspección visual directamente en el suelo, escarbando el sustrato para observar la cantidad de insectos que pudieran afectar las raíces de las lechugas. Consecuentemente, se pudo concluir que, cuando el suelo presentaba humedades superiores al 70%, la cantidad de insectos observados era significativa. Si este valor se mantenía cerca del 50%, no existía presencia de ningún insecto en el suelo.

1.4.2 Antecedentes internacionales

Como primer antecedente internacional, se encuentra una investigación titulada: *“Impacto de las altas precipitaciones sobre un cultivo de lechuga crespa ubicado en la huerta del programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Santander. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB”*. Quintero Gómez, et al. (2022) determinaron la afectación sufrida por el cultivo de la lechuga cuando existía un exceso en las precipitaciones de lluvia que afectaron la región de Santander en España hace 3 años.

Esta investigación es relevante porque reflejó el impacto directo en el tamaño que sufría la lechuga en función de la cantidad de recurso hídrico a la que se le exponga. Además, aportó información muy relevante sobre el rango de temperaturas para el crecimiento de la lechuga, siendo en esta región de 18°C a 23°C, y cuando la temperatura era demasiado baja se podían producir pérdidas de hojas y retrasos en el cultivo (Quintero Gómez, et al., 2022).

De acuerdo con Quintero Gómez, et al. (2022), la lechuga se encontraba entre las hortalizas que más se cultivaban en climas fríos y la temperatura influía directamente en la calidad de los productos. De igual manera, existían lugares de España donde las fuertes lluvias impedían la producción normal de lechuga y su comercialización. A esto, se le unía la afectación sufrida por el cultivo por la presencia de enfermedades con un máximo de 40%.

Otro dato importante desprendido de la investigación realizada por Quintero Gómez, et al. (2022) hacía referencia a la función de drenaje que debía tener el suelo para que no afectara el desarrollo normal de la lechuga, ya que, si esto se presentaba, el cultivo tendía a hacerse más pequeño. Lo anterior indica que la metodología empleada por el autor era del tipo experimental, ya que recurrió al análisis de variables independientes como humedad, temperatura y riego para controlar una variable dependiente que sería el proceso o producto como tal (Murillo, 2011).

El segundo antecedente internacional por destacar es la investigación desarrollada por Pérez Guadarrama y Solórzano Salazar (2021) con el título: *“Eficiencia en la*

producción de lechuga hidropónica caso fresco cultivos hidropónicos". Esta tesis afirmó que la producción más común y utilizada en México para la lechuga era la siembra tradicional de campo. Mencionó la importancia de la temperatura a la cual crecía la lechuga utilizando este método de siembra. De esta tesis, se extraen otros datos relevantes como requerimiento excesivo y calidad del recurso hídrico en la siembra tradicional de lechuga.

Considerando la anterior investigación, se desprende que, en la siembra tradicional de lechuga, se han realizado algunas mejoras en cuanto al riego, utilizando coberturas de plástico para disminuir la evaporación del agua y suponer un ahorro en este tan esencial insumo. Aunque el costo inicial de implementar esta técnica es elevado, se puede compensar con los ingresos extras por el hecho de obtener una cantidad mayor de cosechas (Pérez Guadarrama y Solórzano Salazar, 2021).

A partir de su investigación, los autores dejaron claro que uno de los principales argumentos de la agricultura tradicional era realizar el cultivo directamente en el suelo, pues la idea era alimentar el suelo y no la planta. Por otra parte, si a esto se le suman algunas malas prácticas en la agricultura, se obtienen consecuencias negativas para el agricultor y el consumidor final del producto (Guadarrama & Solórzano, 2021).

Continuando con esta misma investigación, la estrategia de los autores de utilizar información recopilada directamente del campo por medio de un prototipo donde se cultivan las lechugas y realizar una comparación entre métodos tradicionales y novedosos de siembra, agrega un valor para esta tesis. Adicionalmente, toma aún más importancia por el hecho de que describe muy bien el sistema de producción de lechuga que tradicionalmente se utiliza (Guadarrama & Solórzano, 2021).

Siguiendo con los antecedentes de índole internacional, se encuentra a Carguachi Gamboy, et al. (2022) en la investigación "*Evaluación del rendimiento de lechuga crespa (Lactuca sativa L.) var. Batavia, en dos tipos de invernaderos, parroquia Calpi, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo*". En ella, se definió que, a toda estructura cerrada, no necesariamente hermética, construida de un material que permitiera el paso de luz y

que fuera capaz de mantener un clima controlado internamente, se le llamaba invernadero.

Además, se lograron evidenciar las ventajas y desventajas de este tipo de estructuras, las cuales, a la postre, repercutían en la calidad de un producto y en los costos de producción. A partir de ello, la relevancia que tiene para el actual proyecto. Se citó como ventaja el hecho de que un invernadero al propiciar condiciones favorables para los cultivos acortaba el desarrollo de las plantas al permitir un rendimiento mayor de la producción.

Entre líneas, se puede extraer que la problemática genera espacios para pensar en oportunidades de mejora, lo cual lleva a las personas a implementar ideas y acciones que aporten esa solución. Como en este caso, en la provincia de Chimborazo en Ecuador donde el problema principal se daba por las características de las condiciones climáticas presentadas en esa región con presencia de muy bajas temperaturas que provocan que el rendimiento en el cultivo de hortalizas sea muy bajo (Carguachi Gamboy, et al., 2022).

Debe señalarse que los autores aportaron los parámetros mínimos y máximos de temperatura en cuanto a las plantas y hortalizas cultivadas en invernaderos al definir una media mensual de entre 17°C y 27°C. Además, se puede optar por controlar esos valores gracias al método de siembra no tradicional. De este modo, los niveles de humedad relativa dentro del invernadero, según Carguachi Gamboy, et al. (2022), no debía ser superior al 80%. Por último, pero no menos importante, se señaló cómo se podía aumentar el rendimiento del cultivo de 2 a 3 veces en comparación con la siembra en terreno abierto, si se utilizaba un uso adecuado de sustratos (Carguachi Gamboy, et al., 2022).

Un antecedente de suma importancia es la investigación realizada en Perú por Berrios Gómez (2022) y denominada: *“Diseño de un sistema IOT para el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero”*. La relevancia radica en que el autor utilizó un microcontrolador ESP32 con conectividad Wifi y bluetooth, y se pudo determinar que este dispositivo era totalmente funcional para controlar el cultivo de la lechuga en un invernadero. En este caso, el sensor de temperatura utilizado fue DHT22, el cual tiene un

rango de temperatura, desde los -40°C , hasta los 80°C que se adapta a las condiciones de este país suramericano.

De igual forma, por el aspecto de las condiciones climatológicas propias de esa región, se debió considerar un ventilador y un calefactor con el fin de mantener las dos temperaturas programadas para el día y la noche. Asimismo, se incorporó un sensor ultrasónico para medir el nivel de agua en el tanque para el riego y un sensor resistivo con el propósito de medir la humedad del suelo (Berrios Gómez, 2022).

Es interesante analizar el hecho de que, en otras latitudes del planeta, es necesario tomar en cuenta mucho más variables que pueden influir en la siembra de un cultivo. En este caso, el autor mencionó que se debía tomar en cuenta las heladas y las temperaturas tan bajas presentadas en su país (Berrios Gómez, 2022). En Costa Rica, las variables por considerar son temperatura y humedad básicamente, pero, en cuanto a la estructura del invernadero, sobre todo el techo, no se debe contemplar este factor.

Ahora bien, según Berrios (2022), era muy importante realizar un riego adecuado en el momento oportuno y, sobre todo, cuando el cultivo lo necesite, ya que, de no ser así, se generaba una pérdida grande en la producción, lo cual suponía un gasto excesivo en el consumo de recurso hídrico. Como otro gran aporte del autor, se definieron conceptos y se introdujeron términos relacionados con el área de la electrónica, por ejemplo, sensores, actuadores, microcontroladores, protocolos de comunicación, software, entre otros.

Finalmente, todos los antecedentes mencionados adquieren un valor significativo para este proyecto de investigación. Todos suman y aportan datos relevantes de las dos especialidades que envuelven la temática. Esta sección es muy enriquecedora en cuanto a conocimiento, conceptos, destrezas y consideraciones de las dos áreas de estudio.

1.5 Proyecciones

El actual estudio tiene como objetivo proponer el diseño electrónico de un invernadero con tecnología de bajo costo para realizar la siembra de lechuga aplicado al Centro Nacional Especializado en Electrónica del Instituto Nacional de Aprendizaje (INA)

en Heredia. La propuesta es realizar el montaje de los componentes electrónicos necesarios que permitan conformar un sistema de control y monitoreo para este cultivo.

Este sistema estará instalado estratégicamente de manera que la lluvia no lo afecte y, a la vez, sea de fácil acceso para realizar labores de mantenimiento y ajustes técnicos que puedan surgir en el futuro. De esta manera, se desea demostrar que la tecnología puede realizar un aporte muy importante en las actividades agrícolas al contribuir con la sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales para mejorar la producción.

1.5.1 Alcances

Se instalarán sensores que medirán la humedad del suelo, la humedad ambiental, y la temperatura dentro del invernadero. En ese sentido, se realizará un proceso de calibración de los sensores para definir la humedad máxima registrada en el sustrato cuando el suelo se encuentre saturado de agua con el propósito de definir los valores a programar en la lógica de control por medio de software. El cableado de los sensores estará protegido con tubería para evitar que se dañe por efectos de la humedad y luz solar.

Por otro lado, se dispondrá de servomotores capaces de mover la malla de sombreado cuando la temperatura exceda un límite establecido, el cual se definirá en la lógica de control. Estos componentes estarán protegidos de la humedad y del calor intenso. Al respecto, se tiene contemplado hacer al menos una cosecha de lechuga sin necesidad de utilizar ningún plaguicida y utilizando la menor cantidad de agua posible. Asimismo, se registrarán los datos de temperatura, humedad del suelo y humedad relativa con el propósito de definir las mejores condiciones para el cultivo, específicamente, para el invernadero en cuestión.

Considerando lo anterior, se estarán realizando inspecciones visuales en el suelo para determinar la presencia de insectos que pudieran afectar el desarrollo de las lechugas y poder relacionar la aparición de enfermedades o plagas con respecto a la humedad del suelo y las otras variables. Por otra parte, se recopilará información sobre

condiciones, características y costos de producción de la siembra de lechuga por medio del método tradicional.

1.5.2 Limitaciones

Como obstáculos proyectados para esta investigación, se vislumbra la negativa que pudieran demostrar los productores entrevistados sobre el tema de costos en la producción de lechuga, así como la disposición de querer revelar datos importantes sobre el éxito alcanzado a través de los años de experiencia. Asimismo, podría ser una limitante que las entrevistas no sean directamente con los propietarios de la finca y la disponibilidad de horario de estos.

Del mismo modo, se visualiza una dificultad al extrapolar los resultados obtenidos con respecto a invernaderos mucho más grandes, además de la posibilidad de que, por un aumento considerable en las temperaturas para este primer semestre 2025, la malla de sombreado no sea suficiente para proteger el cultivo. Se prevé que, por la ubicación del invernadero, no se logren monitorear las variables desde un área más cómoda y, sobre todo, con un buen acceso a internet. Además, en la zona, se ubican varios árboles y paredes que pueden limitar el tiempo de luz solar a las que estarán expuestas las plantas.

En forma adicional, por estar dentro de las instalaciones de una institución pública, y tomando en cuenta que el área es un poco restringida y resguardada por personal de limpieza, el invernadero no dispone de un horario extenso para realizar pruebas, lo cual puede limitar los avances del proyecto. También, se podría presentar un retraso en el crecimiento de la lechuga o en el desarrollo de ella debido a alguna consideración más técnica relacionada con el área de agronomía no tomada en cuenta y afecte un mejor análisis final de los resultados.

Del mismo modo, se podría presentar una afectación por el diseño estructural del invernadero, ya que las camas de cultivo se fabricaron sin medidas exactas. Por tanto, se pueden presentar desniveles que afecten o incidan en el riego o en el funcionamiento del techo corredizo. Además, como el proyecto se está realizando dentro de las

instalaciones de una institución pública, las redes y el acceso a internet están administradas por el Departamento de Tecnologías de la Información (TI) del INA, lo cual podría imposibilitar algunas actividades de conectividad.

Por último, el proyecto se lleva a cabo en un área de siembra pequeña donde se realizará el proceso de experimentación, lo cual supone una limitante en caso de que se quiera aplicar en un área más acorde a la realidad de los productores agrícolas.

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Introducción

La presente investigación denominada: “Propuesta de diseño electrónico de un invernadero con tecnología de bajo costo para la siembra de lechuga en el Centro Nacional de Alta Tecnología en Electrónica (CENATE) del INA Heredia, utilizando el análisis de resultados y datos suministrados por sensores electrónicos durante el primer semestre del 2025” surge a partir del interés por investigar las ventajas de utilizar tecnología en la agronomía, específicamente en las actividades agrícolas, sobre todo en cuanto a la eficiencia del uso del agua. Para esto, se utilizarán componentes de bajo costo que implican la inversión mínima necesaria para implementar la propuesta en otros lugares.

Desde la infancia, por medio de los sistemas educativos, se les enseña a las personas a adquirir conocimientos a través de disciplinas separadas y a simplificar las tareas. Esto fomenta actitudes poco creativas e impide el desarrollo de habilidades multidisciplinarias, olvidando así el hecho de que la complejidad de las cosas es parte esencial para la comprensión del entorno (Ben y Adriana, 2016). Por lo anterior, se puede suponer que los avances tecnológicos aplicados a diferentes áreas hace mucho más complejo comprender las actividades realizadas cotidianamente. Estas se deben abordar con diferentes métodos de enseñanza que generen aptitudes y competencias acordes a la realidad actual.

Por lo tanto, es de suma importancia que, en esta sección, se definan conceptos claves relacionados con agronomía y electrónica, las cuales son dos ciencias entrelazadas en un tema en común: la innovación tecnológica. De tal manera que, según Tovar Soto, et al. (2019), los sensores más utilizados en el internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*) aplicados a la agricultura son los que miden temperatura y humedad, tanto para mediciones en el ambiente, como para el suelo. Es decir, de todas las variables físicas que se pueden medir en la agricultura, la temperatura y la humedad ocupan el primer lugar, y esto sin duda alguna involucra las dos ciencias.

2.2 Definición de agronomía

Borja Vivero y Valdivia Álvarez (2015) definen agronomía como una especialidad que estructura y organiza conocimientos de varias ciencias aplicadas, cuyo propósito es mejorar la calidad de los procesos productivos. Sus fundamentos son los principios científicos y tecnológicos integrados en los procesos agrícolas con el fin de hacer un uso apropiado de los recursos naturales. Esta ciencia involucra el estudio de diversos factores como químicos, biológicos, físicos, económicos y sociales.

La ingeniería agronómica es una ciencia que involucra una serie de conocimientos aplicados a las labores agrícolas y ganaderas. Dentro de estos conocimientos, se encuentra la tecnología aplicada a la producción alimentaria. Esta ciencia surgió formalmente aproximadamente entre los años 1850 a raíz de la práctica de la agricultura que se venía dando desde hace diez mil años atrás aproximadamente. La idea principal de la agronomía como ciencia se fundamentó en la aplicación de los conocimientos científicos-tecnológicos que apenas florecían en esos años con el objetivo de mejorar los niveles de producción y la calidad de vida (Equipo Editorial Etecé, 2024).

2.3 Agricultura

2.3.1 Definición

La Real Academia Española (1791) establece que, al grupo de técnicas y saberes relacionados con el cultivo o labranza de la tierra, se le denomina agricultura. Por tanto, existe una diferencia entre los términos agricultura y agronomía, diferenciándose principalmente en que la agricultura se considera un arte por medio del cual se cultiva la

tierra. Por otra parte, la agronomía es la ciencia que engloba a la agricultura, y se encarga de aspectos administrativos, comerciales, temas de tecnología, entre otros (Barrera Guzmán, 2022).

Al respecto, Borja Vivero Valdivia Álvarez (2015) aducen que, si hay una actividad que marcó el rumbo de la historia del ser humano, esta fue la agricultura. Ello porque se logró pasar de una vida nómada a una sedentaria, convirtiéndose en una de las principales actividades que sustenta la economía de muchos países no solo por el ingreso que inyecta a las finanzas, sino también por la gran generación de empleo directo e indirecto y por el gran aporte al consumo interno de la población.

La economía de muchos países a nivel mundial está basada en la agricultura y es el medio de subsistencia de muchas personas. Por ende, se convierte en una de las principales claves para combatir los niveles de pobreza y poder llevar alimento a una creciente sociedad. En ese sentido, las actividades agrícolas representan el 29% del producto interno bruto del mundo y el 65% de los empleos en todo el planeta (Zambrano, et al., 2021).

2.3.2 Orígenes y evolución de la agricultura

2.3.2.1 Origen

El sustento de la economía primitiva era la caza y la recolección de plantas. Entonces, se formaron los grupos de recolectores y cazadores. Estos empezaron luego un proceso lento de selección y manejo que condujo a la domesticación de las plantas y animales, lo cual abrió el paso a la agricultura. La región mesoamericana comprendida por los países actuales de México, Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica era uno de los tres puntos más importantes de domesticación donde se formó el sistema llamado “milpa”, que comprendía la siembra de productos como tomates, chiles, frijoles, maíz, entre otros (Villarreal y Marín, 2008).

En este proceso de domesticación, se parte del hecho de que uno de los factores más relevantes fue sin duda alguna la disponibilidad del recurso hídrico, tanto para el ser humano, como para los animales, lo cual provocó que se fundaran asentamientos de

personas en las cercanías de estos lugares. Se define domesticación al proceso por el cual el hombre selecciona, cultiva y maneja las plantas en diferentes ambientes y que, por el proceso evolutivo, han perdido la capacidad de sobrevivir en condiciones naturales (Villarreal & Marín, 2008).

Por otra parte, se les conoce como “manejo agrícola” a las alteraciones que el ser humano realiza al ambiente con el propósito de aumentar el tamaño de las plantas en beneficio propio. Esto originó que el hombre desarrollara conocimientos y técnicas con las cuales transformó y mejoró las características de las plantas adaptándolas a sus necesidades. Posteriormente, a todos estos saberes, técnicas y actividades relacionadas con las plantas y animales, se les conoce como “sistema alimentario” (Villarreal y Marín, 2008).

Aproximadamente hace unos 9000 años, quedaron establecidas las selvas en las tierras con una elevación no superior a 1500 metros sobre el nivel del mar. Los registros fósiles y la evidencia ecológica indican que, en la región suroeste de Mesoamérica hasta la costa sur de Panamá, existió una gran acumulación de carbón que demuestra el uso cotidiano que le dio el hombre al fuego, además de una acumulación de polen de diversos pastos que constituía la dieta de mucha fauna como venados, pecarí, conejos, roedores, entre otros (Villarreal & Marín, 2008).

El uso del fuego produjo alteraciones en los diferentes tipos de plantas. Como consecuencia, hubo una disminución y se produjo una rápida necesidad por dominar especies que tuvieran un periodo menor de crecimiento, principalmente, las plantas que presentaran un rápido rebrote en sus tallos y raíces. De igual manera, el hombre aprendió cuáles productos consumir gracias a que podía observar a los animales alimentarse, lo cual contribuyó al proceso de la cosecha. Dicha situación marcó el inicio de los primeros asentamientos humanos (Villarreal y Marín, 2008).

Si bien es cierto estos primeros asentamientos dependían de las estaciones climáticas, propició para que surgiera la primera etapa de la agricultura que implicaba quemar la vegetación con el fin de hacer crecer plantas comestibles con una mayor cantidad de materia orgánica y, de esta manera, aumentar la caza de animales y la

recolección. Durante esta etapa, se pudo haber dado el almacenamiento de semillas y, eventualmente, la germinación de algunas de ellas, lo cual le indicó al hombre el rumbo por seguir para proceder con la siembra (Villarreal y Marín, 2008).

De esta manera, Villarreal y Marín (2008) afirman que unas de las primeras plantas en ser domesticadas fueron la calabaza y el maíz hace unos 9000 años, mientras que los frijoles hace aproximadamente 6000 años. Para estas dos últimas plantas, los estudios indican que, por sus características propias, se domesticaron en zonas donde la altitud alcanzaba como máximo 1600 metros sobre el nivel de mar. Una de las plantas que se expandió mucho en Mesoamérica fue el *Agave angustifolia*, conocido con uno de sus tantos nombres como el maguey espadilla o maguey de monte, y que aún en la actualidad tiene una amplia distribución en México (Nogales, 2020).

Según Villarreal y Marín (2008), hace unos 5000 años la evidencia paleoecológica apunta a que existió una disminución en las acumulaciones de carbón y, a la vez, una aparición de piedras que servían para moldear, quebrar y descortezar plantas. Por otra parte, los estudios demuestran la aparición de hornos utilizados para cocinar sobre todo el agave. Esto propició la necesidad de las primeras herramientas para procesar esta planta, la cual representaba una de las principales fuentes de carbohidratos de esa etapa de la historia.

Lo anterior hace suponer que, conforme se fue dando la siembra y cosecha de cultivos, el hombre se vio en la necesidad de adaptar sus herramientas. De este modo, fue disminuyendo la dependencia del fuego para eliminar las especies de plantas de los terrenos, las cuales vivían durante más de dos años, permitiendo que el recurso hídrico fuera mejor aprovechado por las plantas de interés (Villarreal y Marín, 2008).

Posterior a esto, hace unos 4000 años, en la zona costera del Pacífico mesoamericano, se encontraron restos de utensilios empleados para el almacenamiento y cocimiento de productos, lo cual hace suponer que, para esa época, ya estaba bien definido el sistema alimentario conocido como la milpa, que, como se mencionó anteriormente, comprendía el consumo de alimentos como tomate, maíz, frijoles, agave,

entre otros. Esto dio paso al asentamiento de los grupos de personas a lo largo de toda la región, dando por iniciado el método de siembra tradicional (Villarreal y Marín, 2008).

2.3.2.2 Revolución agrícola

No fue hasta el año 1750, antes de la Primera Revolución Industrial, cuando, en Inglaterra, se inició una revolución agrícola debido a que los cercamientos y las explotaciones capitalistas eran los generadores del progreso (Allen, 2004). Los cercamientos eran parcelas de índole comunitaria que se conocían como “open fields”, los cuales pasaron luego a ser de carácter privado. Dicho evento acabó con los derechos tradicionales existentes e, incluso, se describe que hasta mediaron la fuerza y el derramamiento de sangre (Duffy, 2022).

Por consiguiente, se promovieron nuevos métodos agrícolas que habían sido ignorados por los anteriores agricultores. En aquel tiempo, los terratenientes emprendedores fueron los encargados de la reorganización y de definir sus nuevas empresas capitalistas delimitando y cercando los terrenos. Sin embargo, si se analiza esa revolución en Inglaterra en cuanto a la productividad durante el primer año, prácticamente, no produjo mayor cambio, pero viéndolo desde un punto de vista macro en el tiempo, el aumento fue significativo (Allen, 2004).

Esta época de transformaciones en el sector agrícola de Inglaterra llegó a su punto más alto a mitad del siglo XIX y trajo, como principal aporte, un aumento de la producción de materia orgánica por unidad de superficie y de tiempo en los cultivos. Esto a pesar de que, para esa época, el vapor y el carbón fungían como las claves de la primera Revolución Industrial, las cuales prácticamente no aportaron nada a la agricultura. Para estos años, predominó en la agricultura la utilización de la energía del hombre y la de los animales. No fue hasta las décadas de 1940 y 1950 cuando se comenzó a utilizar maquinaria como el tractor en la agricultura inglesa y estadounidense (Garrahou, 1994).

Por otra parte, entre los años 1870 y 1914, la productividad inglesa experimentó un crecimiento importante, el cual es hecho que se pudo haber originado por la utilización de fertilizantes industriales en tortas de semillas, que permitían un nuevo método de innovación que promovía un ahorro de suelo al no tener que usar sistemas de fertilización

basados en la elaboración de estiércol. Esto pudo haber dado paso a la “primera revolución verde”, convirtiéndose esta técnica en un nuevo modelo tecnológico (Garrabou, 1994).

2.3.2.3 Revolución Verde

De esta manera, se puede observar cómo la producción agrícola en todo el mundo ha tenido una gran cantidad de cambios a lo largo de la historia del ser humano y, sobre todo, en los dos últimos siglos. Esto se produjo gracias al impulso dado por el uso de fertilizantes y agroquímicos. Inclusive, la producción agrícola llegó a superar por mucho las cifras de aumento de la población mundial, y, a este hecho, se le llamó “Revolución Verde”. Se estableció en Estados Unidos entre los años 1940 y 1970. El fundamento de esta revolución era el hecho de sembrar en un área específica un solo cultivo utilizando fertilizantes y plaguicidas (Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro, 2018).

Con la experiencia de la Segunda Guerra Mundial, las grandes corporaciones estadounidenses aprendieron que la alimentación de los países desarrollados no podía depender de la estabilidad política de unos cuantos. Estas corporaciones vieron como una oportunidad de negocios ampliar los productos a otros países, y esto solo se lograba haciendo que la tierra produjera más, para compensar los gastos que esto implicaba. Para el año 1944, la Fundación Rockefeller, por medio de un genetista, propició avances científicos aplicados a la agricultura, desarrollando semillas de trigo de espiga grande que luego se modificaron para conseguir un tipo diferente de trigo más resistente (Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro, 2018).

De igual manera, en México, se realizaron pruebas con semillas de trigo modificadas en laboratorio y las sembraron abarcando el 9% de la producción total a modo de prueba. Sin embargo, una década más tarde, estas semillas mejoradas formaron parte del 90% del cultivo total. Además, se hicieron pruebas con diferentes tipos de maíz cuyas semillas también se modificaron, pero este experimento realizado en 1967 no llenó las expectativas debido a que la mayoría de los productores eran pequeños agricultores que no contaban con los recursos para continuar la explotación (Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro, 2018).

Como dato muy importante, cabe destacar que muchos consideran al científico estadounidense Norman Borlaug como el padre de la agricultura moderna por todo el trabajo realizado para la Fundación Rockefeller en territorio mexicano. De hecho, la frase “Revolución Verde” se utilizó para destacar el gran aumento en la producción en esas fechas gracias a las investigaciones de este importante científico. Posteriormente, dichos aportes fueron adoptados por otros países como Argentina, España, China, Turquía entre otros, con lo cual se abrió paso a la agricultura del tipo industrial (Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro, 2018).

En síntesis, esta revolución le dio un giro total a la agricultura y se amplió al resto del planeta, notándose un gran aumento en las producciones por medio del método de monocultivo, pero en grandes extensiones de terreno. Además, factores como uso de fertilizantes, riego y uso de plaguicidas, sumado a las ideas y tecnologías de la “Revolución Verde”, sentaron las bases de lo que se le conoce en la actualidad como agricultura convencional. A partir de esta revolución, se marcan las fronteras entre agricultura tradicional y agricultura convencional, ya que todas las prácticas usadas antes de 1940 o antes de esta revolución corresponden a la primera de ellas (Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro, 2018).

De esta manera, la Revolución Verde trajo beneficios como el hecho de impactar significativamente el combate del hambre en el planeta. Por otra parte, logró que muchas personas lograran adaptarse al cambio mejorando la calidad de vida. Sin embargo, se debe señalar que también dejó inconvenientes, como el gran daño provocado al medio ambiente por el uso de plaguicidas y el gran consumo de agua, además de la gran cantidad de energía necesaria para producir industrialmente (Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro, 2018).

En este mismo orden de ideas, la “Revolución Verde” ha demostrado, al pasar de los años, ciertas falencias que suponen la necesidad de un cambio. Se necesita suelo para cultivar y aun ampliando el área de cultivo, el terreno comienza a ser escaso y en algunos escenarios habría que considerar destruir bosques con una biodiversidad invaluable. Otro aspecto por considerar es el agua, la agricultura convencional hace un uso excesivo de este vital recurso (Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro, 2018).

2.3.2.4 Agricultura sostenible

Martínez Centeno y Huerta Sobalvarro (2018) expresan que la llamada “Revolución Verde” podría estar llegando al final. El factor suelo y el factor agua son los puntos determinantes que hacen visualizar en el horizonte la necesidad de implementar nuevas técnicas que consideren el impacto ambiental de las actividades agrícolas. En ese sentido, se prevé que, para el año 2030, existirán poco más de 7 000 millones de personas con una necesidad básica por satisfacer: la alimentación.

Para inicios del siglo XXI, ya se percibía la necesidad de cambio que se requería en los procesos agrícolas por los factores mencionados en el párrafo anterior. Por eso, para ese tiempo, se podía afirmar que la agricultura estaba en crisis, además de que se hablaba de la necesidad de buscar prácticas agrícolas sostenibles. Irónicamente, las bases que lograron una productividad exitosa en este campo son las mismas que impiden que se pueda alcanzar una agricultura sostenible, la cual considere los efectos secundarios del uso desmedido de los recursos naturales (Gliessman, 2002).

A raíz de esto, surge la necesidad de una “sostenibilidad”, donde se debe priorizar el tema de preservar la productividad con miras al futuro a través de la realización de cambios en las prácticas convencionales y tomando en cuenta el beneficio de todos los actores relacionados directa e indirectamente con la agricultura, es decir, que la sostenibilidad debe venir acompañada de empatía y consideración. Esto trae a escena lo que se le conoce como “agricultura sostenible” (Gliessman, 2002).

Es necesario recalcar que, con esta nueva ideología, se debe cumplir que los procesos productivos valoren y tomen en cuenta el uso racional de los recursos naturales como suelo y agua, además de promover el acceso tecnológico para los productores y que estos tengan un acercamiento al conocimiento. De hecho, la agroecología es una ciencia que hace uso de los conocimientos y metodologías ecológicas y los aplica en el desarrollo de ecosistemas agrícolas sostenibles. Esta ciencia está formada por la agronomía y la ecología (Gliessman, 2002).

Por tanto, según Mamani de Marchese y Filippone (2018), la “agricultura sostenible” es la puesta en marcha de actividades agrícolas que no solo estén alineadas con la preservación del medio ambiente, sino que, además, conduzcan a una producción económica y que socialmente sea razonable. De acuerdo con los autores, el uso de agroquímicos es un tema que se debe concientizar e impulsar en los productores, para que ejecuten buenas prácticas agrícolas con las cuales se logre realizar una transición hacia sistemas productivos eficientes y sostenibles. Estos insumos sostenibles, por llamarlos de una manera, deben estar a la disposición de las personas agricultoras.

De tal manera, dentro de la agricultura sostenible, se debe considerar el uso de biofertilizantes, es decir, abonos del tipo orgánico que aportan sales minerales y microorganismos que alimentan las plantas o al suelo. Dentro de estos insumos, se puede destacar el compost de estiércol y los abonos verdes. Estos tienen repercusiones positivas en cuanto al rápido crecimiento de los cultivos, aumento de la productividad y de la calidad del producto final. Dicha situación convierte a la agricultura sostenible en una de las bases promotoras de la reducción del uso de los agroquímicos en el sector agrícola (Mamani de Marchese y Filippone, 2018).

Ahora bien, acompañando al concepto de agricultura sostenible, se pueden mencionar otras terminologías relacionadas como “agricultura orgánica”, la cual también se conoce con los nombres de agricultura ecológica y agricultura biológica. La diferencia radica en que la agricultura sostenible permite el uso controlado de productos agroquímicos en las actividades agrícolas, siempre y cuando no se ponga en riesgo la salud humana ni la del ecosistema, algo que, en la agricultura orgánica, se prohíbe totalmente (Quintana y Estrada, 1994).

De igual forma, según mencionan Quintana y Estrada, (1994), se puede definir un paso a paso de las diferentes etapas con las cuales se puede implementar una conversión de un cultivo al método sostenible de agricultura. De esta forma y en orden cronológico, se detalla primero realizar un diagnóstico inicial del cultivo con el propósito de identificar las falencias del sistema actual; en segundo lugar, se deben valorar los obstáculos del tipo económico y técnico con el fin de realizar una correcta planificación.

Siguiendo esa misma línea, como tercera etapa, se encuentra hacer una realidad el nuevo proyecto, es decir, que se deben hacer los ajustes requeridos y todas las pruebas necesarias en el terreno cultivado para, posteriormente, proceder con el respectivo análisis de los resultados que arrojaron las pruebas de campo. Esta sería la última etapa donde por fin se determinarán los posibles cambios por realizar, teniendo siempre en cuenta que las nuevas técnicas deben adaptarse a los cambios de carácter ambiental que pueden sufrir alteraciones con el transcurso del tiempo (Quintana y Estrada, 1994).

En la agricultura sostenible, debe haber una disposición al cambio, pues implica que las personas productoras deben adquirir nuevos conocimientos no solo técnicos, sino también de índole ambiental y económicos. En este tema, es muy importante que las autoridades gubernamentales relacionadas con el tema colaboren con especialistas y técnicos en el área, acompañando y divulgando los avances, los logros y las ventajas para que se propicie, poco a poco, un cambio en la producción y esta cumpla con las nuevas exigencias requeridas por la sociedad (Quintana y Estrada, 1994).

2.3.2.5 Agricultura de precisión

Como se ha podido demostrar tomando en cuenta los párrafos anteriores, la evolución de la agricultura se ha dado de una manera acelerada sobre todo en los últimos tres siglos, teniendo como principal aliado el desarrollo científico-tecnológico disponible en cada etapa de la historia. Actualmente, se vive en una sociedad inmersa en el mundo de la digitalización, en donde el ser humano ha podido aplicar los avances tecnológicos en todos los ámbitos de la vida, trayendo desarrollo y bienestar para personas, pueblos y naciones (Rodríguez Soto, 2024).

Por consiguiente, según Rodríguez Soto, (2024), en el caso de la agricultura, tampoco se ha escapado del proceso de digitalización. En toda la cadena de valor desde la compra de las semillas, pasando por la producción, distribución y el consumidor final, media la digitalización. En algunos casos, la tecnología empleada puede ser sencilla como el uso de dispositivos móviles, pero, en otros casos, puede requerir personal altamente capacitado con ciertas certificaciones o permisos para hacer uso del equipo y

de la tecnología, tal es el caso de la utilización de drones para escanear áreas muy extensas de terrenos.

Lo anterior supone que, así como la digitalización se ha introducido en este sector, de igual forma, los actores involucrados en él deben adquirir nuevas competencias y conocimientos con el fin de no ser excluidos de las actividades que, durante mucho tiempo, han desarrollado. Es decir, se debe contemplar el proceso de alfabetización digital de las personas productoras, sabiendo que esta dinámica reduce costos, aumenta la productividad y contribuye con la preservación del medio ambiente (Rodríguez Soto, 2024).

El concepto de agricultura de precisión surgió en Estados Unidos y se comenzó a implementar a partir del año 1995 en Argentina. Tiene su fundamento en analizar, año a año, la cantidad de fertilizantes y plaguicidas utilizados en los cultivos con el propósito de controlar suelos y productos al tomar en cuenta las condiciones propias de las parcelas. La idea es utilizar estos insumos en los cultivos en las cantidades, en el tiempo y en los lugares exactos. Por medio de este tipo de agricultura, se ha podido mejorar las producciones en grandes extensiones de terreno de acuerdo con las diferentes tipologías (García y Flego, 2008).

De esta manera, este tipo de agricultura emplea el uso de las tecnologías de la información para administrar la producción eficientemente y lograr que las actividades sean más precisas a través de la recolección de datos. Sin embargo, la agricultura de precisión se puede encontrar con algunos obstáculos, por ejemplo, el acceso y manejo de equipo de cómputo por parte de las personas agricultoras y el hecho de que la inversión inicial es muy alta por el tipo de equipo requerido. Este se convierte en el principal reto para la implementación de este tipo de agricultura, y, por lo general, no se analiza las ventajas asociadas (García y Flego, 2008).

De este modo, tomando como referencia la información anterior y lo expuesto por Santos (2018), se puede afirmar que cualquier otra tecnología aplicada a la producción agrícola que ayude a disminuir el uso de insumos como fertilizantes, plaguicidas y recurso hídrico se enmarca en las técnicas que abarca la agricultura de precisión. Además, con

esta nueva manera de producir, se establece que la información suministrada por sensores y por la tecnología empleada se convierte en un nuevo insumo con el cual cuentan las personas productoras para generar mayor productividad y eficiencia, y lo principal: en armonía con el medio ambiente.

En la actualidad, la agricultura de precisión con todas las características antes mencionadas se practica en países con un nivel de desarrollo alto, como es el caso de Canadá, Brasil, Alemania, Estados Unidos y Argentina (Santos, 2018). Por lo tanto, es razonable que, en países subdesarrollados este tipo de actividades no sean tan conocidas o apenas se estén dando a conocer, y la puesta en marcha de los primeros proyectos sean abordados por muy pocas empresas que cuentan con los recursos.

2.3.3 Agricultura convencional y el impacto en el medio ambiente

Este tipo de agricultura enfrenta obstáculos en Latinoamérica del tipo económicos, sociales y ecológicos generados por la afectación del cambio climático que repercute en pérdidas significativas en las producciones agrícolas, lo cual entorpece este tipo de actividades. Sin embargo, aún con este detalle, la producción tradicional representa una gran fuente de ingresos para familias y generación de recursos para muchas economías (Carbajal, 2023).

En este mismo orden de ideas, Carbajal (2023) señala que el desafío actual para la agricultura convencional a nivel global radica en que tiene que enfrentar el crecimiento de la población, el desgaste ambiental y las grandes brechas económicas. Esto plantea la necesidad de producir alimentos en grandes cantidades. El objetivo primordial es lograr una producción sostenible de alimentos de fácil acceso, saludables, nutritivos y sin dejar de lado que sean seguros para el consumo humano.

Por otra parte, uno de los aspectos presentados por la agricultura convencional como gran desventaja es el elevado consumo de agua requerido para la producción. El 70% del consumo de agua en el planeta se debe a las labores agrícolas y se estima que para las próximas décadas esa cifra aumentará considerablemente, lo cual supone que debe existir un mejor manejo del recurso hídrico para resolver esta problemática (Torres-Cobo, 2024).

De la misma manera, este tipo de agricultura se apoya en el uso de agroquímicos aplicados en las grandes extensiones de terreno, lo cual ha causado la contaminación de las aguas. Esto ha generado otra problemática: la afectación directa que tiene sobre otras especies ya sea desapareciéndolas o disminuyéndolas, por tanto, ha alterado significativamente algunos ecosistemas. Aunado a lo anterior, se encuentran las estadísticas sobre la generación de los gases de efecto invernadero, donde se define que aproximadamente el 33% de estos gases en el mundo se deben a las actividades relacionadas con la agricultura (Buritica Fernández y Londoño Aristizabal, 2022).

Otra consecuencia del desarrollo de sistemas de producción agrícolas basados en la agricultura convencional es, sin duda alguna, la degradación de los suelos. Estas actividades son acompañadas por la utilización de insumos químicos que van poco a poco alterando las condiciones originales del suelo y excediendo la cantidad de partículas contaminantes permitidas, lo cual limita considerablemente la productividad que, en un principio, tenía el suelo, provocando que los cultivos no sean aptos para el consumo humano o afectando el correcto crecimiento de las plantas (Silva Arroyave y Correa Restrepo, 2009).

Igualmente, con respecto al recurso suelo, la explotación intensiva de las tierras a lo largo del tiempo con el propósito de producir cada vez más para satisfacer la necesidad básica de alimentación de las personas por medio de actividades agrícolas convencionales ha producido un gran aumento en la erosión de los terrenos (Verhulst, et al., 2015). A lo anterior, si se le suma la deforestación causada por la necesidad del ser humano de disponer de más terrenos para la siembra, queda en evidencia que se está ante una gran problemática (Garciglia, 2014).

2.3.4 Características de la agricultura tradicional

Se entiende por agricultura tradicional al método de siembra mediante el cual se hace uso del suelo y que se ha logrado, a través de muchos años, implementar por medio de experimentación campesina en un área determinada. Sin embargo, no se debe ver este método de siembra como un sinónimo de retroceso, sino más bien como una actividad que aporta información importante para desarrollar nuevos y mejores métodos

agroecológicos (Remmers, 1993). A esta definición, se le puede agregar que, en este tipo de agricultura, existe un bajo nivel de tecnificación y un uso mínimo de tecnología, la cual, generalmente, está relacionada con el cultivo familiar y de subsistencia (Carbajal, 2023).

De igual manera, Carbajal (2023) define la agricultura tradicional como un sistema evolucionado y desarrollado durante toda la historia del ser humano, y se ha ido adaptando a las condiciones de cada región y la cultura local. Los fundamentos del método de siembra tradicional son aspectos como conocimientos, técnicas y experiencia que se ha ido pasando de generación en generación y que consideran la preservación del medio ambiente.

En la agricultura convencional, los agricultores conocen muy bien el área de cultivo, por tanto, conocen sus pros y contras. Han podido definir su propia terminología y estas definiciones no son aceptadas desde un punto de vista científico. Por ejemplo, en la zona de Los Andes, existen productores que, cuando se refieren a lo bueno que es el terreno para la siembra, utilizan frases como “caliente” o “frío”. En este caso, no tiene nada que ver con la temperatura del suelo (Remmers, 1993).

En Perú, por ejemplo, se encuentra una zona llamada “Parque de la Papa”, donde se practica una agricultura considerada como ancestral con un fuerte compromiso con la sostenibilidad y el autoconsumo. Además, los productores han sabido enfrentar los cambios climáticos. En otra zona llamada la región de San Martín, este tipo de agricultura está adherida a las creencias de las personas y a la influencia lunar sobre los cultivos, los cuales son conocimientos mantenidos a través de las generaciones (Carbajal, 2023).

Por otra parte, la siembra tradicional diversificó los productos de cultivo para que las personas campesinas no solo dependieran de un producto en caso de que alguno otro se viera afectado por alguna situación. Esto hace suponer que los agricultores deben tener una zona definida dentro de su terreno para experimentar. Tal es el caso de la zona de Los Andes, donde existen personas que siembran diferentes tipos de papas o patatas, como se les conoce en algunas regiones, en áreas pequeñas del terreno para poder observar los resultados (Remmers, 1993).

Otra característica de este tipo de agricultura es que no solo contempla la diversificación de productos, sino que contempla la fabricación de fertilizantes con base en estiércol de animales, sembradíos en terrazas para combatir la erosión y uso de calendarios agrícolas. Esto aún se aplica en culturas indígenas y campesinas, donde se recurre al uso de conocimientos empíricos que han dado resultado por años (Carbajal, 2023).

La agricultura tradicional también puede tener un enfoque sostenible por medio de prácticas como la rotación de los cultivos, emplear abonos orgánicos que contribuyen a que los nutrientes permanezcan por más tiempo en el suelo, utilizar sistemas de riego eficientes que permitan un mejor aprovechamiento del agua. Estas técnicas y pensamientos hicieron posible que se introdujera el término “agroecología”, donde su principio fundamental es darle un enfoque sostenible a lo que por años se ha realizado (Carbajal, 2023).

La siembra convencional está muy propensa a que sufra de enfermedades y plagas que conlleva a pérdidas cuantiosas que en algunos casos no se pueden recuperar. Asimismo, se ha tenido que recurrir a estrategias para combatir esos males como, por ejemplo, el uso de microorganismos que devoren gusanos e insectos. De esta manera, se disminuye la utilización de productos químicos que contaminan el medio ambiente (Carbajal, 2023).

2.4 Agricultura en Costa Rica

Concretamente en Costa Rica, durante el siglo XIX, la agricultura experimentó cambios muy importantes cuando se implementó la utilización de nuevas técnicas de arado y la introducción de una de las primeras maquinarias agrícolas: el tractor. Se convirtieron en las primeras muestras de la inserción de tecnología en el país junto con otras como las despulpadoras y secadoras empleadas en los cultivos de café. Esto se utilizaba principalmente para la preparación de los terrenos, sin embargo, para la etapa de cosecha del café, no se usaba maquinaria y así ha sido hasta la fecha (Samper, 2024).

Según detalla Samper (2024), para mantener las plantaciones de café, la tecnología usada era básicamente los abonos orgánicos y, luego se comenzaron a utilizar los abonos sintéticos. Además, se fueron incorporando las semillas con modificaciones genéticas de mayor rendimiento, lo cual hacía suponer una modernización no solo del cultivo del café, sino también en otros productos como papa y hortalizas, entre otros. Cabe destacar que los gobiernos de turno en esas épocas apoyaron en gran medida estos importantes cambios tecnológicos.

Las favorables experiencias de la introducción de maquinaria en los cultivos en el siglo XIX en Costa Rica generaron una especie de política agraria donde se planteaba la importancia de mecanizar los procesos agrícolas, independientemente de si los productores contaban con los recursos económicos para adquirir el equipo, ya que esto traería incremento en las producciones. Sin embargo, dicha situación no se lograba palpar y, más bien, se creó una diferencia entre personas especializadas en agronomía con poder y agricultores a los cuales se les trataba de persuadir sobre las ventajas de las nuevas tecnologías y la diversificación de productos (Samper, 2024).

Consecuentemente, se comenzó una campaña de divulgación que destacaba las ventajas de introducir equipo en las actividades agrícolas y se hacía mucho énfasis en que reducía los costos y aumentaba las ganancias con menos horas de trabajo. Dentro de las máquinas promocionadas, estaban los arados de varios tipos y de diferentes marcas, los cuales, posteriormente, se popularizaron alrededor del año 1910 (Samper, 2024).

Aunque el tractor se inventó aproximadamente en el año 1890, en Costa Rica, se popularizó alrededor de 1940 con marcas como *Farmall A international*, *Caterpillar* y *John Deere*. Ello provocó que se sustituyeran los peones agrícolas, los cuales, a la postre, significaban un gasto mayor en comparación con el costo beneficio de comprar un tractor. Esta maquinaria pasó a convertirse en sinónimo de progreso y en una especie de descanso para el agricultor, y entre los años 1950 y 1970 se intensificó la compra de esta maquinaria (Samper, 2024).

Continuando con la agricultura en el ámbito costarricense, según Morera (2000), las actividades agrícolas han afectado el medio ambiente al provocar diferentes tipos de degradación del suelo, tal es el caso de la erosión y del incremento en los terrenos dedicados a la construcción de viviendas, que demandan una gran cantidad del recurso agua. Esto ha comenzado a generar conciencia y a crear una cultura de sostenibilidad por parte de los diferentes actores sociales involucrados en el campo de la agricultura en Costa Rica (Morera, 2000).

Por eso, debe existir una mentalidad de innovación y de liderazgo en las personas agricultoras y especialistas que obtengan resultados exitosos cuando implementen nuevas estrategias y técnicas que ayuden a minimizar el impacto de la agricultura convencional en Costa Rica. Según Morera (2000), debe existir participación de entidades gubernamentales, políticas y económicas para que promuevan, además, estas mejoras con el fin de crear un efecto multiplicador (Morera, 2000).

Una problemática presentada en Costa Rica es la movilización de personas del Gran Área Metropolitana (GAM) hacia lugares que cuentan con potencial para el desarrollo agrícola por causa de la gran densidad poblacional experimentada en esta zona. Esto contribuye a la degradación de los suelos por deforestación, afectando, por otra parte, el 6% de la biodiversidad representada por Costa Rica a nivel global.

Sin embargo, el aporte que la agricultura hace a las finanzas del estado es muy grande, generando, además, ingresos económicos por la exportación de diversos productos. La mayor parte de la canasta básica de Costa Rica la genera la agricultura y se estima que unas 300 000 personas se dedican de lleno a las actividades agrícolas. A pesar de esto, el margen de ganancia de los pequeños productores es muy baja en comparación con otros actores, como, por ejemplo, los intermediarios de los productos que pueden ganar hasta un 40% más que ellos, creando una ganancia desproporcional (Romero Calvo y Solórzano Quintana, 2023).

En la provincia de Cartago, se ha hecho un uso desmedido del agua y ha repercutido en el desarrollo de los cultivos. Esto ha provocado que el estado asigne partidas económicas para combatir esta problemática incentivando el uso sostenible de

los recursos naturales. Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, se continúa percibiendo una falta de compromiso en cuanto al ahorro de agua en esa provincia, estimulado además por el crecimiento poblacional de la zona (Romero Calvo y Solórzano Quintana, 2023).

En esta misma línea, es importante destacar que el Tecnológico de Costa Rica, institución de enseñanza superior situada en la provincia de Cartago, y el Ministerio de Agricultura y Ganadería formaron una alianza para mitigar la problemática del consumo de agua. La estrategia consistió en colocar sensores de humedad en una finca donde se cultivaba cebolla con el fin de economizar recurso hídrico que al final arrojó resultados muy positivos donde las plantas crecieron con más firmeza (Romero-Calvo y Solórzano-Quintana, 2023).

Una de las zonas en Costa Rica donde más se cultivan hortalizas es precisamente en la zona norte de Cartago. Esta provincia se acostumbra a relacionar con la gran producción de papa, o bien, como se le conoce en otras latitudes, patatas (Romero Calvo y Solórzano Quintana, 2023). Dentro de los productos que más acostumbra a consumir la población costarricense, además, se encuentran el chile dulce y el tomate, los cuales, en los últimos años, han sido muy afectados por el cambio climático (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024).

Sin embargo, otros cultivos de hojas verdes como el apio, el culantro y la lechuga son muy comunes, pero las variaciones de factor clima y el escaso recurso hídrico ha limitado la producción, afectando la economía familiar que dependen de estos cultivos, y provocando el desinterés de las nuevas generaciones, con respecto a las labores agrícolas. Esto ha desencadenado que el Estado, por medio del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), desde hace un tiempo, promoció el tema de la sostenibilidad. A la vez, divulga información sobre la adaptación requerida por los procesos de cultivo considerando las nuevas exigencias en el uso de los recursos (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024).

De esta manera, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2021), para el año 2020, las labores del tipo agropecuarias representaron el 4.9% del producto interno

bruto del país. Para ese mismo periodo, la mayor producción en la agricultura fue la de arroz, yuca, frijol, café, palma aceitera, caña de azúcar, teca y melina, ordenados de la mayor a la menor cantidad en toneladas métricas, respectivamente. En el campo de las exportaciones agrícolas, se destaca el banano y, según la Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña (2017), la piña ha posicionado a Costa Rica en el mayor exportador de esta fruta de todo el planeta.

Con respecto a la piña, se calcula que, aproximadamente, existen más de 200 productores distribuidos a lo largo del territorio costarricense, los cuales generan una fuente de empleo para las personas en zonas rurales. Asimismo, se considera que el cultivo de piña es una actividad que está en expansión, sin embargo, solo el 2% de esa piña se destina para el mercado interno. De manera indirecta, la piña genera aproximadamente 120 000 empleos y 32 000 en forma directa relacionados con la producción de esta fruta (Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña, 2017).

En relación con las hortalizas, una de las zonas donde más se genera empleo por la siembra es específicamente en Cartago, donde se pueden encontrar unas 3 000 fincas aproximadamente, mientras 450 hectáreas están dedicadas, de manera exclusiva, a la siembra de lechuga. El total de hectáreas sembradas de lechuga a nivel nacional es de 817, es decir, que, más de la mitad de la producción de lechuga en el país, se origina en la provincia de Cartago (Montero Ramírez y Solórzano Quintana, 2020).

La lechuga, o como se le conoce "*Lactuca sativa*", según el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (2024), es una planta desarrollada mejor en climas que están entre los 18°C a 25°C (Quintero Gómez, et al., 2022). Sin embargo, en Costa Rica, se ha podido comprobar que el cultivo de lechuga se puede realizar en ambientes con temperaturas muy elevadas alrededor de los 40°C, empleando la técnica de ambientes controlados y controlando la incidencia directa de la luz solar sobre las plantas. A finales del 2006 e inicios del 2007, en la provincia de Guanacaste, se lograron hacer varias cosechas en invernaderos utilizando hidroponía y las temperaturas dentro del invernadero promediaron durante las mañanas los 35° Celsius (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, 2021).

De igual manera, en la región de Pérez Zeledón, hace unos cuantos años, la Dirección Regional Brunca del Consejo Nacional de Producción colaboró con un grupo de más de 100 pequeños agricultores de la zona. Estas personas realizaron las adaptaciones necesarias para cambiar a la técnica de hidroponía para la siembra de hortalizas, de las cuales, el caso de las lechugas es el que más rendimientos generó. Esto contribuyó con el mercado local donde las características de sabor variaron y las hicieron más atractivas para el consumo, que propició contratos entre los productores y algunos comerciantes de la localidad, con un margen mayor de ganancias para los agricultores (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, 2021).

2.4.1 Siembra de lechuga en terreno abierto

Ahora bien, la siembra convencional de lechuga en Costa Rica se ha caracterizado por desarrollarse en terrenos abiertos que superan las 800 hectáreas en todo el territorio nacional y, en forma tradicional, se hace un uso bastante considerable de agua. Durante aproximadamente 7 meses que dura la época seca, los agricultores, ante la falta de agua, deben optar por utilizar otras fuentes para acceder a este recurso, lo cual les genera gastos adicionales. Por otra parte, a esto, se le suma la necesidad de combatir enfermedades en las plantas durante la estación lluviosa por excesos de humedad combinado con la acción de las altas temperaturas (Montero Ramírez y Solórzano Quintana, 2020).

Lo anterior provoca que los márgenes de ganancia de la producción sean menores. Es decir, que los dos factores que disminuyen las ganancias utilizando el método convencional de siembra son los asociados a las plagas y enfermedades y el gran consumo de agua. De manera convencional, se recurre a los almácigos para la siembra de lechuga y el periodo de cosecha es de aproximadamente un mes y medio, el cual, en comparación con otros cultivos, es un tiempo corto. Además, las raíces son pequeñas por eso se debe considerar que cuenten con buena humedad (Montero Ramírez y Solórzano Quintana, 2020).

En lo referente al clima y a las altas temperaturas, tradicionalmente la estrategia es observar la reacción del cultivo y decidir el momento indicado para aplicar un riego por

aspersión, es decir que, cuando visiblemente las hojas tienden a decaer, se aplica el riego o los riegos necesarios. Sin embargo, en algunas ocasiones, cuando la temperatura es un poco más alta de la que soporta teóricamente la lechuga, no se le aplica riego. El método que debe utilizar el agricultor en estos casos está cien por ciento basado en la observación y en la experiencia adquirida a través de los años (F. Agüero, comunicación personal, 2025).

2.4.2 Ventajas de siembra de lechuga en terreno abierto

La siembra convencional permite que algunos pequeños productores continúen con la actividad, generándoles ingresos suficientes para subsistir, siempre y cuando el terreno sea propio, ya que existen agricultores que alquilan el área de cultivo. Una característica de este tipo de agricultores es la edad, es decir, son personas que toda la vida han labrado la tierra y tienen muchos años de dedicarse al oficio, y a ellos, les resulta hasta cierto punto económico. Se puede asumir que este tipo de producción hace uso de la experiencia y por medio de la cual se ha establecido procedimientos por décadas y que no requieren una inversión nueva, más de la que se acostumbra (F. Agüero, comunicación personal, 2025).

Otra ventaja que se puede mencionar, según Agüero (2025), es la relacionada con la fuente de agua para el riego. Por lo general, se recurre al agua disponible de quebradas o ríos y se aprovecha para realizar el riego por gravedad, aunque en ocasiones se puede disponer de pozos artesanales donde se recubren con algún plástico y luego se almacena el agua. Además de esto, vale la pena mencionar que estas actividades generan empleo, pues se debe contar con personal que realice labores de “deshierbe” y fumigación. Entiéndase como deshierbe al proceso mediante el cual se quita la maleza que puede afectar el cultivo.

2.4.3 Desventajas de siembra de lechuga en terreno abierto

En contraste, en este método convencional de siembra, se ha podido identificar algunas desventajas. Se ha comprobado que la calidad del producto es menor en comparación con otros métodos más modernos. Otro aspecto desfavorable para la

siembra convencional es el tiempo requerido para poder realizar una cosecha, ya que por este se incrementa si se compara con otras técnicas. Además, cultivar de manera convencional favorece el uso de una mayor cantidad de agroquímicos por la afectación que se genera en las plantas causado por plagas o enfermedades y que, a largo plazo, no es rentable (F. Agüero, comunicación personal, 2025).

En esa misma línea, este tipo de siembra al aire libre puede provocar contaminación de los cultivos por el hecho de que muchas de las fuentes naturales que se usan para el riego en Costa Rica están contaminadas. El aumento poblacional ha dado paso al proceso urbanístico al afecta o destruir ríos y quebradas, lo cual provoca su contaminación. Existen leyes que protegen y favorecen la conservación del agua a nivel nacional como por ejemplo la Ley General de Aguas y la Ley Forestal, entre otras. Sin embargo, estas leyes no cumplen su cometido (Gastezzi Arias, et al., 2017).

2.4.4 Tipo de suelo para la siembra de lechuga

El suelo es considerado un recurso natural limitado que, a través del tiempo, se ha ido degradando por la explotación continua de las actividades agrícolas entre otras causas y que es esencial para la vida en el planeta (Torres y Rojas, 2018). Otra definición es la detallada por Carvajal (2023), quien describe al suelo como el medio óptimo para que las plantas se desarrollen porque les suministra los nutrientes y el agua requerida, además de que es indispensable para que las plantas luzcan firmes desde sus raíces.

Sin embargo, esta última definición podría suponer ciertas dudas, ya que, en la actualidad, existen otros medios como por ejemplo el agua, con el cual se puede cultivar, tal es el caso de la hidroponía. Entre los principales elementos aportados por el suelo a las plantas, se encuentran minerales, aire, agua y materia orgánica. De esta manera, se considera el suelo como un sistema complejo que puede cumplir varias funciones en los ecosistemas, por los cuales circula gran cantidad de materia orgánica e inorgánica. Se pueden citar nutrientes como magnesio, potasio, calcio, nitrógeno y fósforo, entre otros (Arias, et al., 2018).

Para la siembra de lechuga, se recomienda una profundidad del suelo de al menos 45 cm y que se disponga de un buen drenaje para evitar encharcamientos. Por otra parte, se debe procurar que el grado de acidez del suelo o pH sea de 6 a 7. Por eso, es recomendable realizar un análisis del suelo, ya que, si el pH no es el correcto, se puede aplicar cal o carbonato de calcio varios meses antes de proceder con la siembra para evitar que el desarrollo de las plantas sea desfavorable (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024)

Una técnica para preparar el suelo es la utilización de compost o estiércol para agregar una mayor capacidad del suelo para retener minerales y agua. Además, es importante considerar el tamaño de las eras, ya que esto puede facilitar o limitar las labores de mantenimiento durante la producción o cuando sea el momento de realizar la cosecha. Las dimensiones recomendadas de las camas de cultivo son 6 metros de largo por 1.2 metros de ancho (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024).

Cuando se habla de preparar el terreno, se hace referencia a realizar el proceso de arado y de aplicar abono orgánico. El primero ayuda a la aireación del suelo y remueve la parte superficial del terreno, luego se deja reposar y se agrega el abono, esto al final propicia las condiciones necesarias para la siguiente etapa que es la siembra o el trasplante de las plántulas. En procesos de producción a gran escala, se recurre a equipo o maquinaria para estas labores iniciales de preparación del área de siembra. Se debe considerar que, aunque el terreno sea en pendiente, las camas de siembra se pueden nivelar (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024).

Una técnica empleada en la siembra convencional es la de realizar una especie de barrera formada por árboles próxima al terreno. Esto contribuye a la aparición de aves que pueden combatir la proliferación de insectos en los cultivos, sin necesidad de recurrir a la utilización de insecticidas (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024). Es decir, esta técnica se convierte en una muy buena técnica natural y, sobre todo, económica.

De esta forma, considerando las nuevas formas de cultivar existentes, se presenta la necesidad de mencionar y establecer las diferencias entre suelo y sustrato. El suelo se considera un material exterior que aporta minerales, aire, agua y que contiene materia orgánica, y todos estos elementos juntos les dan soporte a las plantas. El sustrato por otra parte es un medio por el cual se le transmite los nutrientes a las plantas y puede ser del tipo orgánico, mineral o artificial, y que se originaron con el propósito de poder desarrollar cultivos en recipientes (Leonardo, 2013).

En consecuencia, se pueden definir varios tipos de sustratos: fibra de coco, aserrín, turba, humus, compost, entre otros. Comúnmente, los agricultores recurren a empresas o personas dedicadas exclusivamente a la germinación y desarrollo de las plántulas, que posteriormente las venden en almácigos para luego trasplantarlas al terreno dedicado para la siembra. En Costa Rica, estas empresas deben tener un certificado del Servicio Fitosanitario del Estado, el cual demuestra que el producto está libre de enfermedades (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024).

Todo lo que se ha descrito hasta este punto es aplicable para la siembra de lechuga en cualquier parte de Costa Rica. Sin embargo, esto hace suponer que existirán regiones, las cuales, por las condiciones climáticas propias de la zona, no se pueden adaptar y desarrollar este cultivo, sobre todo por el efecto de las altas temperaturas. Por ejemplo, en la zona de San Antonio de Escazú, provincia de San José y bajo el testimonio del agricultor Agüero (2025), para la siembra de lechuga se procede de igual manera. En forma adicional, se deben preparar bien el terreno, el tipo, el ancho y la altura de las eras, lo cual se define dependiendo de las características propias del terreno, además de añadir los nutrientes necesarios al suelo.

2.4.5 Insumos requeridos para la siembra tradicional de lechuga

Agüero (2025) aduce que, en el sector de Escazú, se acostumbraba a utilizar el riego con mariposa, sin embargo, desde hace un tiempo, se cambió al método de riego por micro aspersores, aplicando, por lo general, un riego por día. En lo referente a la cantidad de agua utilizada, no se puede calcular cuánto se gastaba por metro cuadrado, por tanto, dicha labor se realiza según el cálculo y la experiencia propios. La única manera

como tal vez se podría calcular el consumo de agua sería llenando un tanque o tanqueta y utilizar el agua hasta que se agote por completo para así definir, al menos, una cantidad de agua en un determinado tiempo.

Por otra parte, si bien es cierto se genera empleo en las fincas donde se produce de manera convencional, es necesario considerar que esto representa un gasto más en las finanzas de los agricultores. Dichos gastos que, con otros métodos modernos, no se requerirían. Por ejemplo, en época de invierno, se debe deshierbar y, para esto, se necesita mano de obra que tiene un costo aproximadamente de 10 000 o 12 000 colones por peón por día y se debe tomar en cuenta que puede ser dos días realizando este proceso, y hasta dos “deshierbadas” por cosecha (F. Agüero, comunicación personal, 2025).

Cuando se siembra en terreno abierto, los costos por concepto de plaguicidas son mayores que lo que se invierte en verano, a causa de la afectación que sufre el cultivo por las continuas lluvias que incrementa la humedad en las plantas. Por esto, se debe invertir más dinero en fungicidas, y más aún cuando en esta época se alarga o es muy intensa. En contraste, durante la estación seca, lo que más se utiliza son los insecticidas, pero se hacen menos aplicaciones que en el caso de los fungicidas (F. Agüero, comunicación personal, 2025).

De este modo, según Agüero (2025), si se habla del uso de fungicida se sabe que en una siembra de lechuga se puede invertir dos litros que rinden dos estañones, y con esto se puede aplicar unas 20 bombas de fungicida al cultivo, y el consumo es directamente proporcional a las dimensiones del terreno. Por lo tanto, para tener una referencia del consumo de fungicida, en 1500 m^2 en terreno abierto se puede aplicar 2 bombas y en 500 m^2 en invernadero se aplica solo media bomba.

Por consiguiente, la cantidad de aplicaciones depende de la afectación y existe la posibilidad de que sea necesario aplicar dos tipos de fungicidas por la presencia de dos enfermedades diferentes. Entonces, al final de la cosecha, se estaría invirtiendo en 4 litros por concepto de fungicidas. En cuanto al fertilizante, se pueden realizar dos abonadas, un saco por abonada para un total de dos sacos por cosecha, y, dependiendo

del terreno se puede gastar más o menos fertilizante. Se usa mucho el fertilizante granulado y el costo por saco puede rondar los 35 000 a 45 000 colones (F. Agüero, comunicación personal, 2025).

2.5 Invernaderos

2.5.1 Definición

Se define como invernadero a las estructuras que propician y generan una especie de ambiente controlado para la siembra de plantas. Este ambiente puede estar aislado total o parcialmente de factores como la lluvia y el viento. Estas estructuras deben estar hechas con materiales que soporten las fuertes ráfagas de vientos, además de que deben estar cubiertas con un material transparente. De esta manera, se puede regular la temperatura, la incidencia directa de la luz solar sobre las plantas, y facilita la siembra de productos durante cualquier época del año, que en condiciones al aire libre sería muy difícil lograr (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024).

Cuando se desea instalar un invernadero, se deben considerar factores como nivelación del terreno, dirección y magnitud del viento, recorrido del sol, fácil acceso al invernadero durante el periodo de cosecha y posibles fuentes de contaminación química que podrían afectar los cultivos. Por lo anterior, en Costa Rica, la gran mayoría de empresas dedicadas a la producción de almácigos lo hacen en ambientes controlados con el objetivo de asegurar la calidad de las plantas en su etapa inicial (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, et al., 2024).

De este modo, los invernaderos más utilizados son los que están cubiertos por materiales plásticos como el polietileno, policarbonato, poliéster, entre otros. Estos materiales transparentes se colocan sobre una estructura de madera, de hormigón o de metal. Se puede encontrar invernaderos con ventanas frontales y cenitales, además de varias puertas para el acceso y salida de la estructura (Serrano Cermeño, 2005).

2.5.2 Tipos de invernaderos

Para poder clasificar un invernadero, no solo se debe considerar su forma física, sino también definir el tipo tomando en cuenta el material del techo y el material del que está fabricada la estructura. Existen algunos invernaderos que posibilitan su reubicación en otros lugares o que se pueda ampliar el terreno ocupado, es decir, son un tipo de invernadero móvil. Asimismo, los invernaderos se pueden clasificar de acuerdo con la temperatura predominante durante las noches. De esta manera, existen invernaderos del tipo frío (de 2 a 10°C), templado (de 10 a 14°C) o calientes (de 6 a 20°C) (Serrano Cermeño, 2005).

Sin embargo, lo más común es clasificar los invernaderos por su forma física y estructural. Están los de techo plano, los de forma de capilla, los de forma de diente de sierra, los de túnel o que su techo tiene una forma redondeada, además de que existen los que tienen techo a una o dos aguas. Para cada uno de estos tipos de invernaderos, existen medidas y recomendaciones específicas para cuando se desee diseñarlos, por ejemplo, altura del techo, ancho, caídas y desniveles de las aguas, etc. (Serrano Cermeño, 2005).

Aunado a lo anterior, es importante mencionar que existen invernaderos del tipo pasivo, los cuales se caracterizan por permitir una ventilación natural que contribuye a contrarrestar los efectos de las altas temperaturas presentes en algunas regiones. Por consiguiente, se recurre a diseñar el invernadero de manera tal que esta estructura solo cuenta con el techo de material transparente y sus laterales abiertos (Valverde Delgado, 2023). Consecuentemente, se puede suponer que no necesariamente los cuatro laterales de la estructura deben estar abiertos, es decir, se puede tener al menos uno o dos lados cerrados, quedando los otros abiertos para favorecer la ventilación interna.

2.5.3 Ventajas de los invernaderos

La siembra en invernaderos supone muchas ventajas. De este modo, Serrano Cermeño (2005) considera que, algún día, algunos productos se van a dejar de desarrollar por medio de siembra convencional. El hecho de poder cultivar en cualquier

época del año es una gran ventaja que aumenta la productividad, ya que los cultivos no dependen de las condiciones climáticas del exterior. Esto posibilita la siembra de algunos productos en localidades donde, por las altas o bajas temperaturas, sería imposible realizarla.

Otras ventajas de los invernaderos son aspectos como calidad obtenida de los productos, ahorro en el consumo de agua, ya que se puede controlar el riego y, por ende, cantidad de humedad de las plantas. A su vez, esto ofrece la gran ventaja de poder realizar un mejor control de enfermedades y plagas, algo que no se podría lograr con el método de siembra convencional, y que en la práctica suele aparecer de repente, generando costos adicionales para los agricultores que no se tenían contemplados al inicio (Serrano Cermeño, 2005).

2.5.4 Desventajas de los invernaderos

Si bien la utilización de invernaderos presenta ventajas, de igual manera, se pueden describir y definir algunos aspectos no muy favorables. Primero, se debe tener claro que estas estructuras deben ubicarse en lugares estratégicos donde se consideren las fuertes ráfagas de viento para que no pongan en riesgo la integridad de la estructura y de las personas, además de tener disponibilidad de agua y de energía eléctrica. Por otra parte, un invernadero exige que el suelo sea de muy alta calidad y debe tener una buena inclinación de las aguas del techo para que el agua llovida u otros elementos no obstruyan la incidencia de la luz (Serrano Cermeño, 2005).

De este modo, la utilización de invernaderos supone que las personas agricultoras deben tener cierto nivel de conocimiento técnico para poder sacar el máximo provecho de la estructura (Serrano Cermeño, 2005). Otra desventaja, según Carguachi Gamboy, et al. (2022), es la relacionada a la inversión inicial de implementar el invernadero. De esta manera, se pueden encontrar invernaderos con diferentes precios, los cuales oscilan, desde los \$1500, hasta los \$100 000. Su precio es definido por ubicación donde se instale, las medidas finales de la estructura y los materiales de construcción (Jacto Agricultura e Manejo, 2023).

Por lo tanto, algunos invernaderos del tipo casero y que tienen precios más bajos están contruidos con paneles de policarbonato; sin embargo, de este material también existen invernaderos del tipo comercial. Como se puede suponer, un factor que también encarece el invernadero es el nivel de automatización y la cantidad de componentes tecnológicos con los que cuente (Jacto Agricultura e Manejo, 2023).

2.6 Electrónica

Al principio de este capítulo, se mencionó la importancia de establecer los conceptos claves de las dos ciencias involucradas en esta investigación. De manera que se dejará de lado lo concerniente a la Ingeniería Agronómica para detallar los conceptos relacionados con la Ingeniería Electrónica y los componentes electrónicos que son relevantes para este proyecto.

2.6.1 Definición

En la historia del ser humano, nunca se había visto los avances tecnológicos que impactaran, tanto en la vida cotidiana de las personas, como en el presente siglo. La transversalidad de la electrónica ha impactado mucho en otras áreas y ha provocado que el profesional adquiriera conciencia y un espíritu de colaboración, para que, por medio su conocimiento, contribuya con proyectos que involucren investigación y desarrollo en otras especialidades. Esto ha provocado que los ingenieros adquieran nuevos conocimientos para poder ser capaces de solucionar las exigencias de la industria (Cervantes, 2020). Por ello, se considera la Ingeniería Electrónica como parte fundamental del crecimiento social y económico de los países y es catalogada como una de las carreras que más aportes puede realizar en las próximas décadas (Cervantes, 2020).

De esta manera, se puede definir la Ingeniería Electrónica como el conjunto de capacidades, conocimientos y actividades que permiten usar herramientas y dispositivos de manera científica. Esta especialidad se enfoca en investigar, planificar y diseñar sistemas electrónicos que se resuelven problemas reales de la sociedad y la industria. Esto se realiza por medio del análisis de las variables del entorno y favorece al desarrollo de los países (Revista, 2001).

2.6.2 Componentes electrónicos

2.6.2.1 Microprocesador

Antes del año 1970 aproximadamente, los circuitos electrónicos que ejecutaban alguna tarea lógica eran considerablemente grandes, lo cual complicaba las labores de localización de fallas por la gran cantidad de componentes que conformaban el sistema (Aguayo, 2004). En noviembre de 1971, la empresa Intel tomó la ventaja en la venta de microprocesadores lanzando al mercado el i4004 de 4 bits, cuyas características principales eran que contaba con 2 300 transistores, una velocidad de reloj de 100 KHz y podía realizar 60 000 cálculos por segundo (Infobae, 2011).

De esa fecha en adelante, se ha tenido una gran revolución en cuanto al diseño y características de los microprocesadores, hasta llegar a uno de los procesadores más modernos de Intel como el i9-13900KS, con una frecuencia máxima de reloj de 6GHz, un procesamiento de 64 bits y una salida de gráficos integrados a una frecuencia de 1.6GHz con tecnología de 10nm por transistor (Intel, s.f.) Después de cuatro años aproximadamente, apareció la empresa AMD (*Advance Micro Devices*) como fabricante de microprocesadores (Soltek Online, 2020).

De esta manera, AMD ha llegado a competir muy seriamente con Intel mediante procesadores de alto rendimiento como el AMD Ryzen 9 7950X3D, el cual tiene una frecuencia máxima de reloj de 5.7 GHz, procesamiento de 64 bits, gráficos integrados a 2200MHz y una tecnología de 5nm (AMD, s.f.) El primer procesador de la marca AMD se lanzó en el año 1975 y se llamó AMD 9080, el cual se diseñó aplicando técnicas de ingeniería inversa tomando como base el procesador Intel 8080 (Profesional Review, s.f.)

Sin embargo, con toda esta evolución, cuando se presenta la necesidad de diseñar sistemas electrónicos que cumplieran funciones específicas que requieran de un microprocesador, es imperativo que se le agreguen algunos otros componentes o circuitos integrados para que el procesador realice su trabajo. Circuitos como memorias ROM (*Read Only Memory*) y RAM (*Random Access Memory*), decodificador de instrucciones, circuito integrado para los puertos de entrada y salida, son fundamentales

para que un sistema basado en un microprocesador o procesador, como se le conocen actualmente, funcione (Aguayo, 2004).

Con base en lo anterior, se puede deducir que el procesador es, por decirlo de una manera, el “cerebro” de muchos sistemas. Sin embargo, para que funcione ese “cerebro”, se le conectan y configuran otros circuitos integrados externos. Al final, el sistema está compuesto por varios circuitos integrados que se interconectan entre sí y se comunican para cumplir funciones específicas. De este modo, según Valdés & Areny (2007), cuando todos estos componentes se agrupan, forman lo que se conoce como un microcomputador.

2.6.2.2 Microcontrolador

El procesador es solo una parte que compone un microcontrolador. En un único circuito integrado, se encuentran el procesador, las memorias RAM y ROM, el control de direcciones y los recursos de entrada y salida. En un microcontrolador, todas las instrucciones se realizan a una velocidad de procesamiento, gracias a un oscilador que, por lo general, es un cristal de cuarzo, que proveen una mejor estabilidad de frecuencia. La velocidad con que el microcontrolador ejecuta las tareas es directamente proporcional a la frecuencia de este oscilador (Valdés & Areny, 2007).

Los componentes básicos de un microcontrolador son el CPU (*Central Processing Unit*, Unidad Central de Procesamiento), la memoria, que se divide en memoria de programa y memoria de datos, buses, lo cuales, a su vez, pueden ser de direcciones, de control o de datos, y, por último, las conexiones o puertos de entradas y salidas. El primer microcontrolador fue fabricado por la empresa estadounidense *Texas Instruments*, la cual lo utilizó en las primeras calculadoras. A partir del año 1974, se lanzó al mercado (Igea y Zamarreño, 2021).

Actualmente, las empresas fabricantes de microcontroladores utilizan dos arquitecturas en sus diseños. Se puede encontrar microcontroladores con la arquitectura Von Neumann y con la arquitectura Harvard. La diferencia radica en que la primera utiliza una sola memoria para escritura y lectura, ralentizando un poco la velocidad con que se

procesa los datos, y, la arquitectura Harvard, incorpora dos memorias independientes, una para los datos y otra para las instrucciones, lo cual permite acelerar la velocidad de procesamiento (Igea y Zamarreño, 2021).

2.6.2.3 Placas de desarrollo

Conforme se popularizó y se extendió el uso de los microcontroladores, se abrió paso a las placas de desarrollo. Estos dispositivos consisten en una tarjeta que incorpora un microcontrolador que se puede programar y borrar las veces que sean necesarias. Pueden ejecutar instrucciones de control haciendo uso de las entradas analógicas o digitales. Además, disponen de la circuitería necesaria para el suministro de energía (Igea y Zamarreño, 2021). Con la aparición de estos sistemas, se abrió la oportunidad de acceder a herramientas de desarrollo con software de uso libre (Millahual, 2020).

A. *Arduino*

De esta manera, surgió una de las más populares tarjetas de desarrollo: Arduino. Se define como una plataforma que involucra *hardware* y *software* “*open source*” o código abierto, y fue creada con el propósito de colaborar con el uso y enseñanza de proyectos electrónicos. Básicamente, es una tarjeta que consta de un microcontrolador, entradas y salidas, tanto analógicas como digitales, y cuenta con una gran comunidad que forma parte esencial de la plataforma (Millahual, 2020).

Massimo Banzi, creador de Arduino en el año 2005, diseñó la plataforma con fines didácticos para estudiantes del Instituto IVRAE ubicado en el noroeste de Italia con el propósito de contrarrestar el precio elevado de las placas de aquellos años. Sin embargo, no contaba con un lenguaje de programación y, gracias al aporte de David Mellis y Harmando Barragán, se creó el primer entorno de programación al cual llamaron Wiring. El nombre de la plataforma proviene de un bar donde se reunían los investigadores guiados por Massimo Banzi (Novillo Vicuña, et al., 2018).

De este modo, las placas de desarrollo Arduino constan de un microcontrolador encargado de todas las operaciones lógico-matemáticas y pines que se pueden configurar como entradas o salidas que se denominan puertos. Una característica

importante es que estas placas cuentan con una conexión USB para poder conectar la placa a una computadora. Por medio de un lenguaje de programación de alto nivel, se pueden configurar y programar las funciones requeridas (Millahual, 2020).

De este modo, según Millahual (2020), para poder programar las placas de Arduino, es necesario contar con el software de uso libre llamado IDE ("*Integrated Development Environment*" o "Entorno de Desarrollo Integrado") de Arduino. Los programas de Arduino, según Boza Díaz (2015), en realidad, son programas C++ que utilizan las librerías propias de la plataforma y entre las placas más conocidas se encuentran el Arduino Uno, el Mega, el Nano y el Arduino mini. Todas estas placas pueden ser programadas aún por personas inexpertas gracias a las facilidades de la plataforma Arduino.

La mayoría de las tarjetas Arduino cuentan con una velocidad de reloj de 8 MHz a máximo 16 MHz, memorias flash de 32 KB, SRAM (*Static Random Access Memory*) entre 1 y 256 KB y EEPROM entre 1 y 4 KB. En los pines GPIO (General Purpose Input Output, entradas y salidas de propósito general) pueden suministrar un máximo de 40 mA y dependiendo del modelo esa corriente puede ser menor. Aparte de la apariencia física, una diferencia entre los diferentes modelos de tarjetas es la cantidad de pines de entrada y salida disponibles, el cual es un factor importante de considerar para el diseño de proyectos (Novillo Vicuña, et al., 2018).

B. Raspberry Pi

Después de 6 años de la aparición de la plataforma Arduino, en el año 2011, surge la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi en Inglaterra. Esta placa se diseñó pensando en atraer estudiantes y, sobre todo, para incrementar las habilidades de personas que tenían afinidad por la carrera de computación en la Universidad de Cambridge. La Fundación Raspberry Pi produce las primeras tarjetas con manufactura China basadas en el microprocesador ARM, demostrando poder procesar video en alta definición. Su venta fue tal que las ventas alcanzaron las 100 000 unidades en unos pocos días (Salcedo Tovar, 2015).

La Raspberry Pi es una tarjeta clasificada como una pequeña microcomputadora con un gran potencial que no puede menospreciarse por su tamaño. Entre sus características que pueden variar dependiendo de la versión, se destaca que dispone de un conector tipo flex para conectar una pantalla LCD (*Liquid Crystal Display*, Pantalla de Cristal Líquido), pantalla de cristal líquido con estándar DSI (*Display Serial Interface*), terminales de entrada y salida que incluye pines de alimentación, dispone de puertos USB y Ethernet, y también es compatible con la tecnología HDMI (*High Definition Multimedia Interface*). Una de las grandes diferencias con respecto a las tarjetas Arduino es la memoria RAM de la que dispone y que se le debe instalar un sistema operativo para poder utilizarla, usualmente una derivación del sistema Linux, Raspbian (Salcedo Tovar, 2015).

De esta manera, se puede deducir que una placa Arduino es una tarjeta que necesita una computadora para programarse, mientras que la Raspberry es en sí, una computadora. Esto refleja la gran diferencia entre ambas tarjetas ya que, además, para acceder a internet con una tarjeta Arduino se debe conectar un módulo independiente, algo que no se requiere con la Raspberry. Otra ventaja es la velocidad de procesamiento que tiene la Raspberry, por ejemplo, en su modelo PI 4 que cuenta con un procesador Broadcom de 4 núcleos a 1.5 GHz, característica que supera en mucho los 16MHz de Arduino (Leon, 2019).

C. Otras tarjetas de desarrollo

En consecuencia y después de estas dos tarjetas de desarrollo, se podría decir que comenzó una revolución, por decirlo de una manera, donde salieron al mercado otras opciones, por ejemplo, la Odroid-U3 otro minicomputador que heredó su nombre del sistema operativo Android, la Beaglebone Black de Texas Instruments, que entró a competir con la Raspberry (Redacción, 2014). Del mismo modo, se destaca la Banana Pi impulsado por la empresa China Guangdong Bipai Technology, y con características similares y de código abierto (Banana Pi Team, n.d.), entre otras.

2.6.2.4 ESP32

En el mismo orden de ideas, surge el microcontrolador ESP32, el cual salió al mercado en el año 2016 por la empresa *Espressif Systems*, y llamó mucho la atención por su bajo costo, capacidad, y que permitía experimentar con proyectos de automatización por su conectividad inalámbrica integrada. Desde entonces, esta empresa ha fabricado varios modelos adaptados a diferentes necesidades de proyectos, por ejemplo, la versión original el ESP32-WROOM-32, la versión que incluye soporte para IA (Inteligencia Artificial) el ESP32-S3 y la versión más moderna a la fecha de esta investigación, el ESP32-C6 con conectividad Wi-fi 6 y Bluetooth 5, entre otras (Ayala, 2024).

A. Características técnicas del ESP32

El ESP32 es un chip diseñado para ofrecer conectividad Bluetooth y Wi-Fi en la banda de 2.4 GHz, además de contar con un módulo de control de medición del sensor de temperatura TMSM (*Temperature Sensor Measurement Control*), el cual ofrece un consumo muy bajo de energía, todo en un circuito integrado con tecnología de 40nm. Si se toma como referencia la información del diagrama en bloques interno del CI (Circuito Integrado), se deduce que es un chip del tipo SoC (*System on a Chip*), en donde se integra todos los componentes de un microcontrolador, más los módulos de conectividad inalámbrica (Espressif Systems, 2023).

Además, el ESP32 cuenta con dos núcleos que pueden procesar datos de 32 bits. Estos núcleos se pueden controlar independientemente y pueden operar a una velocidad de reloj de 80MHz a 240MHz y tiene incorporado un módulo llamado coprocesador, el cual se utiliza cuando las instrucciones que debe realizar el microcontrolador no exigen mucho cálculo, por tanto, favorece el consumo de energía. Una gran ventaja de este CI es tener una corriente en reposo muy baja de aproximadamente 5 μ A, lo cual lo hace conveniente para dispositivos portátiles (Espressif Systems, 2023).

En cuanto a la velocidad de transferencia de datos del ESP32-WROOM-32, es de 150 Mbps y una potencia de salida en la antena de 20 dBm. El chip dispone de 38 pines y el 39 está conectado a tierra y tiene una distribución de memoria para cada

funcionalidad, por ejemplo, para funciones de arranque dispone de 445KB de ROM, para almacenar las variables e instrucciones del programa 520KB SRAM y para almacenar la dirección MAC, configuración e identificación del chip utiliza 1 Kbit (Espressif Systems, 2023).

Por otra parte, según Espressif Systems (2023), este chip se puede alimentar con una tensión máxima de 3.6V, lo cual sugiere la necesidad de implementar un regulador de voltaje dentro de los sistemas embebidos, para respetar este parámetro eléctrico. Además, el CI es capaz de suministrar como máximo una salida en corriente de 1.1 A sumando todas las corrientes de las salidas.

Como se describió anteriormente, este microcontrolador cuenta con un consumo muy bajo de energía gracias al módulo interno llamado PMU (*Power Management Unit*, Unidad de Administración de Energía), el cual se encarga de conmutar los diferentes modos de potencia del chip. En el modo activo, la unidad de RF (radiofrecuencia) está constantemente recibiendo y transmitiendo datos, y los demás módulos están operativos. En el modo *Modem-Sleep*, la sección de RF se desactiva, pero el CPU continúa realizando funciones (Espressif Systems, 2025).

Continuando con los modos de energía, se destaca el modo *Light-sleep*, donde se pausan las funciones del CPU, pero el módulo interno llamado Coprocesador ULP (*Ultra Low-Power*) continúa activo, y, cualquier evento de activación despertará, por decirlo de una manera, el procesador principal. En este modo, la memoria y los periféricos RTC (*Real Time Clock*) continúan trabajando. La memoria RTC es una memoria de bajo consumo que almacena datos necesarios ante un reinicio del ESP32 o cuando pasa de un estado de potencia a otro (Espressif Systems, 2025).

Existe otro estado de consumo de energía en el ESP32, en el cual se puede decir que entra en un “sueño profundo”. Se caracteriza porque el coprocesador sigue funcionando y todos los datos de conectividad se almacenan en la memoria RTC, la cual, junto con los periféricos RTC, son los módulos que permanecen activos. El último estado es el modo donde el microcontrolador entra en hibernación, donde algunos pines GPIO y solo un temporizador RTC en el reloj lento, están activos. En este estado, el

coprocesador y la memoria RTC se encuentran deshabilitados (Espressif Systems, 2025).

En consecuencia, y, a modo de síntesis, en la figura 1, se puede observar un resumen de los diferentes modos de operación en los que puede trabajar un ESP32 y el correspondiente consumo de energía para cada estado en el que se encuentre.

Figura 1

Modos de operación y consumo de energía de un ESP32

Power mode	Description			Power Consumption
Active (RF working)	Wi-Fi Tx packet			Please refer to Table 5-4 for details.
	Wi-Fi/BT Tx packet			
	Wi-Fi/BT Rx and listening			
Modem-sleep	The CPU is powered up.	240 MHz [*]	Dual-core chip(s)	30 mA ~ 68 mA
			Single-core chip(s)	N/A
		160 MHz [*]	Dual-core chip(s)	27 mA ~ 44 mA
			Single-core chip(s)	27 mA ~ 34 mA
		Normal speed: 80 MHz	Dual-core chip(s)	20 mA ~ 31 mA
			Single-core chip(s)	20 mA ~ 25 mA
Light-sleep	-			0.8 mA
Deep-sleep	The ULP coprocessor is powered up.			150 μA
	ULP sensor-monitored pattern			100 μA @1% duty
	RTC timer + RTC memory			10 μA
Hibernation	RTC timer only			5 μA
Power off	CHIP_PU is set to low level, the chip is powered down.			1 μA

Nota: Tomado de ESP32 Series Datasheet (p. 30), por Espressif Systems, 2025, <https://n9.cl/wjkio>. Copyright 2025 por Espressif Systems.

Otra característica técnica de suma importancia es la referente al convertidor ADC (*Analogic Digital Converter*) del ESP32, ya que cuenta con dos bloques de 12 bits para digitalizar señales analógicas conectadas en los pines designados para ese propósito (Espressif Systems, 2025). Estos convertidores son del tipo SAR (*Successive Approximation Register*, Registro de Aproximación Sucesiva) que tiene como principales

características el bajo consumo y la precisión, sin embargo, no es necesariamente el más rápido en cuanto al procesamiento de señales (Isaac, 2024).

Una característica que hace del ESP32 una mejor opción para los desarrolladores es la de poder asignar los pines dependiendo de las funciones requeridas, pues cuenta con pines que tienen múltiple propósito. Por ejemplo, existen pines llamados *Touch* (tacto), los cuales se pueden utilizar tanto para conectar dispositivos sensores capacitivos como para uso del ADC. Otros pines dedicados para la conversión de señales analógicas a digitales y viceversa, pero también se puede utilizar para otros fines. Todas estas funciones se pueden configurar por medio de *software* (Espressif Systems, 2025).

Ahora bien, existen varias versiones de la serie del microcontrolador ESP32. La versión 1, como se puede suponer, fue la primera, ya no es recomendable para diseños de proyectos actuales, y fue sustituida por la versión 3 del chip con actualizaciones y mejoras. Estos nuevos modelos de CI son los identificados con las numeraciones ESP32-D0WD-V3, ESP32-D0WDR2-V3 y ESP32-U4WDH, y son los recomendados por el fabricante para su uso en la actualidad (Espressif Systems, 2025).

Asimismo, todos estos chips de la versión 3 vienen con doble núcleo (*Dual Core*) en un encapsulado del tipo QFN 5*5, y se puede identificar visiblemente, porque en dos de sus lados cuenta con 14 pines y en otro tiene 10, para un total de 38 pines más un pin 39 ubicado en el centro del integrado que está conectado a tierra, y en uno de sus cuatro lados está colocada la antena (Espressif Systems, 2025). El acrónimo QFN 5*5 significa *Quad Flat No-lead* y es un tipo de encapsulado con forma cuadrada con dimensiones de 5 mm por 5 mm, en donde los pines tienen tecnología de soldadura para montaje superficial (Wang, 2024).

De esta manera y tomando como referencia toda la información anterior y las especificaciones técnicas de este circuito integrado ESP32, una de las tarjetas de desarrollo más conocidas es la ESP32-WROOM-32E y ESP32-WROOM-32UE, cuya principal diferencia está en la sección de la antena de radiofrecuencia. En la primera tarjeta, la antena se encuentra incorporada a ella, mientras que, en el segundo modelo,

la tarjeta dispone de un conector de RF al que se conecta la antena (Espressif Systems, 2024).

Las placas ESP32 requieren de un sistema UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*, Transmisor Receptor Asíncrono Universal), el cual se encarga de la comunicación de datos entre el microcontrolador ESP32 y otros dispositivos, por ejemplo, una computadora. El CI ESP32 cuenta con controladores compatibles con múltiples fabricantes de circuitos integrados que cumplen esta función. Esta manera de enviar y recibir información entre dispositivos no requiere de una señal de clock, es decir que los datos se envían bit a bit por un solo canal y debe haber una conexión perfecta entre emisor y receptor (Espressif Systems, 2024).

En consecuencia, las placas de desarrollo ESP32 aparte de su microcontrolador, cuentan con un circuito integrado que realiza las funciones de enlace entre dispositivos. Un ejemplo de este chip es el que tiene el número de parte CP2102 y puede venir en varios modelos de placas, como la versión WROOM32 de 38 pines y la versión WROOM32 de 30 terminales de conexión. Este circuito integrado UART CP2102, cuando envía o recibe información, lo hace enviando 1 byte (8 bits) más dos o tres bits correspondientes a inicio, parada y bit de paridad para la detección de errores durante la comunicación en serie (Esperidião, s.f.)

La tasa de transmisión de datos en las comunicaciones UART se mide en bits por segundo, y se utiliza como unidad de medida, el baudio. Esta configuración debe ser la misma tanto en el receptor como en el transmisor para que la comunicación sea exitosa y se utiliza diferentes valores, por ejemplo, 19 200 baudios, 57 600 baudios y 115 200 baudios. De esta manera, los datos transmitidos en serie se envían por un cable para transmisión y por otro para recepción. Además, se emplea un tercer cable que es la puesta a tierra, para un total de 3 hilos conductores para la comunicación UART (Esperidião, s.f.)

Por otra parte, se pueden encontrar tarjetas ESP32 con otros chips encargados de la comunicación en serie entre dispositivos y que realizan la misma función del CP2102. Un ejemplo es el circuito integrado CH9102, el cual se puede encontrar en la versión de

la placa ESP32 WROOM-32. En ocasiones se le llama ESP32 y se hace referencia al integrado UART para identificar la placa y los controladores que se requieren para programarla, de esta manera y según Ramos Galindo (2023) se le puede llamar ESP32 CH9102X.

Este chip tiene la característica de que es de alta velocidad y convierte la comunicación USB (*Universal Serial Bus*) a puerto serie, es compatible con USB 2.0, permite una transferencia de datos de hasta 4Mbps y un voltaje de alimentación de 3.3V, y la variante el CH9102F soporta voltajes de 1.8V hasta 5V (Nanjing Qinheng Microelectronics, n.d.a). Otro ejemplo de un circuito integrado UART empleado en las tarjetas ESP32 es el CH340, que utiliza la placa ESP32 Dev Board (Bistu, et al., 2023). Según Nanjing Qinheng Microelectronics (s.f.), de igual manera, es un CI que convierte USB a puerto serial con una velocidad de transferencia de datos de 2.4 Kbps hasta 115200bp, entre otras características.

2.6.2.5 Sensores de humedad

La disponibilidad de agua en los suelos es muy importante para el crecimiento óptimo de las plantas. En consecuencia, poder determinar, de una manera exacta, los niveles máximos y mínimos de humedad puede repercutir para bien o para mal en los cultivos. Esto justifica la relevancia de un constante monitoreo del porcentaje de humedad de los suelos, además de la utilización de dispositivos para este fin con su respectiva calibración (Abdelmoneim, et al., 2025).

En la ingeniería moderna, todo sistema cuenta con tres elementos principales: sensor, unidad de procesamiento y dispositivo actuador. El sensor es el elemento que está en contacto directo con la variable y magnitud física; esta señal se va a cuantificar en la unidad de procesamiento y luego va a gobernar al actuador para ajustar la variable física a los valores deseados. La importancia de los sensores es que convierten la señal física en información o datos útiles para un sistema de medición (Ramírez, et al., 2014).

Se define como sensor a cualquier dispositivo u objeto que tiene la capacidad de responder ante la influencia de alguna magnitud química o física para convertirla en una

señal eléctrica (Angeles-Angeles, 2019). Los tipos de sensores que se utilizan para medir la humedad del suelo son los tensiómetros, sondas de neutrones, los resistivos y los capacitivos. Estos últimos son los que más se emplean en la actualidad y son ampliamente utilizados para sistemas de riego ya que no requieren un mantenimiento frecuente (Schugurensky y Capraro, 2008).

Los sensores de humedad del suelo capacitivos son dispositivos electrónicos que se insertan directamente en el suelo y constan de una sección de circuitería electrónica. La parte que está en contacto con el suelo tiene dos electrodos paralelos y el suelo funciona como un medio dieléctrico en donde la humedad varía el tiempo de carga del condensador. De esta manera, se logra medir el porcentaje de humedad presente en el terreno. Con este tipo de sensores, se debe tener presente que la inserción debe realizarse de manera completa en el suelo, pues los espacios de aire pueden generar lecturas erróneas (Gonzalez Ortiz, 2020).

A. Sensor Capacitivo de Humedad del Suelo SEN0193 de DF robot

Este sensor es de bajo costo de líneas paralelas cerradas y tiene la ventaja de que es resistente a la corrosión lo cual garantiza una vida útil prolongada. Es compatible con tensiones de 3.3 a 5.5V con un consumo de corriente bastante bajo (Gonzalez Ortiz, 2020). Este sensor capacitivo requiere de una calibración debido a las características químicas y físicas de los suelos, sin embargo, continúa siendo una opción muy atractiva por su precio tan bajo (Abdelmoneim, et al., 2025).

De esta manera, este sensor dispone de tres pines: dos para la alimentación (5V, tierra) y otro es la salida de señal analógica que se debe conectar a un GPIO de un microcontrolador. Según Abdelmoneim, et al., (2025), este sensor se ha utilizado en muchas otras investigaciones y los datos arrojados en cada una de ellas demuestra que, a pesar de algunas limitaciones con respecto a otro tipo de sensores, resulta ser una opción con una precisión aceptable y que se puede integrar en soluciones de riego inteligente, siempre y cuando se consideren aspectos como compactación, temperatura y salinidad del suelo.

El sensor SEN0193 tiene una corriente de trabajo de 5 mA (miliamperios) y, aunque se puede alimentar con 5V, la salida analógica máxima del sensor es de 3V. Esto es importante tomarlo en cuenta cuando se proceda a calibrar el sensor, además se debe comprender que la señal analógica de salida del sensor es inversamente proporcional a la humedad del suelo, es decir, conforme aumenta la humedad del suelo, el valor medido por el sensor disminuye. Durante el proceso de calibración, se debe considerar el valor cuando el sensor está seco y expuesto al aire, y el valor cuando el sensor está sumergido en agua sin pasar la marca de precaución para no dañar la parte electrónica (DFRobot, 2017).

B. Sensor de temperatura y humedad DHT11

Este dispositivo tiene la capacidad de detectar, tanto temperatura, como humedad. Es un sensor muy accesible por su bajo precio y puede monitorear temperaturas de 0° a 50° Celsius y entre 20% y 90% de humedad relativa con una precisión de ± 2 °C en temperatura y $\pm 5\%$ para la humedad relativa (Gay & Gay, 2018). Esta característica supone una limitante para ciertas aplicaciones que requieren diferentes rangos de medición y se debe analizar muy bien el entorno donde se realizará la instalación del sensor para determinar si es atinente su uso.

De acuerdo con Del Valle Hernández (2019), existen dos versiones del sensor DHT11: el que consta de 4 pines que no cuenta con la resistencia de 5K Ω que evita inestabilidades en las mediciones, y el que ya viene incorporado en una pequeña tarjeta con los componentes necesarios y, en la salida, entrega una señal digital. Sin embargo, un posible inconveniente es que puede monitorear y enviar los datos cada 2 segundos debido a su tiempo de respuesta. Se puede alimentar con 3.3V o 5V y su máxima resolución es de 8 bits.

En su interior, el DHT11 tiene un sensor de temperatura del tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*, Coeficiente de Temperatura Negativo), es decir, que disminuye la resistencia del sensor cuando la temperatura aumenta y viceversa. Para medir la humedad, dispone de un sensor del tipo resistivo, y estas señales ya están calibradas en la salida digital. El consumo de energía es muy bajo; cuando se alimenta con 3V, es

apenas de 0.5 mA, mientras, cuando se alimenta con 5V, la corriente es de aproximadamente 2.5 mA (Mouser Electronics, s.f.)

Por otra parte, se puede destacar que existe otro sensor de temperatura y humedad con características similares pero que ofrece algunas ventajas sobre el DHT11, es el sensor DHT22. Este sensor ofrece una mejor resolución en cuanto a los datos de salida, ya que, en comparación con el DHT11, el DHT22 tiene mayor precisión en las lecturas realizadas; en temperatura es de 0,5% y es capaz de medir humedad relativa de -40 °C a 80 °C con una precisión del 2% (Marinelli y Urquijo, 2017).

Adicional a lo anterior, el DHT22 se sigue considerando de bajo costo solo que, por su resolución de 16 bits en la salida, es mucho más preciso. Como otra ventaja, se tiene que la capacidad de medir temperaturas bajo cero grados, lo cual hace que sea una mejor opción para algunas aplicaciones (Del Valle Hernández, 2019). De igual manera que el DHT11, este sensor cuenta con una calibración de fábrica (García Domínguez, et al., 2021).

En cuanto a las librerías necesarias para utilizar estos sensores, básicamente, comparten la misma librería por ser sensores de la misma familia DHT. De este modo, no se deben realizar mayores modificaciones en la programación y se debe tener en cuenta la utilización de uno de los pines GPIO del microcontrolador que se vaya a utilizar por motivo de que la salida del sensor es totalmente digital (Ramos Yáñez, 2023).

2.6.2.6 Medición de lúmenes con aplicación Android

Se define como luz a la irradiación visible emitida por una fuente y que es percibida por el ojo humano con cierta sensibilidad, y, a la cantidad de energía que esa fuente emite en un tiempo determinado se le conoce como flujo luminoso y la unidad de medida es el lumen. Por otra parte, al flujo luminoso que incide en una superficie determinada, se le llama iluminancia y la unidad de medida es el Lux (Peñahora, 2011). De lo anterior, se deduce por qué, en la actualidad, muchos fabricantes de lámparas añaden la información de los lúmenes en sus productos.

Ahora bien, si se toma en cuenta la información anterior y aplicándola a esta investigación, se puede afirmar que es necesario tomar en cuenta la cantidad de luminancia que las lechugas van a recibir para asegurar un correcto proceso de fotosíntesis. De esta manera, según Phillips (2023), las lechugas deben estar expuestas a cierta cantidad de luz en cada etapa de su desarrollo y el rango de lux va, desde los 1 000, hasta los 8 000 lux aproximadamente. Cuando se presenta un déficit en el suministro de luz en las lechugas, las hojas se tornan de un color amarillo.

Si bien es cierto existen luxómetros y equipo especializado para medir la cantidad de lux, también se puede utilizar una aplicación para dispositivos móviles, como es el caso de la aplicación Lux Light Meter (Fabian, et al., 2023). Estas aplicaciones pueden hacer uso de las cámaras instaladas y de los sensores que controlan el nivel de brillo de las pantallas, cuyo propósito es ahorrar batería.

Una investigación realizada por Rodríguez, et al. (2019) logró demostrar que una de las aplicaciones mejor valoradas por los usuarios fue la aplicación para el sistema operativo Android llamada Lux Light Meter Free, creada por el desarrollador Doggo Apps, y que, a pesar del error promedio de las aplicaciones si se realiza una selección de las condiciones de calibración, puede ser factible el uso de aplicaciones para medir la cantidad de lux.

2.6.2.7 Servomotores de rotación continua

Existen motores de CD (corriente directa) que tienen la característica de poderse controlar y ubicar en una posición específica por medio de una señal que envía un microcontrolador. Es decir, su movimiento se basa en desplazamientos por ángulos y se pueden quedar en una posición fija. Se trata del motor servo que tiene un movimiento máximo de aproximadamente de 180 °. Estos motores servo se controlan por medio de una señal cuadrada que puede variar su ancho de pulso, es decir, una señal PWM (*Pulse Width Modulation*, Modulación por Ancho de Pulso) (Thompson & Aguayo, 2009).

La tecnología PWM es ampliamente utilizada en la industria, por ejemplo, en el control de motores y en las fuentes conmutadas de algunos dispositivos electrónicos. El principio del PWM es modificar el ciclo de trabajo de una señal cuadrada, en donde lo

que varía es el tiempo en que la señal permanece en alto y en bajo, lo cual permite suministrar mucha o poca energía a la carga según se requiera. Esto repercute en un mejor aprovechamiento de potencia, tal es el caso de los circuitos inversores que pueden proporcionar diferentes niveles de voltajes de salida (Morales & Redondo, 2016).

Retomando el tema de los motores servo, tienen la característica de que disponen de engranajes, por lo tanto, suelen verse como un empaquetado rectangular donde se aloja una caja reductora que contiene estos engranajes (Thompson y Aguayo, 2009). Estos engranajes pueden ser del tipo metálicos que proporcionan un torque mayor que los que tienen engranajes de plástico. Un ejemplo de un motor servo con engranajes metálicos es el modelo MG996R que tiene una capacidad máxima de carga de 11 kg/cm con un voltaje de 7.2V y con un peso de aproximadamente 55 gramos (Panchi Molina, 2018).

Ahora bien, según Thompson y Aguayo (2009), existe otro motor CD que se le conoce como motor servo de rotación continua, y, como su nombre lo indica, cuando se le aplica la señal de control, gira continuamente en una u otra dirección, y, por medio de esa señal se le puede variar también la velocidad de giro. Este tipo de servomotor incorpora un puente en H encargado de suministrar la corriente necesaria para realizar el giro, cambiando el flujo de corriente por medio de cuatro transistores de potencia (Earl, 2024).

En realidad, los servos de rotación continua han sido modificados eliminándoles los límites físicos y modificando la realimentación hacia el microcontrolador interno. Estas modificaciones dieron paso al motor reversible con engranajes con control de velocidad que es utilizado en muchas aplicaciones actualmente, como el tren motriz de robots. En cuanto a las ventajas, se puede mencionar que tienen un precio accesible, son fáciles de controlar y son bastante compactos. Como desventaja, se puede citar que existen motores servos que, por sus engranajes o rodamientos, no soportan mucho peso (Earl, 2024).

2.6.3 Software

2.6.3.1 Definición de software

Se define como software al conjunto de componentes lógicos y programas que contienen una serie de instrucciones o rutinas necesarias para realizar funciones o tareas específicas. El *software* incluye el programa o software de sistema y una aplicación para digitar texto por medio del cual se puede editar el programa que se va a ejecutar. De esta manera, se pueden definir varios tipos de *software*, por ejemplo, software de sistema, software de aplicación, *software* de programación y *software* malicioso (Mejía Cabrera, 2019).

De este modo, el *software* de sistema es el encargado del correcto funcionamiento de los componentes físicos de *hardware* e incluye los controladores o *drivers* para lograr que tanto el software como el *hardware* se logren comunicar. El *software* de aplicación son los programas dedicados para ciertas funciones y que se diseñan para fines didácticos, empresariales, programas con fines ingenieriles y científicos, entre otros. Luego, está el *software* de programación, el cual puede hacer uso de bases de datos, como librerías. Además, este tipo de *software* se puede editar por medio de diferentes lenguajes de programación (Mejía Cabrera, 2019).

2.6.3.2 Software libre

Stallam (2020) aduce que *software* libre es cualquier programa en el que los usuarios tienen la libertad de: mejorar un programa para poder ayudar a otros usuarios, poder redistribuir copias, poder adaptar el programa original a las necesidades específicas de un proyecto, y, por último, poder ejecutar el programa sin importar el fin para el cual fue creado. Es decir, no importa si es para fines comerciales, uso didáctico o simplemente para uso personal. En consecuencia, no media ninguna licencia y mucho menos un precio por la obtención del *software* o programas.

De esta manera, el *software* libre tiene numerosas ventajas entre las cuales se pueden citar las siguientes: estimula el emprendedurismo, facilita el aprendizaje en los procesos de enseñanza, se mejora la calidad del producto gracias al constante aporte de

la comunidad de desarrolladores y que es un *software* muy seguro en comparación a los frecuentes ataques de los *softwares* de paga o licenciados (Mejía Cabrera, 2019).

2.6.4 Entorno de desarrollo integrado (IDE)

Duarte, et al. (2015) afirman que el IDE es un entorno o marco de trabajo para muchos de los lenguajes de programación, contiene un editor de código donde se coloca el texto con las funciones o instrucciones, un compilador y un depurador. En ocasiones, los investigadores ponen a disposición de los desarrolladores entornos de desarrollo integrados, con el propósito de analizar el comportamiento y el uso que estos les dan en diferentes aplicaciones. Esto contribuye a mejorar la eficiencia y efectividad de algunas herramientas (Chandi y Orellana, 2018).

Uno de los IDE que ha impactado más en las últimas décadas es, sin lugar a duda, el de la plataforma Arduino, gracias a la simplicidad de uso, su bajo precio y, sobre todo, su extensa comunidad, lo cual ha hecho que se utilice en múltiples áreas como escuelas, universidades y centros de investigación (Chandi y Orellana, 2018).

2.6.4.1 IDE de Arduino

Las placas de desarrollo como Arduino y ESP32 se pueden programar con el entorno de desarrollo IDE de Arduino. Es una aplicación que soporta múltiples plataformas y se utiliza para escribir y cargar programas en estas tarjetas. A estos programas, se les llama *sketches* y, por medio del IDE de Arduino, se pueden depurar, grabar y editar de una manera sencilla y rápida. Como se trata de una plataforma gratuita, el IDE se puede descargar directamente desde la página web oficial de Arduino y para el sistema operativo que se necesite (Peña, 2020).

2.6.4.2 Instalación del IDE de Arduino

Para poder programar el microcontrolador ESP32, es necesario instalar el entorno de desarrollo de Arduino, para lo cual se debe realizar una serie de pasos que permitirán

el correcto funcionamiento de todo el entorno y el posterior uso de las herramientas disponibles. Con esto se podrá programar, editar, agregar librerías y utilizar características fundamentales como el monitor serie. Además, es muy importante realizar la instalación de los drivers que permitirán la comunicación entre el microcontrolador y el IDE de Arduino (Reyes y Cid, 2015).

A. Paso #1: Descargar el software de Arduino

Se debe acceder a la página oficial de Arduino y elegir el sistema operativo correspondiente al de la computadora utilizada para la programación. Si se desea contribuir con la plataforma, se hace y, si no, se elige la opción “*JUST DOWNLOAD*”. Se descargará un archivo .exe en la computadora, el cual simplemente se ejecuta y se avanza con la instalación haciendo clic en siguiente hasta completar la instalación.

B. Paso #2: Instalación de *drivers* USB

En este paso, es necesario conocer el número de parte del chip UART del microcontrolador ESP32. Tal y como se mencionó en la sección “Especificaciones Técnicas del ESP32”, existe un chip con la numeración CH340 que tiene la función de convertir el puerto USB a serial y que permite la comunicación entre el chip ESP32 y la computadora. Esto es importante porque, si la computadora no tiene estos *drivers*, no se podrá cargar el programa final al ESP32 por medio del IDE de Arduino. Estos controladores se pueden descargar directamente desde la página oficial y, luego, el archivo descargado se ejecuta y se instala.

C. Paso #3: Instalación de URL para soporte de tarjetas ESP32

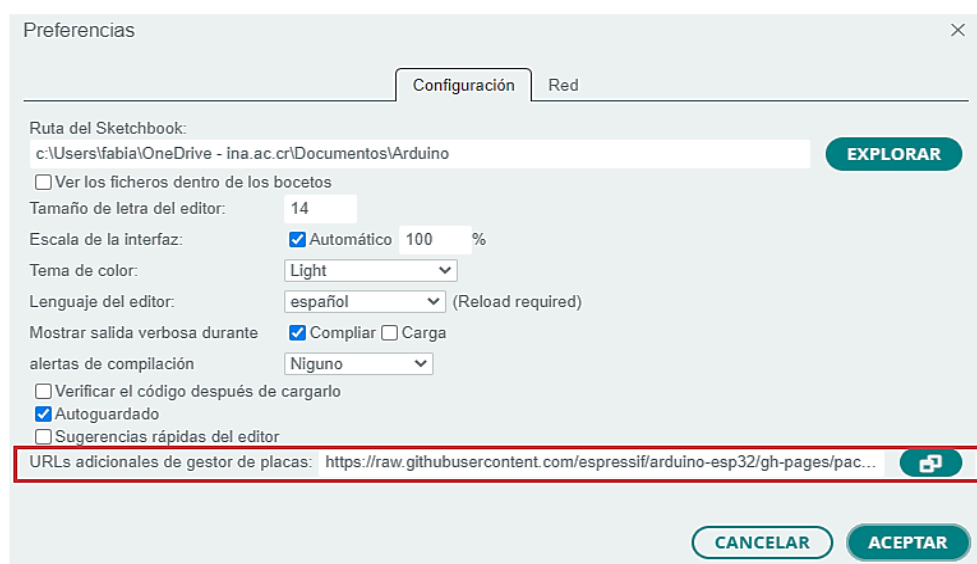
El IDE de Arduino tiene un apartado llamado gestor de tarjetas, sin embargo, en este gestor, no se dispone, de manera predeterminada, el soporte para programar un ESP32. Por lo tanto, luego de instalar el software de Arduino, hay que instalar un paquete con los módulos compatibles con ESP32 (Ikiss, 2020). De tal manera que, en la sección de Archivo, Preferencias, Gestor de URL Adicionales de tarjetas, se debe instalar la dirección oficial que proporciona la compañía *Espressif Systems*, la cual contiene las

actualizaciones y las tarjetas compatibles con el microcontrolador ESP32 (Álvarez Carulla, 2021).

En la figura 2, se presenta una captura de pantalla que muestra la sección en el IDE de Arduino según versión 2.3.4, en donde se debe ingresar la URL oficial de *Espressif Systems* que contiene los paquetes para las tarjetas ESP32.

Figura 2

Menú de preferencias en el IDE de Arduino



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

D. Paso #4: Instalación del paquete de tarjetas ESP32

En este paso, se realiza la instalación del paquete de tarjetas directamente desde el "Gestor de Placas" situado en el menú al lado izquierdo, en donde se debe digitar ESP32 e instalar el paquete correspondiente a Espressif Systems. Por último, se debe seleccionar la tarjeta ESP32 que se va a utilizar. Para esto, se debe ir al menú "Herramientas", luego "Placa", "esp32" y seleccionar el modelo del microcontrolador y el puerto USB de la computadora al que está conectado (Álvarez Carulla, 2021).

2.6.4.3 Inclusión de librerías

En esencia, las librerías son un software que tiene información sobre el *hardware* específico de ciertos componentes o funciones que facilitan la programación de proyectos complejos (Moran, et al., 2019). Para poder desarrollar esta propuesta de diseño, es necesario primero instalar las diferentes librerías que permitirán el correcto funcionamiento de sensores y actuadores, así como la comunicación serie, transmisión, almacenamiento de datos y tiempos del sistema, entre otros.

En la figura 3, se muestran todas las librerías utilizadas en este proyecto, las cuales se pueden agregar directamente desde el gestor de bibliotecas del IDE de Arduino. Sin embargo, en lo referente a la librería ThingSpeak, se debe descargar un archivo .zip desde la página oficial de la lista de librerías de Arduino para ThingSpeak. Para agregar esta biblioteca, es necesario ir al menú "Sketch", "Incluir biblioteca", "Añadir biblioteca .ZIP" y, de manera posterior, buscar la dirección donde se descargó el archivo .ZIP en la computadora y agregar la biblioteca.

Figura 3

Librerías utilizadas en el proyecto

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <DHT.h>
#include <ESP32Servo.h>
#include <Ticker.h>
#include <EEPROM.h>
#include <TaskScheduler.h>
#include <ThingSpeak.h> //https://www.arduino-libraries.info/libraries/thing-speak. archivo.zip
```

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

La librería "DHT.h" permite trabajar con sensores de temperatura y humedad como el DHT11 y DHT22. Por otra parte, la librería "ESP32Servo.h" controla los servomotores encargados de abrir o cerrar el techo de sarán. La librería "Ticker.h" se utiliza para realizar algunas funciones de tiempo sin tener que recurrir a los retardos como la instrucción "delay()".

La librería “EEPROM.h” se instala para guardar en el ESP32, el estado del techo en caso de ocurra un corte de fluido eléctrico. De esta manera, cuando el microcontrolador reinicia, primero, identifica la posición del final de carrera y, luego, lee el sensor de temperatura para decidir si mantiene cerrado el techo o lo abre. Además, se hace uso de la librería “TaskScheduler.h” para facilitar la ejecución de tareas simultáneas que requieren de un intervalo de tiempo específico y, a la vez, no interfieran entre ellas por medio del uso de la instrucción millis. Las demás librerías se incluirán en los apartados siguientes.

2.6.4.4 ThingSpeak IoT Analytics

Cuando se habla de plataformas IoT, se debe comprender que existen las que realizan trabajos simples como almacenar datos y otras que permiten realizar procesos de análisis o crear interfaces complejas para interactuar con dispositivos. Algunas de ellas son: Azure IoT Hub, Oracle Internet of Things Cloud Service, Amazon Web Services IoT, Samsung Artik, Adafruit.IO y ThingSpeak, entre otras (Martínez Jacobso, 2017).

Esta última, ThingSpeak, es una plataforma creada por MathWorks compatible con diferentes dispositivos, entre ellos Arduino que es el entorno con el que se puede programar el ESP32. Esta plataforma IoT ofrece el servicio de almacenamiento de datos y visualización en tiempo real, y permite crear aplicaciones para recibir y procesar datos, así como interactuar con dispositivos. Además, es una plataforma gratuita y de código abierto basada en Matlab, sin embargo, cuenta con una versión de paga dependiendo del plan requerido (Martínez Jacobson, 2017).

Esta plataforma IoT funciona por medio de canales, dentro de los cuales se puede visualizar los datos que recibe desde otros dispositivos, como, por ejemplo, un ESP32. Cada canal tiene un total de ocho campos en la versión gratuita, los cuales representan, dentro de un cuadro, la información de un sensor de temperatura, de presión o de humedad. Además, se puede visualizar la activación de un actuador como una bomba de agua, entre otros. Estos datos son almacenados en la aplicación y se crea un histórico con la información (Rendón & Villa, 2017). Una opción ofrecida por ThingSpeak es la de

poder configurar alertas por medio de un código en MATLAB, las cuales se envían a un correo electrónico con la información o aviso requerido.

Los campos se pueden personalizar para que se muestren los datos de la manera que mejor convenga y cuenta con una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*). Los campos corresponden a datos que se pueden graficar según la necesidad de cada proyecto. En la versión gratuita, a la plataforma, se pueden enviar tres millones de mensajes con una tasa de actualización de 15 segundos (Bermúdez Padilla, et al., 2022). Esto supone que, si se envía un paquete de datos con la información de 5 sensores, por ejemplo, con una frecuencia de 15 segundos, en un minuto, se estarían enviando 4 mensajes que corresponde a 5 760 mensajes por día, lo cual equivale a 2 102 400 mensajes por año.

2.6.4.5 Configuración para la conexión del ESP32 al Servicio ThingSpeak y a la red

Para que el microcontrolador pueda enviar datos a una plataforma en la nube como ThingSpeak, es necesario configurar algunos elementos importantes para la conexión, como, por ejemplo, declarar en el código una clave API con la que se autentica solicitudes a servicios web. Para Ruiz Barea (2023), una API es un protocolo que incluye reglas que permiten la comunicación entre dos aplicaciones sin la necesidad de que cada una de ellas conozca el código fuente de la otra. Una vez que se logra la comunicación, se pueden enviar y recibir solicitudes o respuestas, incrementando la seguridad por medio de la encriptación de contraseñas.

De esta manera, para realizar esta configuración, se necesita tener una cuenta en la plataforma IoT de ThingSpeak, la cual puede ser de paga o gratuita, y permite crear uno o varios canales, lo cual habilitará una clave API y una identificación única por canal. Este procedimiento se explicará detalladamente más adelante. Una vez creado el canal, se procede a incorporar en el código las siguientes instrucciones:

```
const char* apiKey = "CLAVE API DEL CANAL";
```

```
unsigned long channelId = ID DEL CANAL;
```

WiFiClient client;

Básicamente, se declara la clave para autenticar las solicitudes al servicio web y otorga permisos para enviar datos al canal. Luego se define el ID del canal al cual se van a enviar los datos y, posteriormente, se crea un objeto *WiFiClient* que le permite al ESP32 establecer conexiones TCP/IP para comunicación con el servidor ThingSpeak y enviar la información de los sensores. Luego, se debe inicializar el cliente en el *void setup*, que en este caso es la aplicación ThingSpeak, con la instrucción *ThingSpeak.begin(client)*. Ahora bien, el microcontrolador se debe conectar a una red Wi-Fi por lo cual se debe configurar las credenciales, esto se hace por medio de las siguientes declaraciones:

```
const char* ssid = "Nombre de Red";
```

```
const char* password = "Clave de Red";
```

Sin embargo, en el código, se debe iniciar la conexión a la red. Para esto, se utiliza la librería *WiFi.h* y se creó una función llamada “*void connectToWiFi()*” que contiene la instrucción “*WiFi.begin(ssid, password);*”. La función para iniciar la conexión a la red se completa imprimiendo en el monitor serie el estado de la conexión para verificar que fue exitosa, lo cual facilita la detección de errores en caso de fallo.

2.6.4.6 Servidor web local con ESP32

Los servidores son máquinas informáticas conectadas a la red y brindan un servicio a los usuarios o a otros servidores. Tienen memorias RAM, una capacidad de almacenamiento y procesamiento mayor que muchas computadoras. En general, son equipos mucho más robustos y pueden ser del tipo virtuales o físicos. Los servidores web son un tipo de servidores que almacenan sitios o contenidos en la red y que se accesan por medio de una dirección IP (Marchionni, 2011).

Sin embargo, cuando se habla de un servidor, también se puede referir a un software que permite compartir información. Además, no necesariamente hace referencia a un dispositivo con grandes características técnicas, ya que el concepto se refiere a una máquina u otro dispositivo que suministra información y está al servicio de otras

computadoras o personas conocidas como clientes. De este modo, una de las funciones de un servidor es permitir el acceso a datos, tanto desde dispositivos fijos, como móviles (Medellín Solís, 2016).

Considerando la información anterior, se puede utilizar el ESP32 como un servidor web local para que envíe datos, en este caso, a una dirección IP. Por medio de esta dirección, es posible visualizar los datos de sensores conectados al microcontrolador desde cualquier dispositivo. Para esto, se debe crear una instancia o inicializar el servidor, configurar las rutas que atenderá el servidor, gestionar solicitudes continuas para mantenerlo activo, y conectar el microcontrolador a una red Wi-Fi. En este caso, el cliente sería la persona conectada por medio de un explorador de internet para visualizar los datos desde un dispositivo móvil o desde una computadora.

Para este proyecto, se dispone de una interfaz web con la cual el cliente puede activar o desactivar la bomba de agua para el sistema de riego si así se requiere y una parada de emergencia para la bomba. Además, se pueden visualizar los datos en tiempo real de los sensores de humedad instalados en el sustrato, la temperatura y la humedad relativa del invernadero. Esto se logra gracias a que, cuando se configura el ESP32 como servidor web local, el *router* genera y le asigna una IP dinámica con la cual se puede acceder a los datos que recibe el ESP32. Para poder visualizar la información, el cliente debe conectarse a la misma red del *router*. Para este proyecto, se utiliza un teléfono con conexión a internet por medio de datos móviles que está configurado como *hotspot*.

2.6.4.7 Seguridad del servidor web local ESP32

En la actualidad, la seguridad de las redes informáticas y de los servidores web de muchas empresas y aún personas sufren constantes amenazas que pretenden aprovecharse de las falencias de estos sistemas. Por eso, el tema de la seguridad informática es de suma importancia independiente del tipo de información que se esté manipulando. Los servidores web se han convertido en uno de los elementos más afectados por los ataques informáticos (Rodríguez Chang, et al., 2021).

De esta manera, en el desarrollo de esta investigación, se ha considerado el tema de la seguridad, incorporando, en el código principal del ESP32, unas líneas dedicadas que proporcionan una capa de seguridad que garantiza el acceso exclusivo a los datos por parte del cliente. Para esto, se utiliza la librería “WebServer.h” y se recurre a las funciones “server.authenticate(authUser, authPassword)” y “server.requestAuthentication()” cada vez que se envían o reciben los datos, utilizando credenciales configuradas en el código. Ello asegura que solo los usuarios debidamente autenticados pueden acceder a los datos o encender y apagar la bomba desde la web, protegiendo así el control del sistema y de la información.

Capítulo III. Marco metodológico

En este apartado, se procede a describir el enfoque metodológico para desarrollar la propuesta de diseño electrónico de un invernadero con tecnología de bajo costo para la siembra de lechuga en el Centro Nacional Especializado en Electrónica del INA Heredia. En ese sentido, se pretenden detallar las técnicas y los procedimientos utilizados para recopilar y hacer un análisis de los datos suministrados por sensores electrónicos, así como información relacionada con la siembra de lechuga mediante el método tradicional y en invernaderos.

3.1 Enfoque de la investigación

El tipo de investigación se define como experimental, tal y como lo define Murillo (2011), ya que se manipularon variables independientes para controlar una variable dependiente, lo cual se llevó a cabo en un ambiente con condiciones controladas. Como la investigación propone explorar un diseño ajustado a condiciones experimentales, esta metodología tiene una tendencia cuasiexperimental. En ese sentido, se pretendió controlar la cantidad de agua necesaria para el cultivo de las lechugas, dependiendo de las variables de humedad de suelo y temperatura.

Por lo tanto, en esta investigación, se realizó una observación y análisis del cultivo de lechuga por medio de la experimentación basada en los datos recopilados por un sistema electrónico, que, según Murillo (2011), corresponde al concepto del enfoque

experimental. Además, es común que las investigaciones con este enfoque presenten limitaciones del tipo ambiental, tal y como se presenta en este caso, al realizarse parte de la investigación en un lugar ubicado en un área expuesta a la intemperie.

Aunado a lo anterior, existen estudios o investigaciones que se pueden clasificar de acuerdo con la intervención hecha por el investigador sobre un fenómeno estudiado. Dentro de estos estudios, se encuentra el de tipo observacional, donde el investigador no realiza ninguna intervención en el objeto de estudio, y el experimental caracterizado porque el investigador sí interviene de manera activa manipulando variables con el único propósito de comprender las consecuencias de esta manipulación, es decir, se trata de investigaciones basadas en el principio de causa y efecto (Rodríguez y Cabrera, 2007).

3.2 Método de la investigación

En este mismo orden de ideas, aunque existen decenas de métodos de investigación, se puede realizar una clasificación basándose en el nivel de evidencia que aportan. De esta manera, existen las metodologías primarias, en donde se realizan estudios con el fin de recopilar datos empíricos sobre un tema específico. Por otra parte, las metodologías secundarias se caracterizan por recopilar, en una forma rigurosa y sistemática, los datos obtenidos con el propósito de responder a una pregunta de investigación (Velthuis, 2014).

De igual manera Velthuis (2014) describe que, aparte de los métodos clásicos inductivos y deductivos, los cuales se caracterizan porque los primeros se basan en observar y definir la teoría por medio de los resultados y los deductivos, los cuales por medio de la teoría se realizan observaciones, existe otra clasificación referente a los métodos cuantitativos y cualitativos. A su vez, estos son llamados por algunos autores llamar como flexibles y fijos, pudiendo situar a los proyectos experimentales como del tipo fijos, que es donde se puede categorizar la presente investigación.

Si bien es cierto, los métodos de investigación cualitativos se emplean en mayor medida en el campo humanístico, se puede utilizar también en el área científica. Por lo tanto, no se puede decir que exista un método por excelencia para cada investigación.

De hecho, debe existir una flexibilidad para combinar diferentes metodologías donde lo que realmente importe sea la manera de resolver los problemas presentados de una manera lógica y analítica (Piza Burgos, et al., 2019).

De esta manera, actualmente, se considera la necesidad de combinar varios métodos de investigación para lograr comprender los diferentes contextos en las áreas de estudio, lo cual sugiere el conocimiento de las principales metodologías por parte del investigador. Esto aporta una visión amplia e integral de todo el proceso de investigación que se va a someter a estudio (Piza Burgos, et al., 2019).

De modo que la metodología cualitativa recurre a varias técnicas para la recopilación de datos, entre las cuales se encuentra la observación y la entrevista (Piza Burgos, et al., 2019). En esta investigación, se hizo uso de estas dos técnicas ya que observar el desarrollo de las lechugas es fundamental para realizar ajustes en el diseño electrónico propuesto, además, se recurrió a la técnica de la entrevista con el propósito de obtener información relevante sobre el cultivo de lechuga, tanto en la siembra tradicional, como la realizada en invernaderos. De esta manera, es posible obtener una visión global en el contexto de la agricultura basada en la experiencia.

En lo referente a la técnica de la entrevista, se caracteriza porque es abierta, manejable e íntima, donde existe un intercambio de información entre el entrevistador y el entrevistado. Las entrevistas se pueden dividir en estructuradas, semiestructuradas y abiertas. Para esta investigación, se utilizó un tipo de entrevista semiestructurada, donde el entrevistador puede agregar otras preguntas dependiendo de las respuestas por parte del entrevistado. En este caso, el entrevistador dispone de preguntas donde el orden y la formulación de estas dependen de su propio interés (Piza Burgos, et al., 2019).

Tomando como referencia la información de los párrafos anteriores, este proyecto de investigación, al contemplar la recopilación de datos por medio de sensores que fueron analizados para la toma de decisiones, además de que se basó en información suministrada por medio de las técnicas de la observación de un entorno y entrevista, se deduce que el tipo de metodología empleada es del tipo mixta. Es decir, incluye una

metodología cuantitativa y cualitativa, lo cual presume cierta ventaja sobre los métodos de investigación individuales (Pole, 2009).

3.3 Fuentes de información

Para la realización de este proyecto de investigación, se consultaron múltiples fuentes de información entre las cuales se encuentran tesis, documentos científicos, publicaciones, libros, hojas de datos de componentes y páginas web. Cada una de estas fuentes se estudiaron y se analizaron de manera que permitieron definir cada concepto o técnica empleada en las dos ciencias en las que se basa este estudio.

Para esta investigación, los datos de la parte cuantitativa fueron recopilados por medio de un sistema electrónico instalado en un invernadero en Heredia tal y como se aprecia en el anexo 1, el cual está compuesto por un microcontrolador ESP32, dos sensores de humedad del tipo capacitivo colocados en el sustrato o suelo, un sensor de temperatura colocado a la altura de las plantas y un medidor de caudal de agua. Los datos de temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato y estado de la bomba se estuvieron enviando y guardando en la plataforma ThingSpeak, con el propósito de visualizarlos desde una aplicación móvil o desde cualquier computadora con acceso a internet.

Por otra parte, los datos de carácter cualitativo de la investigación se obtuvieron por medio de la observación del desarrollo y la reacción de las plantas de lechuga a las variables medidas. A partir de ello, se pudo controlar la cantidad de recurso hídrico necesario para el correcto crecimiento. Además, se obtuvo información por medio de la entrevista con la persona agricultora experta y dicha información se utilizó durante el proceso de observación, ya que permitió tomar medidas de acuerdo con las diferentes condiciones que se pueden presentar. Cabe destacar que se contó con el consentimiento informado de la persona entrevistada.

3.4 Variables de análisis

A continuación, se detallan las diferentes etapas, actividades y pasos realizados para el desarrollo de esta investigación relacionada con el diseño electrónico de un

invernadero de lechugas, tomando como referencia los objetivos específicos de este estudio. Se supone que la implementación de tecnología en el campo de la agricultura puede eficientizar el uso de insumos requeridos en esta especialidad. De este modo, se detallan las siguientes actividades:

Etapas # 1:

- Realizar una revisión de la literatura y estudios previos relacionados con el tema de las condiciones y características de la siembra de lechuga por medio del método tradicional o convencional, que se desarrolla en terreno abierto, tomando además en cuenta las referencias de otros países.
- Realizar una visita de campo a un terreno dedicado para la siembra de lechuga.
- Elaborar las preguntas con las cuales se va a realizar la entrevista a la persona experta en la siembra de lechuga.
- Realizar la entrevista a la persona agricultora.

Etapas #2:

- Recopilación de costos económicos en la producción convencional de lechuga por medio de una entrevista.
- Elaboración de un informe de costos.

Etapas #3:

- Selección y compra de componentes electrónicos.
- Instalación y calibración de los componentes electrónicos en el invernadero.
- Monitoreo y recolección de datos.
- Registro diario de temperatura y humedad para realizar ajustes en la programación del sistema de control electrónico.
- Análisis de datos recolectados.

3.5 Instrumentos

Para esta investigación, se realizó una entrevista con una persona agricultora que cuenta con una experiencia de 15 años en la siembra de hortalizas, entre ellas, la lechuga. Se realizó la entrevista de manera personal y se grabó para obtener un audio y realizar la transcripción respectiva. Esta persona dio su consentimiento para utilizar la información suministrada para efectos del presente proyecto.

Asimismo, se elaboró una tabla de Excel con datos de temperatura, cantidad de lúmenes, humedad del suelo, humedad relativa y cantidad de agua utilizada, provenientes de los sensores instalados en el invernadero. También, se realizaron inspecciones visuales de las condiciones físicas de las plantas y del sustrato, con el fin de determinar las mejores condiciones para el desarrollo de las lechugas. Esta tabla se llenó con muestras tomadas en determinadas horas del día al menos durante seis semanas.

3.5.1 Calibración de los sensores de humedad SEN0193

Los sensores capacitivos instalados en el sustrato requieren de una calibración para ajustarlos a los valores reales y alcanzar precisión. Según la hoja de datos del fabricante DFRobot (2017), se debe crear un código básico con el propósito de leer en el monitor serie del IDE de Arduino, el valor máximo y mínimo leído por el sensor cuando este se deja al aire, es decir, cuando el sensor se encuentra totalmente seco, y cuando el sensor está sumergido en agua, sin sobrepasar la línea de advertencia.

Como estos sensores entregan una salida analógica inversamente proporcional a la cantidad de humedad, cuanto mayor sea la humedad detectada, el valor analógico en la salida disminuye, y viceversa. Por lo tanto, cuando el sensor esté expuesto al aire y en condiciones secas, marca un valor bajo. Por consiguiente, cuando el sensor esté expuesto a condiciones totalmente húmedas, el valor es alto. A estos valores, se les conoce como el valor 1 y valor 2, respectivamente. Para efectos de esta investigación, se llaman valor máximo y mínimo.

En la figura 4, se muestra el código con el cual se obtuvieron los valores máximos y mínimos de los dos sensores. Para determinar estos valores, se anotó el valor mínimo dos minutos después de colocar los sensores en un vaso con agua, y el valor máximo dos minutos después de haber secado por completo los sensores. Luego de esto, se realizó una segunda prueba de calibración con una muestra del sustrato en un recipiente con el fin de determinar si existe una diferencia entre las lecturas medidas siguiendo las indicaciones del fabricante y las mediciones hechas con los sensores instalados en esa muestra de sustrato. De esta manera, se procedió a leer los valores en seco y húmedo.

Figura 4

Código para calibración de sensores

```

1 // Código calibración sensores Fabián Delgado Marín 2025
2 // Sensor de humedad S1 pin 34 y S2 pin 35
3 const int sensorPin = 34; // pin del ESP32 al que va conectado el sensor
4
5 // Variable para almacenar el valor 1 y 2 del sensor
6 float humidity1 = 0;
7
8 void setup() {
9     pinMode(sensorPin, INPUT);
10    Serial.begin(115200);
11    Serial.println("Iniciando...");
12 }
13
14 void loop() {
15     int sensorValor1 = analogRead(sensorPin);
16     Serial.print("Valor del sensor: ");
17     Serial.println(sensorValor1);
18     // Anotar los valores mínimos y máximos del sensor
19     // Ajustar el mapeo para que el valor max y min sea 100% y 0% de humedad
20     humidity1 = map(sensorValor1, 2600, 990, 0, 100);
21     Serial.print("Porcentaje de humedad: ");
22     Serial.print(humidity1);
23     Serial.println("%");
24     delay(1000); // Esperar 1 segundo antes de la siguiente lectura
25 }

```

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

En esta segunda prueba de calibración, se promedió un valor máximo y mínimo para cada sensor, tomando como referencia las 24 muestras, considerando que las mediciones de los sensores fluctúan. En la tabla 1, se evidencian los valores obtenidos de estas pruebas, pudiendo observar, con color amarillo, los valores máximos y mínimos, y, con flechas de color azul, los valores máximos y mínimos promediados de las muestras. Estos valores son incorporados al código principal del ESP32.

Tabla 1***Mediciones tomadas para la calibración de los sensores de humedad***

Sensor 1	Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Valor de la muestra	2586	2583	2606	2608	2594	2608	2599	2623	2610	2623	2594	2603	2594	2610	2559	2614	2595	2613	2591	2602	2608	2607	2589	2595
	Promedio	2600,583333																							
Sensor 1	Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Valor de la muestra	1068	949	954	993	1004	1002	987	1008	993	992	1003	991	1007	976	979	998	1015	973	1002	978	998	1023	965	997
	Promedio	993,9583333																							
Sensor 2	Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Valor de la muestra	2559	2559	2590	2559	2582	2559	2559	2559	2675	2640	2530	2617	2615	2592	2581	2593	2607	2559	2559	2602	2581	2579	2591	2587
	Promedio	2584,75																							
Sensor 2	Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Valor de la muestra	970	965	967	989	953	959	973	942	986	973	976	981	981	991	961	967	969	979	973	965	958	977	970	1017
	Promedio	972,5833333																							

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

3.5.2 Calibración de la medición de la cantidad de agua utilizada para el riego

Para determinar la cantidad de agua utilizada en el riego, se realizó una primera prueba tomando como referencia los datos técnicos de la bomba de agua. La capacidad de flujo es de 3 GPM (galones por minuto) con 10 PSI a 12V de CC (corriente continua). Se activó la bomba hasta lograr una salida de agua constante y homogénea en cada gotero, para garantizar el llenado de todo el sistema de riego. Luego, se activó nuevamente la bomba durante un minuto y el agua se depositó en una cubeta de 20 litros.

Posteriormente, se utilizaron tres recipientes con una capacidad de 1 galón y se procedió a llenar cada uno con el agua de la cubeta. El llenado de la cubeta y de los galones se hizo 3 veces y las pruebas arrojaron que la cantidad de agua que se aplica durante un minuto es de 11.6 litros o 3.06 galones. Además de esta referencia, se dispone de un medidor de caudal modelo ICS006 de la marca RainPoint que tiene una tolerancia en la medición de $\pm 5\%$ y una capacidad de 10.6 GPM, que requiere al menos de 7.6 PSI para su funcionamiento. Se realizó un total de 10 pruebas de activación de la bomba para determinar y verificar la exactitud de las mediciones, a partir de las cuales se logra

3.6 Proceso para la recolección y análisis de datos

Para este trabajo de investigación, se realizó una recopilación de datos cualitativos y cuantitativos. En cuanto a los datos cualitativos, tal y como se mencionó anteriormente, se hizo por medio de una entrevista a una persona experta en el campo de la producción de lechugas, mientras los datos del tipo cuantitativo se recopilaron por medio de la plataforma de análisis de datos para el internet de las cosas ThingSpeak, de la compañía MathWorks. Es decir, el sistema electrónico envió información de los sensores instalados en el invernadero para luego procesarlos y analizarlos en esta aplicación para la posterior toma de decisiones.

El análisis de la información se obtuvo por medio de una visualización gráfica en la interfaz ThingSpeak. Además, se pudieron observar los valores máximos y mínimos permitidos según se requiera por medio de las diferentes configuraciones que se pueden realizar en la aplicación de manera intuitiva o ya sea por medio de código de programación en MATLAB. Estas funciones permiten generar algunas actividades como poder visualizar un récord de los cambios de temperatura en un rango de horas o fechas determinadas.

Capítulo IV. Análisis de resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con base en los objetivos específicos y las metodologías aplicadas en este estudio. Dichos resultados permitieron analizar la relevancia e impacto de la investigación. Los datos se organizaron y se interpretaron de acuerdo con la pregunta: ¿Cómo se puede disminuir los costos de producción y recurso hídrico en el cultivo de lechuga por medio del método de siembra en invernadero utilizando tecnología de bajo costo en el primer semestre del 2025 en Costa Rica?

Según la entrevista realizada al agricultor de la zona de Escazú, se determinó que la siembra tradicional de lechuga sigue generando empleo para muchas personas y continúa siendo ampliamente utilizada en el país, sobre todo, por personas de mucha experiencia que siempre han explotado el suelo para producir de manera convencional.

En áreas de terreno muy grandes, se sigue necesitando mano de obra para realizar labores de deshierbe, lo cual se convierte en una fuente de empleo para personas en localidades dedicadas a la siembra de hortalizas.

Por otra parte, el productor agrícola entrevistado mencionó que aún existen personas que alquilan terrenos para producir, lo cual encarece los costos de producción y, a largo plazo, puede ser menos rentable. Las nuevas técnicas y maneras de producir han mejorado mucho la calidad de los productos y ha dejado al descubierto algunas desventajas de la siembra convencional. El hecho de poder producir más durante un periodo determinado y la utilización de menor cantidad de agroquímicos para el control de plagas suponen una gran ventaja de emplear esas nuevas técnicas.

De acuerdo con las declaraciones del agricultor, en el método tradicional de siembra de lechuga, se sigue utilizando el riego por medio de microaspersores, recurriendo a pozos, nacientes o ríos cercanos, es decir, utilizando fuentes hídricas no reguladas que afectan la calidad del agua, dejando al descubierto una desventaja de este tipo de siembra. Además, por medio de la entrevista con el agricultor, se determinó que no existe una medición ni datos exactos sobre la cantidad de agua aplicada en cada riego, ni sobre las condiciones de humedad del suelo y existen prácticas realizadas por años para mitigar los efectos de las altas temperaturas en la lechuga, las cuales, quizás, no sean las más convenientes para el desarrollo de los cultivos, como el riego por aspersión para combatir el estrés térmico de las plantas.

Según la entrevista realizada al agricultor, se determinó que, cuando se siembra a terreno abierto, el uso de fungicidas e insecticidas se incrementa debido a la humedad en las plantas, sobre todo cuando se cultiva en época lluviosa, lo cual representa un aumento significativo en los costos de producción. Considerando la experiencia del agricultor, este método convencional de siembra, en cuanto al rendimiento de la producción, es tres veces menor que utilizar un invernadero, es decir, lo producido en 1500 metros en terreno abierto se puede producir en 500 metros cuadrados en un invernadero.

Asimismo, la entrevista aportó información relevante, ya que, según el productor, él tiene experiencia, tanto en la siembra tradicional, como en la siembra en invernadero, lo cual permitió determinar las ventajas de la aplicación de técnicas modernas para la producción agrícola, tales como mejora en la calidad del producto, menor carga química en los cultivos, el suelo no requiere tanta preparación, se tiene más control sobre las plagas en caso de que aparezcan, no hay que deshierbar, entre otras.

Otro resultado de suma importancia obtenido de la entrevista es el tiempo de cosecha entre un método y otro, pues, según el agricultor, el tiempo de producción se puede acelerar cuando se utiliza la siembra en invernadero, ya sea aplicando técnicas de riego o de formulación de nutrientes sin afectar la calidad del producto, lo cual repercute significativamente en las ganancias anuales, porque aumenta el número de cosechas durante ese periodo.

El análisis de costos de producción es fundamental para comprender la viabilidad económica de la siembra tradicional de lechuga en terrenos abiertos y poder compararla con otros métodos de siembra como los invernaderos. De acuerdo con la información aportada por el agricultor, se identificaron diversos factores que influyen en los costos de producción, incluyendo mano de obra e insumos agrícolas. En la tabla 3, se detallan estos aspectos según la experiencia del productor, tomando en cuenta que la cantidad de agua es un recurso que, definitivamente, no se mide en la siembra tradicional.

Por otra parte, existen otros aspectos que sí se pueden definir, como la cantidad de peones requerida para realizar las labores de deshierbe. En un terreno de 500 m^2 , según el agricultor entrevistado, se necesitan al menos dos peones que realicen dos deshierbes durante una cosecha completa. Por otra parte, se necesita la aplicación de fungicidas, insecticidas y fertilizantes para combatir las afectaciones que sufren las plantas de lechuga y poder ayudarlas con el crecimiento y desarrollo. En la tabla 3 se muestra los costos de producción de una cosecha de lechuga por medio del método convencional de siembra.

Tabla 3*Insumos y costos de producción de una cosecha convencional de lechuga*

Costos de una cosecha convencional de lechuga			
$A = 500m^2$			
Insumo	Cantidad	Precio Unitario	Total por insumo
1 Agua	N.A	N.A	N.A
2 Peones	4	₡ 12 000,00	₡ 48 000,00
3 Fungicida Serenade	1	₡ 25 178,31	₡ 25 178,31
4 Fungicida/Bactericida Kilol	1	₡ 25 000,00	₡ 25 000,00
5 Fertilizante granulado	2	₡ 45 000,00	₡ 90 000,00
6 Insecticida Sunfire	1	₡ 15 000	₡ 15 000,00
		Total por cosecha	₡ 203 178,31

Distancia de siembra entre lechugas cm	30	Nota: Siembra en terreno propio. No incluye costos de preparación del suelo.
Cantidad de lechugas por m^2	11	
Cantidad total de lechugas	5500	
Area terreno	500 m^2	
Precio de venta lechuga	₡ 250	
Ganancia bruta	₡ 1 375 000	
Ganancia neta	₡ 1 171 822	

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025).

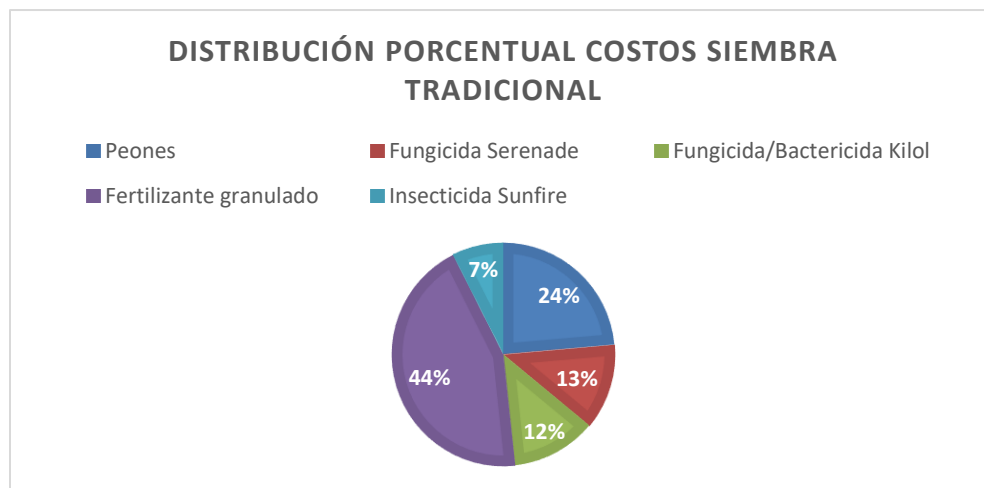
En la tabla anterior, se observa que la distancia de siembra entre lechugas es de 30 cm, pudiéndose obtener un total de aproximadamente 11 lechugas por metro cuadrado, lo cual equivale a un total de unas 5500 lechugas en un terreno de 500 m^2 . Los costos de producción se aprecian en la celda de color naranja, mientras la ganancia neta considerando esos costos se reflejan en la celda de color verde. El precio de venta de las lechugas puede variar dependiendo del cliente final o del comercio que requiera el producto. Este cálculo no contempla la previa preparación del suelo antes de la siembra y se asume que el terreno para producir es propiedad del productor.

De esta manera, si se hace un análisis de los costos en este tipo de siembra, se puede determinar que el insumo que genera el mayor gasto es el correspondiente al fertilizante granulado, representando un 44% del total de los costos. En segundo lugar, se destaca el relacionado con la mano de obra para las labores del deshierbe con un

24%, seguido de los componentes químicos necesarios para el control de insectos y hongos que entre los tres representan un 32% del total de los costos. Estos porcentajes están reflejados en la figura 5:

Figura 5

Costos de una cosecha tradicional de lechuga en 500 m²

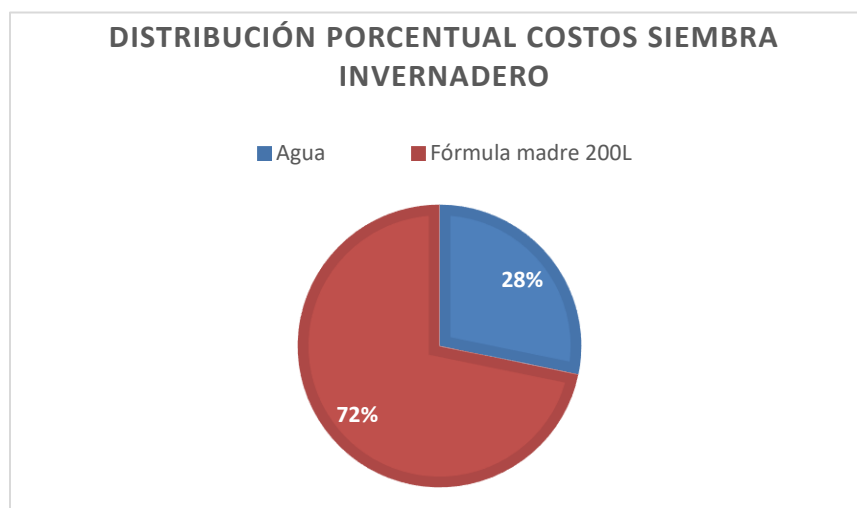


Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Dentro de los objetivos específicos de esta investigación, no se contempla hacer un análisis de los costos de producción de la siembra de lechuga mediante invernadero. Sin embargo, aprovechando la información suministrada por el agricultor, se presentan los resultados de los costos de los insumos utilizando un invernadero de 500 m² para producir lechuga. Estos datos se reflejan en la figura 6, donde se observa que, básicamente, son dos los insumos requeridos: agua y fórmula madre.

Figura 6

Costos de una cosecha de lechuga en invernadero de 500 m²



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

En este caso, el consumo de agua potable representa el 28% de los costos y el 72% restante corresponde a la solución nutritiva que se le aplica al cultivo mediante el sistema de riego por goteo. Con respecto al agua, se determinó que se requieren, aproximadamente, 32 000 litros de agua, los cuales representan un total de 32 metros cúbicos, ya que, según Serrano Ceballos, et al. (2017), un metro cúbico equivale a 1000 litros de agua. Esto supone que, utilizar un invernadero facilita el cálculo del consumo de agua para producir y mejora la calidad de agua utilizada para el riego.

Para el cálculo en colones (moneda de Costa Rica) del consumo de agua, se utilizó la información de las tarifas disponibles en la página web de la ARESEP (Autoridad Reguladora de Servicios Públicos), en la sección “Servicios Regulados”, “Agua Potable”, apartado “Tarifas ESPH y AyA”, en la cual se puede acceder a la tabla de precios y costos según el bloque de consumo #3. Se selecciona el operador AyA, el servicio acueducto y el tipo de abonado residencial. De esta manera, se determina que el monto aproximado por concepto de recurso hídrico para la siembra en un invernadero con estas dimensiones es de ₡ 42 320 considerando un cargo fijo por servicio de dos mil colones.

En lo referente al insumo de la solución nutritiva o fórmula madre, representó el gasto más grande con un costo aproximado de ¢ 107 000 por cosecha. Según el agricultor, esta fórmula requiere de varias sales minerales detalladas en la tabla 4. En ella, se determinó, tanto el costo por componente, como el costo de la inversión inicial de la fórmula, ya que algunos minerales solo se venden en presentaciones mayores a 20 kilos. Esto supone un ahorro en la segunda cosecha debido a que, para crear la nueva fórmula, ya no se deben comprar algunas sales.

Tabla 4

Componentes y cálculo del costo de la fórmula madre

Cálculo del Costo de la Fórmula Madre para una Cosecha				
A = 500m ²				
Componente	Presentación	Precio	Cantidad Requerida	Precio de acuerdo a la cantidad requerida
1 Hierro	1Kg	¢ 9 749	330g	¢ 3 218
2 Cobre	1Kg	¢ 5 957	10 g	¢ 80
3 Manganeso	1Kg	¢ 9 359	150 g	¢ 1 404
4 Zinc	1Kg	¢ 9 749	60 g	¢ 585
5 Boro	1 Kg	¢ 5 518	50 g	¢ 276
6 Nitrato Calcio	25 Kg	¢ 13 500	20 Kg	¢ 10 800
7 Nitrato Amonio	1 Kg	¢ 4 000	400 g	¢ 2 000
8 Sulfato Potasio	25 Kg	¢ 16 500	12 Kg	¢ 7 920
9 Sulfato Magnesio	25 Kg	¢ 8 139	10 Kg	¢ 3 256
10 Fosfato Monopatásico	1 Kg * 5	¢ 18 100	5Kg	¢ 18 100
	Subtotal	¢ 100 571	Subtotal	¢ 47 639
	IVA	13%	IVA	13%
Nota: Fuente COOPASAE. Proforma # 1683	Inversión inicial en fórmula	¢ 113 645	Costo total de una fórmula madre	¢ 53 832
	Cantidad de fórmulas madre requeridas para una cosecha de lechugas.			2
	Costo total en fórmula para una cosecha			¢ 107 664

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

De esta forma, según la información aportada por el productor y los datos de precios recopilados, se definieron y se compararon los costos de producción para los dos métodos de siembra. En la tabla 5, se muestran los costos y la ganancia neta

aproximados de un invernadero de lechugas de 500 m^2 y, sobre todo, se realizó un cálculo del porcentaje de ganancia con relación al método tradicional de siembra, en el cual se determinó que el porcentaje de ganancia es de aproximadamente 92% más que realizar una producción de lechugas en terreno abierto.

Tabla 5

Insumos y costos de una cosecha en invernadero de 500 m^2

Costos de una cosecha de lechuga en invernadero			
$A = 500\text{m}^2$			
Insumo	Cantidad	Precio Unitario	Total por insumo
↓	↓	↓	↓
1 Agua m^3	32	¢ 1 260	¢ 42 320
2 Fórmula madre 200L	2	¢ 53 832	¢ 107 664
		Total por cosecha	¢ 149 984

Distancia de siembra entre lechugas cm	25	Nota: No incluye costos del sustrato. Precio unitario del Agua + 2000 cargo fijo AyA
Cantidad de lechugas por m^2	16	
Cantidad total de lechugas en	8000	
Area terreno	500 m^2	
Precio de venta lechuga	¢ 300	
Ganancia bruta	¢ 2 400 000	
Ganancia neta	¢ 2 250 016	
Porcentaje de ganancia con respecto a la siembra en terreno abierto.	92,01%	

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Aparte de esta gran ventaja, se determinó que producir en invernadero disminuye las labores de limpieza del suelo, con lo cual se ahorra en mano de obra. Además, la carga química que se les aplica a las plantas para combatir plagas o enfermedades prácticamente desaparece y, en el caso de una afectación, se puede realizar un mejor control. Aunado a lo anterior, se debe agregar que, a pesar de la inversión inicial en la fórmula, aun así, la ganancia es casi el doble y el costo en la siguiente cosecha disminuye por motivo de que no se debe incurrir en algunos gastos relacionados con compra de ciertos minerales, lo cual incrementa el margen de ganancia.

Ahora bien, en relación con los datos suministrados por los sensores instalados en el invernadero, se tomó en cuenta que la lechuga necesita realizar el proceso de fotosíntesis. Esto depende de la incidencia de la luz solar directa sobre ellas, para lo cual se consideró la cantidad de horas de luz solar y la temperatura de exposición de las plantas. Por ello, se determinaron, tanto las horas a las que las lechugas comenzaron a sufrir estrés térmico, como la temperatura a la cual ocurrió el evento. Con estos dos parámetros, se definió el momento cuando se debía cerrar la malla de sombreado.

Durante aproximadamente veinte días, se comparó el desarrollo de las lechugas en invernadero, con las de otra cama de cultivo que no tenía ningún control o monitoreo electrónico. Esto permitió determinar que se debía corregir los umbrales máximos y mínimos de temperatura para apertura y cierre del techo que se habían definido en el código del ESP32, los cuales estaban definidos en 28° y 25° Celsius, ya que se observaron más compactas y formadas que las que estaban en el invernadero. Estos umbrales provocaron que el tiempo de sombra fuera de siete horas al día, desde las 8:30 a.m., hasta las 3:00 p.m. aproximadamente, con lo cual las plantas recibieron muy poca luz solar directa. Por tanto, se afectó la firmeza de las hojas y su coloración.

Aunado a lo anterior, se determinó que la cantidad de horas de luz solar directa sobre las plantas se puede visualizar mediante la variación de temperatura durante el día por medio de la plataforma ThingSpeak, tal y como se muestra en la figura 7, en donde se observa que los niveles más altos de temperatura concuerdan con la cantidad de horas de luz directa sobre las plantas. Esto evidenció la poca luz que recibieron las lechugas durante esos veinte días. Este histograma de temperatura se realizó por medio de la funcionalidad de la plataforma ThingSpeak llamada “*MATLAB Visualization*”.

Figura 7

Niveles máximos de temperatura durante el día



Nota: Elaboración propia utilizando programación en MATLAB directamente desde ThingSpeak (2025)

Ahora bien, si se cierra el techo a una temperatura muy baja, las plantas no obtenían la suficiente cantidad de luz para un buen desarrollo. Por lo contrario, si se cierra a una temperatura muy alta, las lechugas sufrirían de mucho estrés térmico. De tal manera que, después de un exhaustivo proceso de observación y análisis de las condiciones imperantes en la zona donde se ubica el invernadero, y la época en la que se realiza la investigación, se logró determinar que la temperatura para cerrar el techo debía ser de 33° Celsius.

Esto se determinó realizando un monitoreo de temperatura durante el día. Se tomó una muestra de temperatura a las nueve de la mañana, cuyo valor fue de 32° Celsius con el cielo totalmente despejado. A esa hora, las lechugas tenían dos horas de estar recibiendo sol y no mostraron signos de estrés térmico. Sin embargo, luego de continuar con el proceso de observación, se logró visualizar la afectación sufrida por las lechugas a las 12:00 md, precisamente cuando la temperatura alcanzó los 33° Celsius.

De esta manera, la afectación por estrés térmico se da cuando las plantas están por mucho tiempo expuestas a la luz solar directa y cuando la temperatura es mayor o

igual a 33° Celsius. De esta forma, con este dato, se realizaron los ajustes para que las lechugas recibieran aproximadamente cinco horas y treinta minutos de exposición a la incidencia de luz solar directa, lo cual favoreció el proceso de fotosíntesis y, cuando se alcance la temperatura de 33° Celsius, se cierre la malla de sombreado. Por tanto, se protegen las plantas del estrés térmico.

Además de este análisis, se determinó que se puede volver a abrir la malla de sombreado cuando la temperatura desciende por el efecto del techo de sarán. Se configuró en el código del ESP32 el umbral mínimo de 31° Celsius como punto de referencia para abrir el techo nuevamente y propiciar una buena cantidad de luz sobre las plantas. De esta manera, se logró que la malla de sombreado se cierre para proteger las plantas del estrés térmico que se comienza a evidenciar cuando la temperatura alcanza los 33° Celsius. Además, que la malla se abra nuevamente para que la luz solar continúe irradiando las lechugas.

El proceso anterior permitió que las plantas recibieran luz cada seis minutos durante tres minutos, especialmente en condiciones de alta temperatura. Esto evitó que las lechugas pasaran largos periodos sin luz, lo cual podría impedir que alcancen el mínimo de seis horas diarias necesarias para su desarrollo. En el invernadero, a partir de la 1:30 p.m., la luz directa del sol no alcanzó las lechugas debido a la sombra proyectada por un árbol de gran tamaño. Para compensar esta reducción, se implementó esta estrategia que les permitió a las plantas el recibir al menos cinco horas con treinta minutos efectivos de luz en condiciones extremas de temperatura, sin que muestren una afectación térmica.

Una vez realizada esta modificación, se procedió a observar la reacción de las plantas y compararlas con las que estaban sin ningún control electrónico. Una semana después las plantas presentaron una forma más compacta y con hojas muy grandes en comparación con las otras. Por consiguiente, se determinó que la exposición directa a la luz solar es necesaria y que se puede implementar medidas que mitiguen el impacto del estrés térmico sin que necesariamente involucre la aplicación de un riego sobre las plantas, como se hace en la siembra tradicional. Sin embargo, si los niveles de humedad

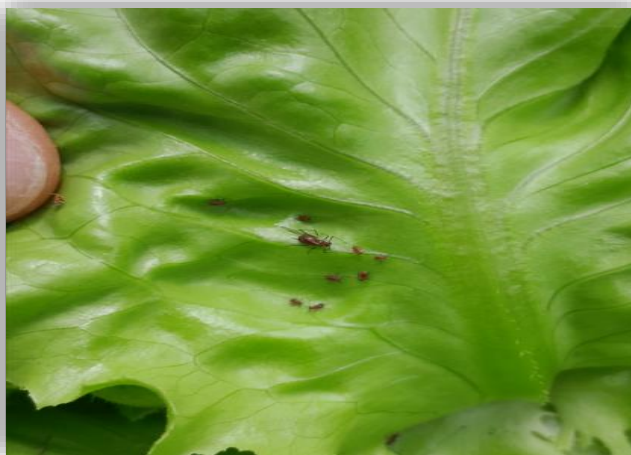
del sustrato están dentro de valores permitidos, la exposición directa al sol durante muchas horas no implica que las plantas se vayan a marchitar o morir.

En esta misma línea de ideas, se determinó que, aunque las plantas recibieron una cantidad aproximada de 25 000 lúmenes, no es un valor adecuado que permita el correcto proceso de fotosíntesis y el crecimiento de las lechugas, pues, cuando este parámetro alcanzó ese valor las lechugas crecieron con hojas grandes, pero no firmes hacia arriba, más bien hacia los lados. Una vez implementada la técnica de sombreado y modificados los umbrales de temperatura mencionados anteriormente, la cantidad de lúmenes aumentó a valores aproximados de 250 000 y la reacción del cultivo fue mucho más favorable.

Otro resultado obtenido fue la relación directa observada entre los niveles de humedad altos con la aparición de insectos. En este caso, se observaron pulgones en algunas plantas, como los de la figura 8. Sin embargo, aunque no en todas hubo presencia de este insecto ni en grandes cantidades, vale la pena mencionar que, según Fernández Acevedo (2023), este representa una de las principales plagas del cultivo de esta hortaliza a nivel mundial. La aparición de este insecto se dio cuando las plantas estuvieron expuestas a niveles de humedad del suelo de entre 70% y 80% durante aproximadamente veinte días.

Figura 8

Aparición de insectos por niveles altos de humedad



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Asimismo, la humedad se mantuvo entre esos valores debido a que, durante ese tiempo, los umbrales de temperatura para abrir y cerrar el techo no se habían ajustado en el código del ESP32 para propiciar la suficiente luz solar sobre las plantas. Ello provocó que el sustrato no se secara, lo cual contribuyó a que la humedad se mantuviera en esos niveles tan altos. Entonces, se tomó la decisión de suspender el riego y dejar secar el sustrato para observar la reacción de los insectos a una humedad más baja. Se limpiaron las pocas hojas que tenían insectos y se dejó que la humedad disminuyera hasta un valor entre 50% y 60%. Es necesario mencionar que se mantuvo así por 5 días, lo cual dio como resultado la desaparición de los pulgones.

Del mismo modo, se observó que, aun cuando la humedad del suelo estuvo en valores próximos al 35%, las lechugas no se vieron afectadas por la humedad baja, lo cual sirvió como parámetro para crear una alerta en la aplicación ThingSpeak con el fin de que, en caso de una humedad muy baja o cercana al 35%, enviara una notificación sobre esa condición. Esto se realizó por medio de código en MATLAB directamente en la plataforma IoT, y trabaja en conjunto con otra alerta que se creó para notificar la activación o desactivación de la bomba de agua para el riego.

De esta manera, cuando se realizaron estas pruebas y se monitorearon los datos de los sensores, se pudo determinar el rango de humedad en el cual las plantas pueden desarrollarse normalmente sin afectación por baja o alta humedad. Es decir, con los datos suministrados por los sensores colocados en el sustrato, se configuraron los rangos permitidos de humedad en la plataforma ThingSpeak. De este modo, se pudo monitorear esa variable para que, en caso de necesitarse, tomar decisiones sobre el cultivo de manera automática por medio del código fuente del ESP32.

En la figura 9, se muestra parte de la interfaz en ThingSpeak, donde se aprecian los rangos de humedad definidos a partir de lo expuesto en el párrafo anterior. En ese sentido, se observa que el rango de humedad del sensor 1 está en la zona de color verde y que el sensor 2 está en el rango de humedad con color amarillo. De esta manera, se determinó que, en el caso del sensor 2, era necesario que los niveles de humedad disminuyeran para evitar la presencia de insectos. Vale la pena recordar que, como se explicó en párrafos anteriores, cuando la humedad del sustrato se mantuvo superior a

70% por aproximadamente veinte días, fue cuando hubo presencia de insectos. Así fue como se definió un valor de 60% como límite máximo permitido de color verde, creando de esta manera una especie de “zona segura”.

Figura 9

Interfaz en ThingSpeak para monitoreo de humedad en las plantas



Nota: Elaboración propia utilizando las funcionalidades de la Plataforma ThingSpeak (2025)

Por lo tanto, en ThingSpeak, se configuraron dos “*Emails Alerts*” que cumplen la función de notificar cuando la humedad del sustrato es superior a 85% o inferior a 35%. En el caso de humedad baja, se configuró en el código la activación de la bomba para que aplique un riego de aproximadamente 7 litros y que espere 15 minutos para permitir que el agua se asiente por todo el sustrato. Si pasado ese tiempo la humedad continúa baja, la bomba se activará nuevamente. Esta configuración permitió establecer una referencia en caso de que la bomba no se active y que el dato que el ESP32 envió a ThingSpeak muestre lo contrario.

En este punto, es importante aclarar que se creó un campo en el canal de ThingSpeak, donde se puede monitorear la activación y desactivación de la bomba. Por lo tanto, si en ese campo se registra el encendido, pero después de 15 minutos la humedad se encuentra en el mismo valor, sería un indicativo de que ocurrió algún problema eléctrico o mecánico que impidió la activación real de la bomba de agua. De esta manera, se toma la decisión de realizar una visita de campo para inspeccionar el

correcto funcionamiento de la bomba. En la figura 10 se muestra el “*Email Alert*” y el campo correspondiente a la activación y desactivación de la bomba de agua.

Figura 10

Notificación de ThingSpeak y campo para el monitoreo del estado de la bomba



Nota: Elaboración propia utilizando las funcionalidades de la plataforma ThingSpeak (2025).

Por otra parte, en el caso contrario, es decir, que la humedad sea demasiado alta, se programó en código MATLAB directamente en la aplicación con el fin de que se envíe una alerta de humedad alta. Esta información se puede comparar con los datos de humedad y estado de la bomba, de manera tal que, si la humedad aumenta en un tiempo determinado y no se refleja un registro del encendido de la bomba durante ese tiempo, se asume que algún problema ocurrió y se debe realizar una visita de campo para verificar el funcionamiento del dispositivo. Esto se realizó considerando que pueden ocurrir algunas eventualidades como las descritas y a la vez se aprovechó las capacidades y funciones de la plataforma.

En este punto, es importante mencionar que los datos enviados a la plataforma IoT fueron temperatura, humedad relativa, humedad de los dos sensores colocados en

el sustrato y estado de la bomba de agua. Las variables definidas en el código del ESP32 para los sensores fueron del tipo “float” ya que, según Rivera (2023), se usan para representar números con parte decimal para mayor precisión, como en este caso, y la variable del estado de la bomba fue del tipo “bool”. El ESP32, tal y como se detalló en el marco teórico, es un procesador de 32 bits, lo cual supone un esfuerzo al ejecutar operaciones con esa cantidad de bits (Llamas, 2022) y, para la variable de la bomba, se usa un total de 8 bits.

De esta manera, para el cálculo de consumo de datos móviles enviados a ThingSpeak desde el ESP32, se realizó la tabla 6, donde se aprecian el tipo de variables y la cantidad de bits enviados por minuto, por día y por mes. De tal manera que se envió un mensaje cada 60 segundos, y cada mensaje contenía la información de las 5 variables, que representaban un total de 1 440 mensajes por día. Este cálculo fue de mucha importancia porque definió la cantidad que se enviarán por año, y así, no exceder el límite anual de mensajes que establece la aplicación ThingSpeak en la versión gratuita. Sin embargo, aun así, la cantidad anual se calculó para 535 680 mensajes aproximadamente, que representa el 17.8 % del total de 3 000 000 permitidos.

Tabla 6

Cálculo y consumo de datos móviles utilizados por el teléfono router

Cálculo mensual del consumo de datos móviles

Variables / Datos	Tipos de variables que se envían a ThingSpeak	Cantidad de Bits por dato Bits	Cantidad de datos o variables enviados por minuto	Datos enviados por minuto Kb	Datos enviados por día Kb	Consumo mensual de datos MBytes	Cantidad de paquetes de datos por hora	Cantidad de paquetes de datos por día	Cantidad de paquetes de datos por mes	Cantidad de paquetes mensajes por año licencia gratuita	Tiempo estimado de uso licencia gratuita años
1 Temperatura. 2 Humedad relativa. 3 Humedad del suelo S1. 4 Humedad del suelo S2. 5 Estado de la bomba	float bool	32	5	0,16	230,4	0,89	60	1440	44640	535680	5,6

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Ahora bien, era muy importante calcular el costo mensual en colones que representaba el envío de esos datos, para lo cual se intentó obtener una respuesta oficial y directa del centro de servicio al cliente de la operadora Claro Costa Rica. Sin embargo,

no tenían un monto aproximado para la poca cantidad de datos que se estaría utilizando en el invernadero. Consecuentemente, se procedió a deshabilitar las aplicaciones del teléfono celular usado como *router*, pues utilizaban datos móviles en segundo plano. De esta manera, se aseguró que el saldo fuera consumido por el uso exclusivo del envío de las variables del invernadero a la aplicación IoT.

Por lo tanto, se realizó también un seguimiento del consumo de datos móviles por medio de la aplicación móvil Mi Claro, de la operadora de telefonía celular Claro Costa Rica con el objetivo de definir el costo mensual en colones del envío de datos. Para esto, se creó la tabla 7, donde se reflejan aspectos como fecha, hora y monto de las recargas realizadas, así como el uso dado a esos datos móviles. De este modo, se anotó el saldo de datos en diferentes fechas que definió el consumo diario y mensual en colones por concepto de envío de datos desde el ESP32 a ThingSpeak. Por ende, se determinó que el consumo diario de datos costaba ¢30 diarios que son aproximadamente ¢1 000 mensuales.

Tabla 7

Monitoreo y control del consumo de datos móviles

Saldo por Día Según App Mi Claro CR				
Fecha y Hora	Monto Recarga	Saldo	Uso	Consumo diario
25/4/2025 11:21	¢ 1 000,00	¢ 1 000,00	Uso Exclusivo Envío Datos	N.A
27/4/2025 11:25	¢ -	¢ 940,00	Uso Exclusivo Envío Datos	¢ 30,00
29/4/2025 11:21	¢ -	¢ 882,00	Uso Exclusivo Envío Datos	¢ 29,00
11/5/2025 4:04 pm	¢ -	¢ 410,00	Envío Datos y monitoreo Web	¢ 39,00
25/5/2025 2:00 pm	¢ -	¢ 1,00	Uso Exclusivo Envío Datos	¢ 29,20

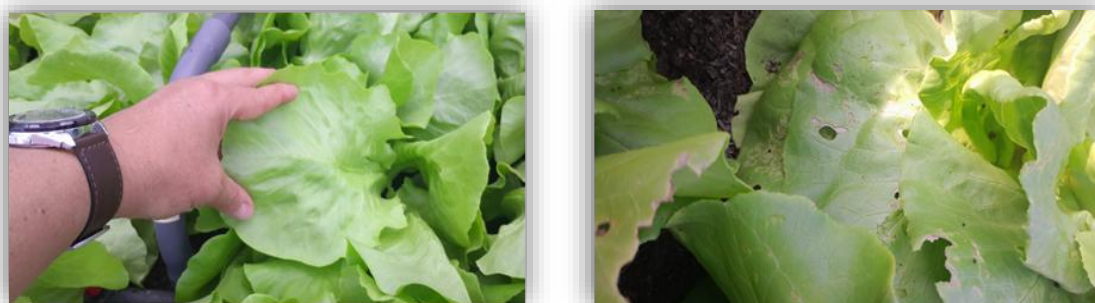
Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Durante la investigación, se realizó un seguimiento de la cantidad de mensajes y correos de alertas enviadas y recibidas en la aplicación ThingSpeak por medio de la información suministrada en la sección “*My Account*”. En este apartado, se visualizó la cantidad de mensajes que el ESP32 envió diariamente. De esta forma, se observó si existió alguna pérdida de datos o de comunicación. Sin embargo, aprovechando las funcionalidades de la aplicación, se creó un “*React*” utilizando código MATLAB con el propósito de que, en caso de no recibir datos, se envíe un mensaje de alerta por correo electrónico informando el error.

Con respecto al desarrollo de las plantas, en la figura 11, se puede apreciar una comparación entre dos camas de cultivo. La imagen de la izquierda corresponde a las hojas de las plantas que estuvieron monitoreadas y controladas por medio del sistema electrónico, mientras la imagen de la derecha corresponde a las hojas de las plantas que se han desarrollado sin ningún control. A estas últimas, únicamente, se les ha aplicado riego directamente en las raíces de manera manual cada vez que se observaba que era necesario.

Figura 11

Comparación entre plantas: ambiente controlado y ambiente no controlado



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

El riego de estas plantas se hizo de esa manera con el propósito de no humedecer las hojas para evitar la aparición de insectos. Sin embargo, fue imposible que no solo aparecieran pulgones, sino también el gusano cogollero, el cual, según Graemiger Muñoz

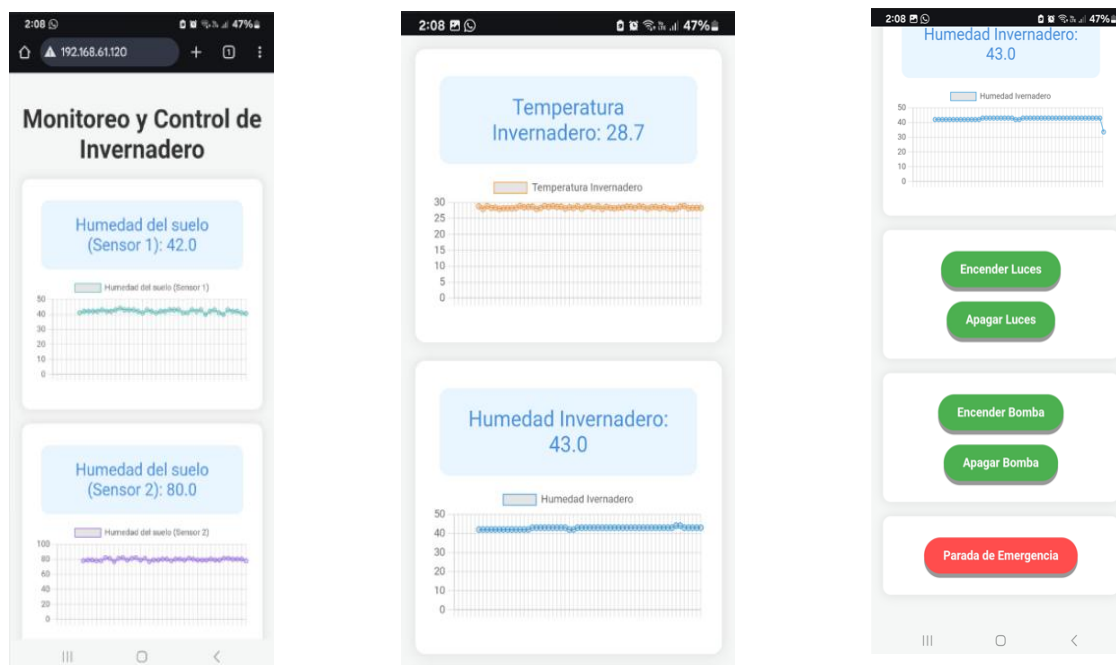
y San Segundo (2016), es una especie que ataca mayormente al maíz, pero que puede afectar también a otras plantas, prefiriendo zonas como el envés de las hojas para alimentarse y que llegan a las plantas por medio de las polillas nocturnas.

La comparación entre plantas se realizó a los 35 días de haber realizado el trasplante. En ese sentido, se observó cómo las hojas de las plantas desarrolladas en invernadero tenían una coloración verde claro y se veían saludables, mientras que las otras tenían un color verde más oscuro con algunas manchas amarillas en las puntas de las hojas. Asimismo, se determinó que la textura de las hojas de las lechugas en el invernadero era más suave, crujiente y, en general, más grande, a pesar de que es el mismo tipo de lechuga. De igual manera, las plantas del invernadero tomaron una forma compacta con hojas enrolladas hacia el centro, mientras que las otras no tomaron esa forma.

Continuando con el análisis de resultados, se programó el microcontrolador para disponer de una interfaz web, como la mostrada en la figura 12, donde se visualizaron los datos de los sensores. Además, se programó el ESP32 para que, por medio de esa misma interfaz, se pudiera realizar la activación y desactivación de la bomba de agua. Esta característica fue de mucha importancia porque, a través de ella, se realizaron las pruebas de medición de la cantidad de agua suministrada por la bomba de acuerdo con el tiempo de encendido. En forma adicional, se configuraron dos funciones más para encender y apagar luces en caso de requerirse para alguna mejora que se desee implementar en el futuro.

Figura 12

Interfaz web desde dispositivo móvil para el monitoreo y control del invernadero



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Esta interfaz se programó en el código del ESP32 para tener acceso a los datos sin depender de una aplicación gratuita o de paga para dispositivos móviles, considerando tener varias opciones en caso de que alguna falle. Es decir, se realizó la lectura de los datos por medio de la interfaz web con el número de IP (*Internet Protocol*) que el teléfono *router* asigna al ESP32, también, por medio de una computadora utilizando un explorador *web*, además, se instaló la aplicación para dispositivos móviles de ThingSpeak, tanto en su versión gratuita, como la versión de paga. En este último caso, no se notó una diferencia entre ambas versiones, pues muestran las mismas opciones y la misma interfaz. La versión de paga costó ¢980.

Se accedió a la interfaz web utilizando los credenciales establecidos y configurados en el código fuente del ESP32, y se procedió a guardar la contraseña en el explorador del teléfono para facilitar el acceso. Se determinó que, mientras el teléfono estuvo encendido y tenía saldo de datos, el teléfono que funcionó como *router* no cambió

la IP que le asignó al ESP32. Dicha situación evitó que se tuviera que ingresar una IP diferente cada vez que se quería acceder a la información de los sensores y a la interfaz. Sin embargo, la mayoría de las veces que se realizó un monitoreo de las variables del invernadero en el sitio se hizo por medio de la aplicación móvil, ya que esto generó un ahorro de datos usados por el teléfono *router*.

En el programa para el ESP32, se configuró una parte del código relacionada con el reinicio del microcontrolador, ya que, en caso de un corte de fluido eléctrico, el microcontrolador debía saber en qué posición estaba el techo, pues solo se dispone de un final de carrera, el cual detectaba cuando la malla de sombreado se encontraba totalmente cerrada. Por ende, se utilizó la librería *EEPROM* para almacenar el último estado del techo antes del reinicio.

Por lo tanto, se almacenó el estado del techo cada vez que se abrió o se cerró. Adicionalmente, para mayor seguridad, se programó para que siempre que se reinicie lo primero que debe hacer es buscar el final de carrera y, luego, lea la temperatura y, dependiendo de ese dato, decida abrir o cerrar el techo de sarán. Esta apertura y cierre se hizo por medio de los dos servomotores de rotación continua que se encargan de mover el peso de los tornillos y de las poleas, trabajando en conjunto para que no sufran tanto esfuerzo mecánico.

Con respecto al invernadero, es importante mencionar que, de manera original, solo contaba con el techo de plástico transparente y sus cuatro lados estaban totalmente abiertos. Se cerró con plástico transparente dos de sus lados y los otros dos se dejaron abiertos, lo cual permitió una constante ventilación, además de brindar un aislamiento de las condiciones climáticas durante el periodo de experimentación. Sin lugar a dudas, esto contribuyó al correcto desarrollo de las plantas, ya que no estuvieron expuestas a los insectos a pesar de la cercanía con la otra cama de cultivo en donde si hubo una afectación de este tipo.

Asimismo, se le colocó una pequeña canoa al invernadero en una de las aguas del techo por medio de la cual se captó el agua de lluvia cuando comenzó la transición entre la época seca y lluviosa. También, se le colocó un filtro para que el agua ingrese al

tanque lo más limpia posible y libre de materiales que pudieran afectar el desempeño de la bomba y se comprobó su funcionamiento con las primeras lluvias durante el mes de mayo.

Pasados 40 días después del trasplante, se realizó la cosecha de siete lechugas debido a su gran tamaño y cercanía entre ellas, y se determinó que el tamaño era mucho más grande y pesaban más que las otras plantas que no estaban controladas por medio de electrónica, tal y como se aprecia en la figura 13. El sabor no fue tan amargo como otro tipo de lechugas, sin embargo, se comparó el sabor con las últimas cosechadas el día 43 y se determinó que el sabor de estas últimas era aún más dulce. Por tanto, se comprobó que el tipo de lechuga sembrada era lechuga mantequilla.

Figura 13

Cosecha de las primeras lechugas



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Además, durante el periodo de experimentación, se determinó que las lechugas monitoreadas y controladas tuvieron un color verde claro con una apariencia más crujiente en sus hojas como se aprecia en el anexo 2. Mientras tanto, en las que estaban expuestas a la luz solar directa, siempre el color fue verde oscuro y, en sus hojas, se les notaban muchas manchas e insectos que se comieron algunas hojas dejándolas marcadas y provocando una diferencia muy notable entre plantas.

Como resultado de los datos obtenidos de las muestras tomadas durante esta investigación, en lo referente al consumo de agua, se determinó que cada planta requirió aproximadamente 2.34 L de agua durante el ciclo de cultivo de 45 días, lo cual se calculó mediante la ecuación 1, en la cual se consideró el total de agua utilizada durante el ciclo y la cantidad de lechugas que se sembraron. Esto dio como resultado un total de 46.8 L. Por otra parte, del total de 20 plantas solo una no alcanzó un tamaño similar a las demás.

[1]

$$\text{Cant. agua por planta} = \frac{\text{Total litros de agua durante el ciclo}}{\text{Cantidad de plantas}} = \frac{46.8}{20} \approx 2.34 \text{ L}$$

En consecuencia, se determinó que el consumo de agua fue mucho menor con respecto a otros métodos de siembra de lechuga, por ejemplo, la hidroponía. Según la investigación relacionada con la siembra de lechuga en hidroponía realizada por Garzón (2006), cada planta requirió aproximadamente 11 litros de agua durante un ciclo de cultivo de 51 días. Si ese ciclo de cultivo hubiera sido de 45 días, por regla de tres, el consumo de agua por planta hubiera sido de 9.7 L. Además, si ese resultado se multiplica por 20 plantas para compararlo con la cantidad de lechugas de esta investigación, representaría un total de 194 L de agua.

Los datos obtenidos de cada una de las muestras tomadas de los sensores instalados en el invernadero se detallan en la tabla 8, donde se aprecian los datos de carácter cuantitativo y cualitativo de la investigación. A partir de estos, se determinaron algunos resultados que permitieron tomar decisiones sobre las mejores condiciones que condujeron a un desarrollo saludable de las plantas de lechuga.

Así mismo, se registraron los valores de los sensores de humedad del sustrato, lo cual permitió determinar que en el sensor 2 los niveles de humedad se mantuvieron más altos con relación al sensor 1. Esto se debe a que, cuando se fabricó el suelo del invernadero, quedó ligeramente desnivelado en esa parte, provocando mayor retención de agua por la mayor cantidad de sustrato. Dicha situación se comprobó una vez que se

realizó la cosecha y se removió todo el sustrato. Lo anterior permitió determinar que los niveles de humedad altos cerca del sensor 2 provocaron la aparición de los primeros pulgones.

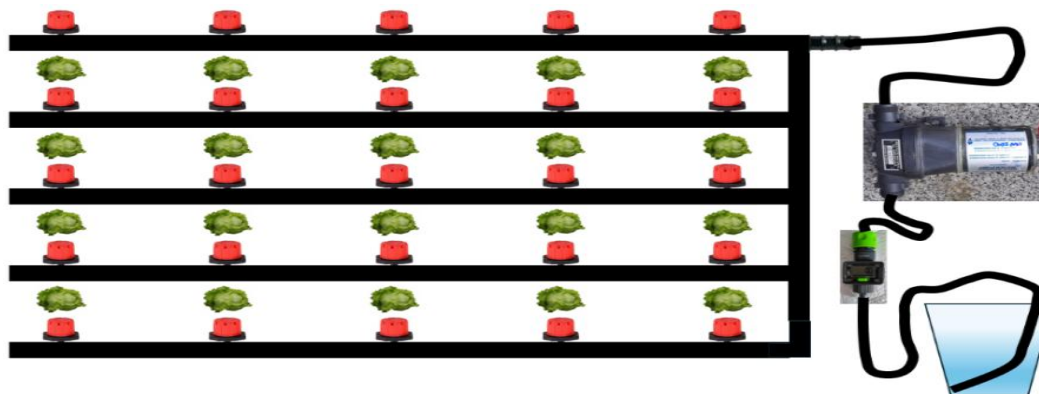
Tabla 8

Datos obtenidos de sensores y dispositivos electrónicos durante las muestras tomadas

Datos para el análisis													
	Fecha	Hora de la muestra	Hum S1 %	Hum S2 %	% error respecto sensor humedad Profesional	Temp °C	Hum amb	Medidor de luz Lúmenes	Lux Light Meter Pro Lúmene	Cant agua L	Condición visible en el sustrato	Condición Planta	Insectos y plagas tierra/hojas
1	2/4/2025	5.30 pm	73	72		24,5	95	N.D	N.D	0	Visible húmedo	Día de trasplante	No/no
2	3/4/2025	12:00 md	70	69		33,5	49,5	47602	43581	0	Visible húmedo	Algunas decaídas	No/no
3	7/4/2025	12:00 md	75	74		32	65	26265	28175	0	Menos húmedo	Mejoria, salieron hojas nuevas en el centro	No/no
4	8/4/2025	12:00 md	71	74		33,6	47	36068	36443	0	Igual al día anterior	Las primeras hojas se caen, hojas nuevas ok	No/no
5	9/4/2025	12:00 md	73	72		31,1	58	32940	31404	0	Igual al día anterior	Las primeras hojas se caen, hojas nuevas ok	No/no
6	9/4/2025	2:30 p. m.	75	74		24,8	95	14829	14200	3,8	Igual al día anterior	Las primeras hojas se caen, hojas nuevas ok	No/no
7	10/4/2025	12:00 md	81	79		28	51	22407	22048	3,8	Más húmedo	Se nota el crecimiento de las hojas	No/no
8	21/4/2025	12:00 md	75	73		29	55	23409	23290	3,8	Muy húmedo	Crecen hojas con manchas en las puntas	Si, áfidos o pulgones en hojas
9	23/1/1900	12:00 md	64	62		29	41	20431	20138	0	Menos húmedo	No tan firmes	Si, áfidos o pulgones en hojas
10	24/4/2025	5:07 a. m.	63	62		20,3	48	N.D	N.D	3,6	N.D	N.D	N.D
11	24/4/2025	12:00 md	55	64		31,4		22409	22446	0	Igual al día anterior	Hojas muy grandes un poco caldas	No/no
12	25/4/2025	9:00 a. m.	54	69		32,6	42	N.D	N.D	0	Igual al día anterior	Hojas firmes	No/no
13	25/4/2025	12:00 md	53	70		33	40	27736	27175	0	Se empieza a secar	Hojas más firmes. Se ajustó temp apertura y cierre techo + luz. Comienzan a recibir más luz.	No/no
14	28/4/2025	5:50 a. m.	39	69		21,7	53	N.D	N.D	3,5	N.D	N.D	N.D
15	28/4/2025	12:00 md	43	70		32,2	37	245590	234323	0	Menos húmedo	Hojas mucho más firmes	Aparecieron pocos en plantas con más humedad
16	30/4/2025	#####	35	66		32	35	240315	241210	7	Más seco que antes	Hojas caídas por falta de agua	No/no
17	30/4/2025	2:00 p. m.	68	78		31	40	66515	63579	0	Visiblemente húmedo	Hojas muy grandes firmes y casi sin manchas	No/no
18	2/5/2025	1:00 p. m.	50	71		24	64,5	4000	4107	0	Visiblemente húmedo	Hojas grandes y buscan cerrarse	Algunos áfidos en hojas cercanas al S2
19	4/5/2025	9:00 a. m.	35	69		30	42	N.D	N.D	7,1	N.D	N.D	N.D
20	5/5/2025	2:00 p. m.	49	72		31,6	32	49313	48077	7,1	Visiblemente húmedo	Hojas se enrollan hacia el centro	No/no
21	12/5/2025	2:40 p. m.	43	83		25,9	64	2799	2626	7,1	Visiblemente húmedo	Se cosecharon 7 lechugas	No/no
22	14/5/2025	2:30 p. m.	38	81		28,6	41,5	22618	21983	0	Visiblemente húmedo	Se cosecharon 2 lechugas	Pocos cerca de sensor 2
23	15/5/2025	1:45 p. m.	40	75		32	36	33981	34590	0	Se comienza a secar	Se cosecharon las últimas, sabor dulce	Pocos cerca de sensor 2

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Por otra parte, con respecto al sistema de riego evidenciado en la figura 14, se determinó que trabajó perfectamente sin mostrar indicios de alguna obstrucción en los goteros. La cantidad de agua aplicada en cada riego se midió utilizando el medidor de caudal, el cual se configuró para que guardara la última cantidad aplicada. Sin embargo, dentro de las opciones de este medidor, se pudo configurar también para que registre la cantidad de agua aplicada durante una cosecha completa.

Figura 14*Diseño y componentes del sistema de riego*

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación, se analizaron los principales conceptos y las definiciones relacionadas con dos disciplinas que convergen con el propósito de mejorar los procesos agrícolas. La integración de la tecnología en los cultivos ha demostrado ser una herramienta muy importante que mejora y optimiza el uso de recursos y de la producción. A partir de los resultados obtenidos, se pueden identificar diversas conclusiones que reflejan el impacto y la viabilidad del sistema propuesto.

En ese sentido, se logra evidenciar la importancia de una constante actualización de conocimientos en vistas de que, cada día, la tecnología avanza y se requieren nuevas habilidades y destrezas por parte de los profesionales, sobre todo en el ámbito de la ingeniería. En ocasiones, no solo se requiere de una actualización en la especialidad como tal, sino también supone una expansión hacia otras áreas.

Por ende, se concluye que el análisis de datos por medio de la plataforma IoT ThingSpeak es una herramienta muy útil que puede facilitar y permitir la toma de decisiones de un invernadero por medio de los datos recibidos, en este caso, del microcontrolador ESP32. Además, la función de poder visualizar, de manera gráfica, por medio de la interfaz ofrecida por la aplicación facilita en gran medida la comprensión de la información.

Si bien es cierto, la opción de un invernadero totalmente cerrado es una muy buena opción para aislar el cultivo y disminuir las posibilidades de padecer enfermedades por causa de insectos, queda demostrado, a partir de los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, que la técnica de propiciar la recirculación del aire dejando dos lados del invernadero abiertos es totalmente factible y funcional. Ello porque permite ahorrar en los costos de inversión inicial de la implementación de un invernadero para lechugas.

Para las características obtenidas de la lechuga, se realizó solo una aplicación de fertilizante granulado 15 días antes del trasplante de las lechugas, el cual se mezcló uniformemente moviendo el sustrato. Durante el periodo del ciclo del cultivo, no se volvió a aplicar fertilizante y no hubo necesidad de aplicar ningún insecticida, pues, cuando apareció algún insecto, su proliferación se pudo controlar de manera natural.

Se logró concluir, durante el periodo de observación, que, aunque la cama de cultivo expuesta a la luz solar directa durante todo el día sufría de estrés térmico en las horas con mayor temperatura, la afectación no fue crítica. Después de un tiempo, las lechugas se repusieron y recobraron la firmeza en las hojas.

Por consiguiente, queda demostrado que el uso de tecnología en la agricultura es de suma importancia para promover prácticas modernas que optimizan la utilización del recurso hídrico en las labores agrícolas. En forma adicional, contribuye con el uso sostenible y razonable de los recursos naturales, aumentando los márgenes de ganancias en la producción en comparación con los obtenidos por medio del método tradicional de siembra en terreno abierto.

5.2 Recomendaciones

La distancia de siembra entre lechugas se recomienda que debe ser al menos de 25 cm como mínimo. En este proyecto, se realizó la siembra cada 20 cm, sin embargo, el inesperado y gran crecimiento de las plantas ocasionó que las hojas se enredaran entre sí cuando comenzaron a ponerse más firmes y empezaron a enrollarse para tomar su forma final. De esta manera, también se logra dejar un pequeño espacio de sustrato visible entre lechugas por si se necesitara aplicar abono.

Se recomienda tratar el sustrato al menos una semana antes de trasplantar las lechugas, aplicando abono y mezclándolo con el sustrato para propiciar una buena distribución de los minerales. Si bien es cierto el abono se puede aplicar una vez que las plantas tengan al menos 15 días de trasplantadas, esta técnica puede quemar algunas hojas si no se aplica a una distancia correcta. Por tanto, para prevenir alguna afectación de este tipo, se recomienda proceder de esa manera.

Se recomienda realizar la instalación del gabinete para el sistema de control electrónico a una altura no menos de 140 cm del suelo, ya que esto facilita las labores relacionadas con la instalación, configuración y el mantenimiento de los componentes electrónicos. Además, se debe contemplar una pequeña mesa o plataforma a un lado del gabinete principal ubicada a unos 20 cm por debajo del mismo de al menos 45cm x 35 cm. Esto permite poder colocar herramienta durante la instalación del equipo o cuando se realice algún ajuste al ESP32 y se requiera cargar el código al microcontrolador.

Los sensores de humedad se deben proteger para que la parte electrónica no sufra daños. Por lo tanto, se recomienda que la mejor manera de hacerlo es mediante un material epóxico antes de cubrir esa parte del sensor con alguna tapa o cobertor de plástico, lo cual, aunque tenga una función estética, no garantiza la misma hermeticidad. De igual manera, se recomienda con los empalmes de los cables de los sensores.

En relación con el trasplante de las lechugas, se recomienda hacer el hueco considerando que la planta debe quedar con una parte del tallo bajo tierra con el propósito de que, al crecer la lechuga, se sujete bien del sustrato y no tenga problemas durante el

desarrollo. Si esto no se hace, se corre el riesgo de que algunas plantas detengan su crecimiento prematuramente debido al peso y al poco agarre de las raíces.

Con el fin de ahorrar la cantidad de “*emails alerts*” disponibles ofrecidos por la plataforma ThingSpeak en la licencia gratuita, se debe considerar maximizar el uso de ellos. Para esto, se recomienda enviar un solo mensaje de alerta, ya sea cuando la bomba se activa o cuando la bomba se desactiva. Esto permite enviar una cantidad menor de mensajes relacionados con este evento, los cuales, si se suman junto con otras posibles alertas, implican una optimización de mensajes importante.

Con el propósito de ahorrar datos móviles, se recomienda realizar el monitoreo de las variables del invernadero por medio de la aplicación ThingSpeak y no utilizando la interfaz web, debido a que, al conectar otro teléfono a la red creada por medio del celular que funciona como enrutador, se incrementa el consumo de datos, ya que este puede realizar funciones en segundo plano que necesitan una conexión a internet.

Se recomienda no escatimar esfuerzos ni recursos en la implementación de una malla de sombreado, la cual, como mínimo, cuente con un mecanismo manual para combatir la afectación debido a las altas temperaturas durante el día. Esto contribuye con el ahorro de recurso hídrico y se alinea con las nuevas tendencias que promueven la mejora en la utilización de los recursos naturales en las actividades agrícolas.

Es recomendable enviar datos al menos cada 20 segundos para tener una visualización y actualización más en tiempo real de la información, ya que esto aumentará lo mucho en \$1 000 la factura de datos móviles sin que exceda el límite anual de mensajes para la licencia gratuita y respetando siempre la frecuencia de envío de datos establecida por ThingSpeak.

Capítulo VI. Propuesta

6.1 Introducción

Luego de haber analizado los resultados obtenidos y experimentado sobre las necesidades del cultivo de lechuga en el Centro Nacional Especializado en Electrónica del INA Heredia, en este capítulo, se plantea una propuesta concreta que busca ofrecer una solución práctica y accesible para producir lechugas utilizando la menor cantidad de agroquímicos y de recurso hídrico posible mediante el uso de componentes electrónicos.

De esta manera, la propuesta consiste en el diseño electrónico para un invernadero con tecnología de bajo costo, el cual integra sensores electrónicos para monitorear las condiciones del ambiente y del sustrato. A partir de esos datos, es posible controlar y regular factores claves como temperatura, luz y cantidad de agua utilizada en la siembra.

El objetivo es crear un sistema funcional, sencillo de implementar y adaptable a las condiciones reales de diferentes lugares y plantas, que no solo facilite el cultivo, sino que también sirva como herramienta para disminuir el consumo de agua y aumentar el margen de ganancia de la producción.

La propuesta busca resolver el tema de la disminución de los costos de producción y recurso hídrico en el cultivo de lechuga por medio del método de siembra en invernadero utilizando tecnología de bajo costo.

6.2 Diseño del sistema electrónico básico experimental

A continuación, se describen los elementos que conforman el diseño experimental, su funcionamiento, los componentes electrónicos utilizados y las posibles formas de implementación. Esta propuesta nace del deseo de aplicar el conocimiento adquirido durante el proceso de investigación para generar un impacto positivo en las labores agrícolas locales.

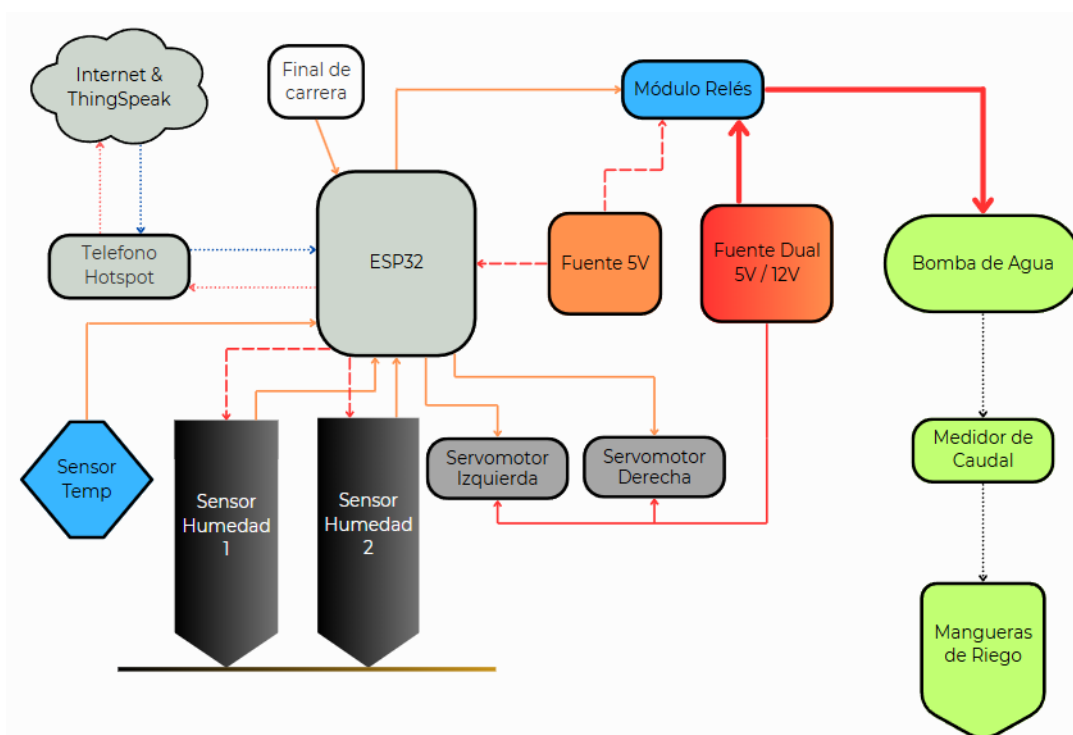
En la etapa inicial del proyecto, se trabajó con un diseño básico utilizado principalmente para pruebas de funcionamiento, recolección de datos y validación del

comportamiento de los sensores y actuadores, así como el desarrollo de las plantas. Este diseño sirvió como punto de partida para verificar la viabilidad técnica de la conectividad, control y monitoreo utilizando el microcontrolador ESP32 en un ambiente real y expuesto a factores medioambientales propios de las condiciones en las áreas de producción.

En este primer diseño, se propone la instalación de dos sensores de humedad SEN0193 en el sustrato, un sensor de temperatura y humedad relativa DHT11 como un solo elemento, dos servomotores de rotación continua MG996 para la apertura y cierre de la malla de sombreado, un módulo de relés de cuatro canales compatible con Arduino encargado de la activación de la bomba, el ESP32, un interruptor de final de carrera que le informa el estado del techo al microcontrolador, y un teléfono configurado como *hotspot* o *router* con el cual se envían los datos a ThingSpeak. La figura 15 muestra el diagrama eléctrico de conexiones del sistema electrónico experimental:

Figura 15

Diagrama eléctrico del diseño experimental del invernadero



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

6.3 Diseño ampliado para aplicación en invernadero grande

A partir de los resultados obtenidos y con base en las condiciones reales del invernadero del INA, se elaboró una versión ampliada del sistema, la cual considera un espacio mayor, más puntos de medición y un sistema de riego más robusto. También se incorporan mejoras en la distribución del cableado, el uso de canales múltiples de relés y una bomba de mayor capacidad.

Esta evolución demuestra que el sistema no solo funciona en pequeña escala, sino que puede adaptarse con facilidad a un entorno más amplio, manteniendo un bajo costo relativo y ofreciendo mayor control ambiental sobre el cultivo. Esto supone que existen mejoras y se deben realizar algunas adaptaciones que consideren las cargas y los elementos de potencia agregados al sistema, como las siguientes:

- A. Se integran diez sensores de humedad distribuidos estratégicamente en cada una de las camas de cultivo con el propósito de evaluar la condición del suelo en cada una de ellas.
- B. A diferencia del diseño inicial, esta versión incluye un guardamotor y un contactor conectados a 120 V, lo cual permite controlar una bomba de agua de mayor potencia con protección adecuada contra sobrecargas. Por tanto, convierte el sistema eléctrico a un nivel industrial.
- C. La bomba de agua se activa únicamente cuando al menos uno de los sensores detecta un nivel de humedad por debajo del límite establecido. El uso de un contactor y de un guardamotor garantiza un funcionamiento más seguro y profesional en ambientes agrícolas exigentes, lo cual añade seguridad al sistema.
- D. Al igual que en la versión anterior, los datos son enviados a la plataforma ThingSpeak por medio de un teléfono utilizado como *router*, donde se almacenan y se pueden visualizar remotamente, lo cual permite realizar un seguimiento de los datos en tiempo real.

De este modo, el sistema ampliado está compuesto por un ESP32 como unidad central que se encargará de recibir los datos de humedad relativa y temperatura de un

sensor DHT11. Además, este microcontrolador central es el encargado de controlar la activación de la bomba y de enviar los datos a la plataforma *IoT* ThingSpeak. El sistema también contempla dos ESP32 adicionales en donde cada uno recibirá la información de humedad del suelo de cinco sensores SEN0193 correspondientes a cinco camas de cultivo, para posteriormente enviar los datos al ESP32 central.

La comunicación entre microcontroladores se realiza por medio del protocolo de comunicación inalámbrica ESP-NOW creado por Espressif, el cual no requiere de una red WiFi (Gómez y Herrera, 2022).

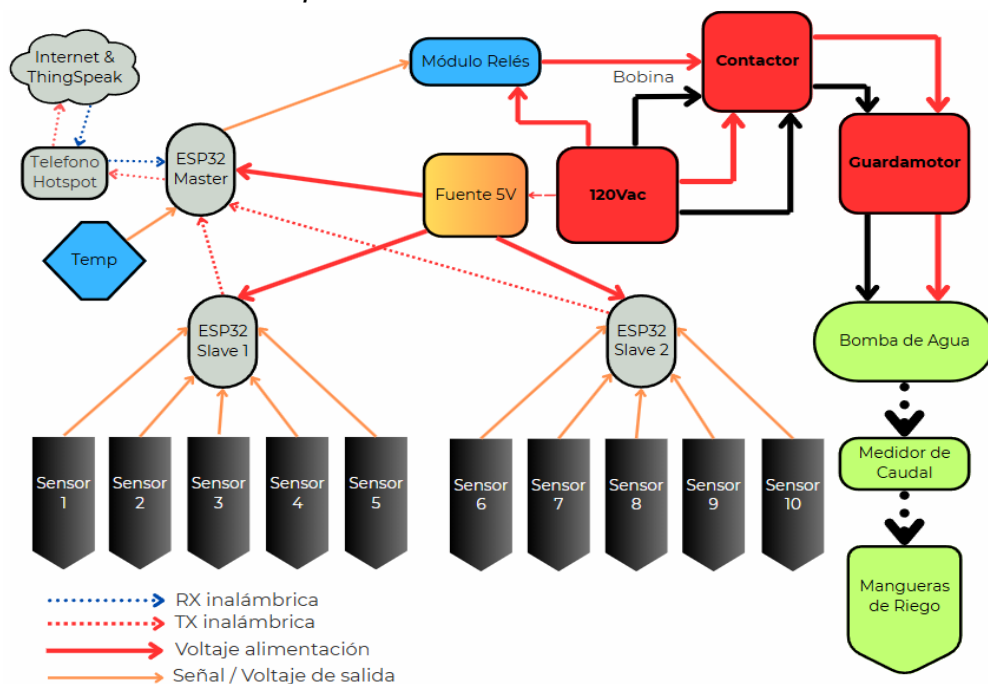
Por otra parte, el sistema cuenta con un módulo de relés compatible con Arduino que se encarga de activar la bobina del contactor de potencia y dispone de un guardamotor para proteger la bomba de agua y un medidor de caudal de agua, el cual se puede configurar para que registre la cantidad de agua aplicada en cada riego o la cantidad de agua utilizada durante toda la cosecha. Por último, el sistema posee un teléfono *router* que permite la conexión a internet necesaria para el envío de los datos a la aplicación en la nube.

En esta propuesta de diseño, no se contemplan los servomotores debido a que, en la práctica, se puede recurrir a la elaboración de un sistema de sombreado manual que reduce los costos. Sin embargo, tal y como se señaló en capítulos anteriores y de acuerdo con los resultados obtenidos durante la experimentación, a pesar de que las plantas sufran un poco de estrés térmico, no es indicativo de que vayan a morir. Por consiguiente, no se toma en cuenta esta parte eléctrica.

El diagrama eléctrico de la figura 16 demuestra que la solución propuesta no se limita a un experimento, sino que puede adaptarse a escenarios reales, incluso en espacios amplios y con requerimientos más exigentes. Se mantiene el principio de utilizar tecnología de bajo costo, accesible y programable, pero se escalan sus capacidades para ofrecer un control del recurso hídrico mucho más completo y confiable.

Figura 16

Diagrama eléctrico del diseño para invernadero de 175 m²

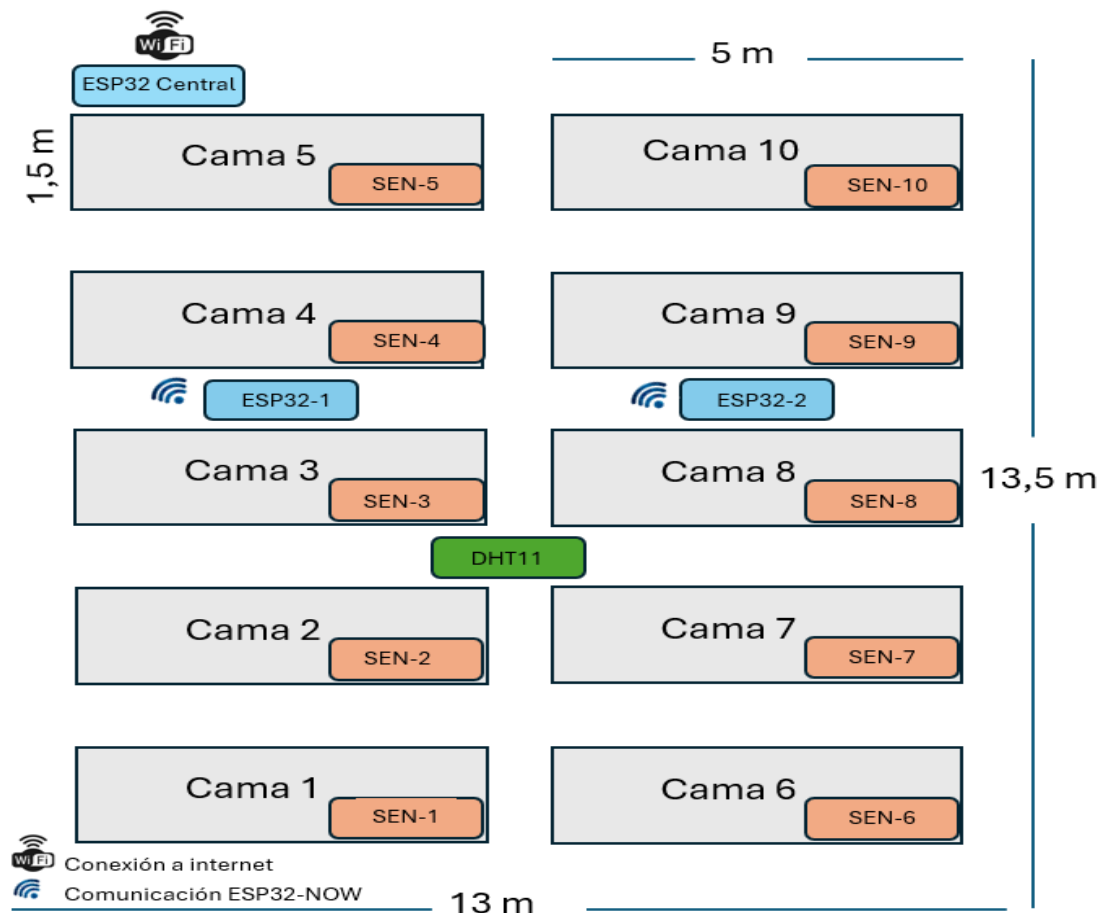


Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Este sistema se propone para un invernadero de 175 m² con 10 camas de cultivo, cuyas dimensiones son de 1.5 m x 5 m. Se contempla dejar 1 metro de distancia entre camas de cultivo y las paredes del invernadero con el propósito de poder acceder a las lechugas y permitir la movilización dentro de este. Esta distribución se aprecia en la figura 17, donde, además, se muestra la ubicación de los sensores y los tipos de conexión inalámbrica empleados.

Figura 17

Distribución de las camas de cultivo dentro del Invernadero



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

De esta manera, un aspecto fundamental de esta propuesta de diseño es comprobar si el sistema es rentable desde el punto de vista económico. Es decir, no solo si funciona técnicamente, sino que también represente una inversión que se pueda recuperar en un tiempo razonable o, mejor aún, que genere ganancias. En este caso, el costo total estimado para implementar el sistema electrónico incluyendo los componentes de la tabla 9 es de aproximadamente ₡526 000 al 05 de junio de 2025.

Tabla 9

Costo del equipo y materiales invernadero de 175 m²

Equipo / Material	Cantidad	Preco Unitario	Costo Total	Proveedor
Bomba de agua 1HP 60LPM	1	₡ 122 000,00	₡ 122 000	PumpStop Online
Guardamotor	1	₡ 71 043,00	₡ 71 043	Capris
Contactador	1	₡ 102 801,00	₡ 102 801	IESA
Modulo de relé 4 canales	2	₡ 3 600,00	₡ 7 200	CRCibernética
Placa c/terminales de tornillo para ESP32	1	₡ 7 600,00	₡ 7 600	CRCibernética
ESP32	3	₡ 7 290,00	₡ 21 870	CRCibernética
Sensor de temperatura	2	₡ 3 500,00	₡ 7 000	CRCibernética
Medidor de caudal	1	₡ 10 500,00	₡ 10 500	Importado
Sensores de humedad	11	₡ 3 500,00	₡ 38 500	CRCibernética
Tablero p/ riel din	1	₡ 66 715,00	₡ 66 715	ELK
Regleta 120Vac c/ 4 puertos USB y WiFi	1	₡ 17 650,00	₡ 17 650	Ferretería EPA
Riel din 2m	1	₡ 4 321,00	₡ 4 321	ELK
Portafusible	1	₡ 8 500,00	₡ 8 500	Elvatron
Borne 1 circuito	30	₡ 500,00	₡ 15 000	Elvatron
Borne tierra	2	₡ 2 100,00	₡ 4 200	Elvatron
Canaleta ranurada 2m	1	₡ 8 200,00	₡ 8 200	El Mauro
Cable THHN AWG 14 Azul	10	₡ 240,00	₡ 2 400	Ferretería Novex
Cable THHN AWG 14 Verde	10	₡ 240,00	₡ 2 400	Ferretería Novex
Cable THHN AWG 14 Blanco	10	₡ 240,00	₡ 2 400	Ferretería Novex
Cable THHN AWG 10	10	₡ 575,00	₡ 5 750	Ferretería Novex
		Total	₡ 526 050	

Nota: no se contempla el costo del sistema de riego

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

De esta manera, tomando en cuenta las dimensiones del invernadero, se estima que, en una cosecha de lechuga que tarda aproximadamente 45 días, se puede obtener una ganancia neta aproximada de ₡290 000, considerando una cosecha de 1 200 lechugas a un precio de venta de ₡300. Las dimensiones de las camas de cultivo son de 1.5 m x 5 m y la separación entre lechugas es de 0.25 m, lo cual permite una siembra de 120 lechugas por cada cama de cultivo. En cuanto a los costos de producción, se considera únicamente la cantidad de agua utilizada y una fórmula madre de 100 L, tal y como se muestra en la tabla 10:

Tabla 10

Proyección de ganancia de una cosecha de lechugas con 10 camas de cultivo

	Insumo	Cantidad	Precio Unitario	Total por insumo
1	Agua m^3	11	₡ 1 260	₡ 15 860
2	Fórmula madre 100L	1	₡ 53 832	₡ 53 832
			Total por cosecha	₡ 69 692

Dimensiones de cada cama de cultivo en m	1,5 x 5
Cantidad de camas de cultivo	10
Distancia de siembra entre lechugas m	0,25
Cantidad de lechugas por cama	120
Cantidad total de lechugas	1200
Area de siembra	75 m^2
Precio de venta lechuga	₡ 300
Ganancia bruta	₡ 360 000
Ganancia neta	₡ 290 308

Nota: No incluye costos del sustrato. Precio unitario del Agua + 2000 cargo fijo AyA

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo (2025)

Por lo tanto, según Cuevas Villegas (2001), si se divide el ingreso generado entre los recursos utilizados con los que se obtuvieron esos ingresos, se puede calcular el retorno sobre la inversión (ROI), el cual, en este caso, corresponde a un 55.13%. Esto implica que se puede suponer una ganancia aproximada de ₡551 por cada ₡1 000 invertidos en un periodo de 45 días. Ahora bien, el tiempo de recuperación de la inversión (*Payback*), de acuerdo con Stelling, et al. (2018), se calcula dividiendo la inversión inicial entre el flujo de efectivo en un periodo determinado. Por lo tanto, se obtiene un tiempo de recuperación de 1.81 periodos, que, en este caso, es de aproximadamente 90 días o lo que es lo mismo: dos cosechas de lechuga.

A partir de ese momento, cada nueva cosecha representa una ganancia limpia, lo cual confirma que el diseño propuesto no solo es útil y funcional, sino también sostenible

y rentable. Esto lo convierte en una excelente opción para pequeños agricultores que deseen mejorar sus cultivos con tecnología accesible y de bajo costo, y, sobre todo, dando un gran salto en el uso de nuevas técnicas agrícolas que realmente generan un uso sostenible de los recursos naturales.

Por último, en la ecuación 2, se muestra cómo se obtuvo el retorno sobre la inversión, mientras en la ecuación 3, el cálculo del tiempo de recuperación de la inversión para el invernadero con 10 camas de cultivo:

[2]

$$ROI = \frac{\text{Ingreso Generado}}{\text{Recursos Utilizados}} = \frac{290000}{526000} = 0.55 \times 100 = 55.13\%$$

[3]

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujo de efectivo en una cosecha}} = \frac{526000}{290000} = 1.81 \text{ cosechas}$$

Referencias bibliográficas

- Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications. *Sensors*, 25(2), 343.
<https://doi.org/10.3390/s25020343>
- Aguayo, P. (10 de noviembre, 2004). *Introducción al microcontrolador*. Academia.edu.
<https://www.academia.edu/17264316/Micro>
- Allen, R. C. (2004). Revolución en los campos: la reinterpretación de la revolución agrícola inglesa. *Prensas Universitarias de Zaragoza*.
- Álvarez Carulla, A. (2021). *Comunicación de un módulo ESP32 con Ubidots mediante MQTT*. [Trabajo final de grado, Universitat de Barcelona]. Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona. <https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/181905>
- AMD. (s.f.) *AMD Ryzen™ 9 7950X3D Specifications*.
<https://www.amd.com/es/products/processors/desktops/ryzen/7000-series/amd-ryzen-9-7950x3d.html>
- Ángeles Ángeles, F. (2019). Sensor. *Con-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria* No. 3, 6(12), 21-22.
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/article/view/4219/6080>
- Arias, N. M. M., Rangel, M. D. C. N., López, I. C. P., Sánchez, E. C. y De la Cruz, J. M. (2018). El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo? *CIENCIA Ergo-sum*, 25(3). 391-405.
<https://www.redalyc.org/journal/104/10455646009/10455646009.pdf>

Ayala, F. (2024). ESP32 y su evolución. *UNIT Electronics*.

<https://uelectronics.com/esp32-y-su-evolucion/>

Banana Pi Team (s.f.) About Banana Pi. <https://uelectronics.com/esp32-y-su-evolucion/>

Barrera Guzmán, L. Á. (2022). Contexto histórico de la agronomía en México. *Nextia*, (14), 24-35. <https://revistas.uvp.mx/index.php/nextia/article/view/178>

Ben Salem, S. y Maldonado Kranwinkel, A. (2016). Complejidad y educación: una reflexión sobre el pensamiento de Edgar Morín. *Pesquisas: Revista de estudios científicos*, (1), 30–42.

<https://www.pucmm.edu.do/publicaciones/Documents/revista-pesquisas/Revista-Pesquisas.pdf>

Bermúdez Padilla, R. E., Álvarez Cárdenas, O., Mayoral Baldivia, M. G., Aquino Santos, R. T., Pech May, F. y Prieto Meléndez, R. (2022). Prototipo de un Sistema IoT para el monitoreo de la calidad del aire en exteriores en el Puerto de Manzanillo. *Difu100ci@, Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías*, 16(3), 110-117.

<http://difu100cia.uaz.edu.mx/index.php/difuciencia/article/view/336>

Berrios Gómez, S. (2022). *Diseño de un sistema IoT para el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero* (Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica).

Bistu, M., Mukherjee, S., Mitra, S., Malakar, T. D., & Ghosh, A. (2023). Node MCU based room ambient along with patient monitoring system. *European Chemical Bulletin*, 12(Special Issue 1, Part B), 3793–3800.

https://www.researchgate.net/publication/372067179_Node_MCU_Based_Room_Ambient_along_with_Patient_Monitoring_System

- Borja Vivero, J. y Valdivia Álvarez, R. (2015). *Introducción a la agronomía*. Ediciones Médicas CIEZT.
- Boza Díaz, G. (2015). *Modelado de microcontroladores Arduino en C++ orientado a la simulación de sistemas multidominio* (Tesis de licenciatura, Universidad de Cantabria, Cantabria, España).
- Burítica Fernández, M. y Londoño Aristizábal, N. (2022). *Inversiones en agricultura regenerativa* (Tesis de maestría, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia). <https://repository.eafit.edu.co/bitstreams/e1402502-67d4-47af-9ad6-3c446e3fd81e/download>
- Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña (2017). *Informe final: impacto económico, social y ambiental de la piña en Costa Rica*. <https://canapep.com/wp-content/uploads/2024/05/Informe-Final-CANAPEP.pdf>
- Carbajal Tapullima, M. (2023). *Caracterización de la agricultura tradicional en la provincia de Lamas, región San Martín* (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú). Repositorio Institucional UNSM. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/5930>
- Carguachi Gamboy, L. I., León Ruiz, J. E. y Suárez Tapia, A. L. (2022). *Evaluación del rendimiento de lechuga cresspa (Lactuca sativa L.) var. Batavia, en dos tipos de invernaderos, parroquia Calpi, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo* (Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador). <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17454>
- Gracia Cervantes, X. L. (2020). La ingeniería electrónica del siglo XXI. *Polo del Conocimiento: Revista Científico-profesional*, 5(12), 488–501. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2071>

- Chandi, C. X. R., & Orellana, C. F. V. (2018). Metodología para evaluación de usabilidad del entorno de desarrollo integrado de Arduino. *SATHIRI: Sembrador*, 13(1), 214–226. <https://doi.org/10.32645/13906925.514>
- Cuevas Villegas, C. F. (2001). Medición del desempeño: retorno sobre inversión, ROI; ingreso residual, IR; valor económico agregado, EVA; análisis comparado. *Estudios Gerenciales*, 17(79), 13–22. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21207901>
- Del Valle Hernández, L. (2019). *Escoger el mejor sensor de temperatura para Arduino*. Programar Fácil. <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/SensoresTemArdui.pdf>
- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (DESA) (2019). *World Population Prospects 2019*. Naciones Unidas. <https://n9.cl/5xpwp>
- DFRobot. (2017). *Capacitive Soil Moisture Sensor SKU:SEN0193*. https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/SEN0193_Web.pdf
- Duarte, P., Mariño, S. I. y Alfonzo, P. L. (2015). Evaluación de la accesibilidad en software generado por un entorno de desarrollo integrado. *Técnica Administrativa*, 14(61), 2–10. <https://www.cyta.com.ar/ta/article.php?id=140102>
- Duffy, P. (2022). *El movimiento de cercamiento y las revoluciones agrícola e industrial*. Mises Institute. <https://mises.org/es/mises-wire/el-movimiento-de-cercamiento-y-las-revoluciones-agricola-e-industrial>

- Earl, B. (2024). *Adafruit Motor Selection Guide: Servos de rotación continua*. Adafruit Industries. <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-motor-selection-guide.pdf>
- Echeverri, J. Á. (2009). Pueblos indígenas y cambio climático: el caso de la Amazonía colombiana. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 38(1), 13-28.
- Equipo Editorial Etecé (24 de octubre, 2024). Agronomía. *Enciclopedia Concepto*. <https://concepto.de/agronomia/>
- Esperidião, H. (s.f.) *Microcontroladores ESP32*. <http://helioesperidiao.com/2024/microcontroladores/01x02.pdf>
- Espressif Systems. (2023). *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- Espressif Systems (2024a). *ESP32-WROOM-32E ESP32-WROOM-32UE Datasheet*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf
- Espressif Systems (2024b). *Technical Reference Manual*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf#iomuxgpio
- Espressif Systems (2025). *ESP32 series datasheet*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Fabian, P. O., de la Rosa, Y. L. y Rueda, V. L. V. (2023). Método didáctico para medir valores de irradiancia de rayos ópticos. *Journal of Engineering Research*, 3(12). Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas - IPN.

[https://www.academia.edu/101290396/M%C3%89TODO_DIDACTICO_PARA_M
EDIR_VALORES_DE_IRRADIANCIA_DE_RAYOS_%C3%93PTICOS_Atena_Ed
itora](https://www.academia.edu/101290396/M%C3%89TODO_DIDACTICO_PARA_M
EDIR_VALORES_DE_IRRADIANCIA_DE_RAYOS_%C3%93PTICOS_Atena_Ed
itora)

Fernández Acevedo, V. (2023). *Cilantro (Coriandrum sativum L.) como atrayente de enemigos naturales de áfidos en cultivo de lechuga (Lactuca sativa L.) en invernadero* (Tesis doctoral no publicada). Universidad Nacional de La Plata.

French, J., Montiel, K. y Palmieri Reymond, V. (2014). *La innovación en la agricultura: un proceso clave para el desarrollo sostenible*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Galindo, L. M., Hoffmann, B. y Vogt Schilb, A. (2022). *¿Cuánto costará lograr los objetivos del cambio climático en América Latina y el Caribe?* (Documentos de trabajo No. IDB-WP-1427). Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://doi.org/10.18235/0004566>

García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. *Revista Ciencia y Tecnología*, 8(12), 99–116.
<https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>

García Domínguez, J., Azuara Jiménez, J. A., Aranzolo Sánchez, A. P. y Ángeles, E. C. (2021). Medición y adquisición de datos para una estación meteorológica alimentada con energía solar. *RINDERESU*, 5(2).

Garciglia, R. S. (2014). Deforestación. *Saber Más: Revista de Divulgación de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, (14), 31-32.

Garrabou, R. (1994). Revolución o revoluciones agrarias en el siglo XIX: su difusión en el mundo mediterráneo. *Agriculturas mediterráneas y mundo campesino. Cambios históricos y retos actuales*, Almería, Diputación de Almería, 95-109.

- Garzón, S. S. (2006). *Evaluación del rendimiento de tres variedades de lechuga bajo el sistema NFT (Nutrient Film Technique) de hidroponía con dos soluciones de nutrientes* (Tesis doctoral, Escuela Agrícola Panamericana).
- Gastezzi Arias, P., Alvarado García, V. y Pérez Gómez, G. (2017). La importancia de los ríos como corredores interurbanos. *Biocenosis*, 31(1-2).
<https://www.sidalc.net/search/Record/oai:revistas.investiga.uned.ac.cr:article1725/Description>
- Gay, W. (2018). DHT11 sensor. *Advanced Raspberry Pi: Raspbian Linux and GPIO Integration*, 399-418.
- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Catie.
- Gómez, S. B. y Herrera, H. J. R. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0. *Ingeniería Investiga*, 4(1), 1–12.
<https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/view/624>
- Gonzalez Ortiz, C. F. (2020). *Evaluación de un nuevo sensor de humedad de suelo inalámbrico de bajo costo* (Tesis doctoral, Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ciencias Agrarias.
- Graemiger Muñoz, M. S. y San Segundo, C. G. (2016). *Acción antialimentaria de derivados de sustancias naturales contra Spodoptera frugiperda* (Tesis doctoral, Universidad Católica de Córdoba).
https://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/1346/1/TF_Graemiger_SanSegundo.pdf

- Hernández, R. R. (2021). La agricultura de precisión. Una necesidad actual. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1), 67-74.
<https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368010/586269368010.pdf>
- Igea, M. A. y Zamarreño, C. R. (2021). Desarrollo de sistemas basados en un microcontrolador PIC (Tesis doctoral, Universidad Pública de Navarra).
<https://academica-e.unavarra.es/server/api/core/bitstreams/59c734d8-8204-4329-b3f3-464c8715d7c8/content>
- Ikiss, J. (2020). *Sistema de adquisición de datos con ESP32* (Tesis de licenciatura, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Infobae (15 de noviembre, 2011). *El microprocesador cumplió 40 años de historia*. <https://www.infobae.com/2011/11/15/617101-el-microprocesador-cumplio-40-anos-historia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2021). *Costa Rica en cifras 2021*.
https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-09/recostaricaencifras2021_0.pdf
- Intel (s.f.) *Intel® Core™ i9-13900KS Processor (36M Cache, up to 6.00 GHz) Specifications*. <https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/sku/232167/intel-core-i913900ks-processor-36m-cache-up-to-6-00-ghz/specifications.html>
- Isaac (14 de noviembre, 2024). *Cómo funcionan los convertidores ADC y DAC: todo lo que necesitas saber*. https://www.hwlibre.com/como-funcionan-los-convertidores-adc-y-dac-todo-lo-que-necesitas-saber/#google_vignette
- Jacto Agricultura e Manejo (2023). *¿Cuál es el costo de un invernadero agrícola?*
<https://bloglatam.jacto.com/precio-de-invernaderos-agricolas/>

Leiva, F. R. (2003, Julio). La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. In *Memorias VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos* (Vol. 93, pp. 997-1006).

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/70186807/La_agricultura_de_precisin_una_produccion20210923-13494-1ssol44.pdf?1738427162=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLa_agricultura_de_precision_una_produccion20210923-13494-1ssol44.pdf&Expires=1753752177&Signature=XyirA9P9DRrvXLVrToxsB5W4~Ze8q~G2j2SVqDlIiUfPYMS-KUkblab0qOxDEnjWcyEmd9fk7aa08eRWIVwOlbkEsX~Y9XYSj9MVBHU~wTQi~L2v5lTA~p0IAJ~qn49wCsiPkUYUezJHK~7z8~joq7JWXJSZw5G1qQ5MQK8LYVH~e9H-WZy8gV3WMZz7vZWKPblxJXKW5Yge0sLjS74wkxGXhz18H0l82n9k1mkuoZfc8xWMNtCAWUuQzC9c2e2dbjODpoJJyFBCUUqb9xFSfppXiNN8so5HBaEm5Dg0ULAaQoa33mcEOcng47X6qxsKIB1rt8p0Z8j16XYIHgFg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

León, F. (11 de noviembre, 2019). *Arduino o Raspberry Pi ¿Cuál usar? Diferencias*. *Dynamo Electronics*. <https://www.dynamoelectronics.com/arduino-o-raspberry-pi-cual-usar-diferencias/>

Leonardo, R. (2013). *Biofertilizantes como opción de naturación de azoteas en zonas urbanas* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_leonardo_lopez.pdf?utm_source=chatgpt.com

- Llamas, L. (2022). *Tamaños de variables en ESP32, Arduino, Raspberry Pi, Windows y Linux*. <https://www.luisllamas.es/tamanos-de-variables-en-esp32-arduino-raspberry-pi-windows-y-linux/>
- Mamani de Marchese, A. y Filippone, M. P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, 38(1), 9-21. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-369X2018000100001&lng=es&tlng=es.
- Marchionni, E. A. (2011). *Administrador de servidores* (Vol. 210). USERSHOP. https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=CfhGJ7yyIRgC&oi=fnd&pg=PA3&dq=tipos+de+servidores&ots=5K3h2S0Lq5&sig=JaCRmVcYSCjGxhW16GTH6q58Hdc&redir_esc=y#v=onepage&q=tipos%20de%20servidores&f=false
- Marco Brown, O. L. y Reyes Gil, R. E. (2003). Tecnologías limpias aplicadas a la agricultura. *Interciencia*, 28(5), 252-259. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442003000500002&lng=es&tlng=es.
- Marinelli, M. y Urquijo, R. (2017). Sistema de Control de una cámara de germinación hidropónica con IoT. *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (La Plata, 2017)*. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/63881/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marote, M. L. (2010). *Agricultura de precisión* (Tesis de licenciatura, Universidad de Palermo). <https://dspace.palermo.edu/dspace/handle/10226/1373>
- Martínez Centeno, A. L. y Huerta Sobalvarro, K. K. (2018). La revolución verde. <https://revistas.unanleon.edu.ni/index.php/REBICAMCLI/article/view/204>

- Martínez Jacobson, R. (2017). *Comparativa y estudio de plataformas IoT* (Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de Catalunya).
<https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/c8515e43-41fa-4b3d-b86c-b279a4ff86c6/content>
- Medellín Solís, O. A. (2016). *Servidores en Cómputo* (Tesina, Universidad Autónoma del Estado de México). <https://core.ac.uk/download/pdf/76002196.pdf>
- Mejía Cabrera, L. (2019). *Software libre: concepto y definición de software libre, historia y evolución, características del software libre, software libre y la educación, aplicaciones*. (Monografía, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle). Lima, Perú.
<https://repositorio.une.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b56f0523-3761-4d0a-8d9b-df7bdbcf5070/content>
- Millahual, C. P. (2020). Descubriendo arduino. *RedUsers*.
[https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=bL7PDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Millahual,+C.+P.+\(2020\).+Descubriendo+arduino.+RedUsers.&ots=fIZPQB Gbdc&sig=P4J7zOuJOfHG1WsZ2ms2s6vyOcM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=bL7PDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Millahual,+C.+P.+(2020).+Descubriendo+arduino.+RedUsers.&ots=fIZPQB Gbdc&sig=P4J7zOuJOfHG1WsZ2ms2s6vyOcM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, Dirección Nacional de Extensión Agropecuaria, Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Instituto Nacional de Aprendizaje & FUNDECOOPERACIÓN para el Desarrollo Sostenible. (2024). *Manual de buenas prácticas agrícolas con enfoque de adaptación al cambio climático*.
<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-11141.pdf>

- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (2021). *Boletín del Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos*.
<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP2%2812%29.pdf>
- Molina Panchi, L. (2018). Implementación de una prótesis robótica microcontrolada, utilizando sensores MYO y Arduino (Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Israel). <http://repositorio.uisrael.edu.ec/bitstream/47000/1665/1/UISRAEL-EC-ELDT-378.242-2018-056.pdf>
- Moncada González, J. C. y González Torres, A. F. (2020). *Proyecto de integración de la electrónica (IEEE-EPICS) en procesos agrícolas en la Institución Educativa (IE) El Cruce, municipio de Tuta–Boyacá* (Tesis doctoral, Universidad Santo Tomás).
- Montero Ramírez, F. y Solórzano Quintana, M. (2020). *Estimación de las diferencias entre un sistema de riego por goteo con lámina de agua de riego fija y por lámina de agua requerida según las condiciones climáticas en función de la huella hídrica, producción, indicadores financieros y condiciones de humedad del suelo en el cultivo de lechuga en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago*. (Trabajo final de graduación, Tecnológico de Costa Rica).
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/12365>
- Morales, C. A. y Redondo, M. A. (2017). Diseño y análisis de un pwm adaptado para propósitos educativos. *#ashtag*, (9), 11-20.
<https://doi.org/10.52143/2346139X.n9.2016.508>
- Morán, R., Zabala, G. y Teragni, M. (2019). Concurrencia en Arduino: un enfoque basado en una máquina virtual. *XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación* (WICC 2019, Universidad Nacional de San Juan).
https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/77188/Documento_completo.%

[20Un%20enfoco%20basado%20en%20una%20m%C3%A1quina%20virtual.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)

Morera, J. A., (2000). Agricultura, recursos naturales, medio ambiente y desarrollo sostenible en costa rica. *Agronomía Mesoamericana*, 11(1), 179-185.
<https://www.redalyc.org/pdf/437/43711127.pdf>

Mouser Electronics (s.f.) *DHT11 Humidity & Temperature Sensor*.
<https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>

Murillo, J. (2011). *Métodos de investigación de enfoque experimental*. <https://www.academia.edu/35696751/M%C3%89TODO%20DE%20INVESTIGACI%C3%93N%20DE%20ENFOQUE%20EXPERIMENTAL> Asignatura M%C3%A9todos de investigaci%C3%B3n en Curso 3o Educaci%C3%B3n Especial

Nanjing Qinheng Microelectronics (s.f.a). *USB to High Speed Serial Port Chip CH9102*.
https://www.wch-ic.com/downloads/CH9102DS1_PDF.html

Nanjing Qinheng Microelectronics (s.f.b). *USB to Serial Port Chip CH340*.
https://www.wch-ic.com/downloads/CH340DS1_PDF.html

Nogales, L. (2020). Agave angustifolia, el de las hojas estrechas. *Mezcológia*.
<https://mezcologia.mx/agave-angustifolia/>

Novillo Vicuña, J., Rojas, D. H., Olivo, B. M., Ríos, J. M. y Villavicencio, O. C. (2018). *Arduino y el Internet de las cosas* (Vol. 45). 3Ciencias.
[https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=FIlyDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA14&dq=Novillo-Vicu%C3%B1a,+J.,+Rojas,+D.+H.,+Olivo,+B.+M.,+R%C3%ADos,+J.+M.,+%26+Villavicencio,+O.+C.+\(2018\).+Arduino+y+el+Internet+de+las+cosas+\(Vol.+45\).+3](https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=FIlyDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA14&dq=Novillo-Vicu%C3%B1a,+J.,+Rojas,+D.+H.,+Olivo,+B.+M.,+R%C3%ADos,+J.+M.,+%26+Villavicencio,+O.+C.+(2018).+Arduino+y+el+Internet+de+las+cosas+(Vol.+45).+3)

[Ciencias.&ots=xa69AUBeMr&sig=FxWMQkWWeCRq22GwpLIIBVepoN0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=Xqv2DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=entorno+de+desarrollo+integrado+ide+de+arduino&ots=vOBVHcVw3-&sig=vEmEvl6thuEiZHR1ldjWMxZA-CQ&redir_esc=y#v=onepage&q=entorno%20de%20desarrollo%20integrado%20de%20de%20arduino&f=false)

Peña, C. (2020). Arduino IDE: Domina la programación y controla la placa. RedUsers. https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=Xqv2DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=entorno+de+desarrollo+integrado+ide+de+arduino&ots=vOBVHcVw3-&sig=vEmEvl6thuEiZHR1ldjWMxZA-CQ&redir_esc=y#v=onepage&q=entorno%20de%20desarrollo%20integrado%20de%20de%20arduino&f=false

Peñahora García Sanz, M. (2011). *Iluminación en el Puesto de Trabajo. Criterios para su evaluación y acondicionamiento*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. https://www.academia.edu/30005511/ILUMINACI%C3%93N_EN_EL_PUESTO_DE_TRABAJO_CRITERIOS_PARA_SU_EVALUACI%C3%93N_Y_ACONDICIONAMIENTO_%C3%8DNDICE

Pérez Guadarrama, N. I. y Solórzano Salazar, A. (2021). *Eficiencia en la producción de lechuga hidropónica: Caso fresco cultivos hidropónicos* (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México).

Phillips, K. (2023). ¿Cuánta luz necesita la lechuga? *Garvillo*. <https://garvillo.com/es/cuanta-luz-necesita-la-lechuga/>

Piza Burgos, N., Amaiquema Márquez, F. y Beltrán Baquerizo, G. (2019). Métodos y técnicas en la investigación cualitativa. Algunas precisiones necesarias. *Conrado*, 15(70), 455-459. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442019000500455&lng=es&tlng=es.

Pole, K. (2009). Diseño de metodologías mixtas: Una revisión de las estrategias para combinar metodologías cuantitativas y cualitativas. *Renglones, Revista Arbitrada en Ciencias Sociales y Humanidades*, (60), 37–42. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO).

<https://rei.iteso.mx/server/api/core/bitstreams/ee397b99-bb24-4c3e-ba94-b9dde4563026/content>

Profesional Review (s.f.) *AMD: Historia y evolución*. Profesional

Review. <https://www.profesionalreview.com/amd/>

Quintana, S. V. Y Estrada, J. F. P. (1994). *Agricultura sostenible*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Secretaría General de Estructuras Agrarias.

https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_07.pdf

Quintero Gómez, C., Camargo Aguilar, J. P., Bustos Maldonado, J. S. y Ariza Rallón, H. (2022). *Impacto de las altas precipitaciones sobre un cultivo de lechuga crespa ubicado en la huerta del programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Santander*. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB.

https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/20836/2022_Articulo_Ariza_Rallon_Hernan.pdf?sequence=1&isAllowed=y

RainPoint (s.f.) ICS006 USER MANUAL.

https://manuals.plus/m/b46d207212eeda03bad7ce4c8961cbbdf34d3e259b2daca1de69194190fdae74_optim.pdf

Ramírez, L. G. C., Jiménez, G. S. A. y Carreño, J. M. (2014). *Sensores y actuadores*.

Grupo Editorial Patria.

<https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=wMm3BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Ram%C3%ADrez,+L.+G.+C.,+Jim%C3%A9nez,+G.+S.+A.,+%26+Carre>

[%C3%B1o,+J.+M.+\(2014\).+Sensores+y+actuadores.+Grupo+Editorial+Patria.&ots=6P6mkz77Yw&sig=3Kqp9QhOnUm5bYyOyZkk0t7xeDg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](#)

Ramos Galindo, V. (2023). *Diseño de un sistema IoT de monitorización de humedad del suelo vía aplicación móvil* (Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València).

<https://riunet.upv.es/entities/publication/c413a33a-1ca3-4bcb-af45-1faba5b1f50f>

Ramos Yáñez, S. X. (2023). *Análisis de la utilización de redes sensoriales para el uso de los cultivos de girasoles en la FACIAG* (Trabajo de grado, Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias e Ingeniería Agrícola).

<https://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/14019/E-UTB-FAFI-SIST-000430.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Real Academia Española (1791). *Diccionario de la lengua castellana: compuesto por la Real Academia Española, reducido a un tomo para su más fácil uso*. Viuda de J. Ibarra, impresora de la Real Academia.

Redacción (2014). *Odroid-U3, la nueva generación de tarjetas de desarrollo*. Fractalía Systems. <https://fractaliasystems.com/odroid-u3-la-nueva-generacion-de-tarjetas-de-desarrollo/>

Redacción (2014). *Beaglebone Black la nueva competencia de Raspberry Pi*. Fractalía Systems. <https://fractaliasystems.com/beaglebone-black-la-nueva-competencia-de-raspberry-pi/>

Remmers, G. (1993). Agricultura tradicional y agricultura ecológica: vecinos distantes. *Agricultura y Sociedad*, 66, 201-220. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_ays/a066_07.pdf

Rendón, B. M. R. y Villa, S. M. H. (2017). Aplicación de herramientas gratuitas para la medición en línea de variables electromagnéticas. *Libro de Resúmenes*, 286.

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57598030/Estado_del_arte-Teoria_de_los_cambios_de_contexto_involucrados_en_los_procesos_de_compra_p.124-126-libre.pdf?1540019722=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEstado_del_arte_Teoria_de_los_cambios_de.pdf&Expires=1753747994&Signature=ape8N0BMfzRzIxD0CBy29QaaZNotPn53eg3sZIMWFuD~cujDGrKtXdFN~7lOkCmp3~f-qoEJH6m3QGGN9wpkA-nfQ40GdZc~EbhwZpbk1ZaMg9AjEi8AGh8R8-YMxOYg6qSQGK1tvWd~fYywDgwsTXly6HlxiFoxmcle6cFlz~vBuoryWofXm3NzMilj3elBHsTBHRWDkEWuq~xuSnQ99sl1m2LY-smLRIG28gp6O7-BTZ2Z6KfVuiRCA-18XZVGy~uPmcH4CLi6s55P8iCAXg6~oDoyLdBqivgyh1p11US9L63IJSe0g7AJF5FHjD~yjo5Hq8McJR7jKuyM9~8Q_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA#page=286

Revista (2001). Ingeniería Electrónica. *Revista Ingeniería e Investigación*, 47, 141-144.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4902400>

Reyes, F. Y Cid, J. (2015). *Arduino: Aplicado en Robótica, Mecatrónica e Ingenierías*.

Alpha

Editorial.

<https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=ztFxEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR4&dq=instalacion+arduino&ots=S1wda4fqZu&sig=qZ2UPcBpqjDcruNri49k0fZM3S0#v=onepage&q=instalacion%20arduino&f=false>

- Rivera, I. N. G. (2023). *Medición de la condición del aire con sensor de material particulado conectado a microcontrolador ESP32* (Trabajo de titulación, Universidad de Atacama).
<https://repoacad.uda.cl/bitstream/handle/20.500.12740/16943/Bib%2030.156.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez Chang, L., Gonzáles Brito, H. R. y Pérez Fernández, D. (2021). Automatización de pruebas de seguridad a servidores web. UCIENCIA 2021: Congreso Científico Internacional de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, 20.
https://repositorio.uci.cu/bitstream/123456789/9616/1/UCIENCIA_2021_paper_20.pdf
- Rodríguez Villegas, A. J. (2022). *Sistema de riego por goteo y fertirriego automatizado con sensores de humedad y telemetría para maíz (ZEA MAYS) JICARAL, Puntarenas, 2020*. (Trabajo final de graduación, Universidad Técnica Nacional, Sede Guanacaste).
<https://repositorio.utn.ac.cr/server/api/core/bitstreams/9edc0f4c-e1a6-42a3-bb2c-836567bef97d/content>
- Rodríguez, M. C. M. y Cabrera, I. P. (2007). Tipos de estudio en el enfoque de investigación cuantitativa. *Enfermería Universitaria*, 4(1), 35-38.
<https://www.redalyc.org/pdf/3587/358741821004.pdf>
- Rodriguez, R. G., Dumit, M. C. y Pattini, A. (2019). Medición de niveles de iluminación con teléfonos inteligentes. ¿Se puede reemplazar a un luxómetro? *UCIENCIA 2019: Congreso Científico Internacional de la Universidad Tecnológica de La*

Habana José Antonio Echeverría, 20.

<https://www.redalyc.org/pdf/3587/358741821004.pdf>

Rodríguez Soto, J. A. (2024). *Digitalización en el sector agropecuario y desarrollo sostenible e inclusivo: Experiencias en Costa Rica*. Universidad Nacional, Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible.

<https://repositorio.una.ac.cr/items/9ebb20ee-40f7-45ae-a251-52450a72fc68>

Rojas Picado, H. Y. (2021). *Diseño de un sistema de riego por goteo para hortalizas en ocho invernaderos, Páramo, Pérez Zeledón*. (Tesis de licenciatura, Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola).

<https://agris.fao.org/search/en/providers/124451/records/66470d6de62948cba00aced5>

Romero Calvo, K. y Solórzano Quintana, M. (2023). *Propuesta de modelo de automatización de los sistemas de riego mediante aplicación de técnicas de agricultura de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del Proyecto Sanatorio Durán, Cartago*. (Trabajo final de graduación, Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola).

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14445>

Ruiz Barea, R. (2023). *Protección de APIs REST* (Trabajo final de máster, Universitat Oberta de Catalunya).

<https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/7b84e40c-5883-4a93-bc3e-b90b9cde00db/content>

Salcedo Tovar, M. L. (2015). Minicomputador educacional de bajo costo raspberry pi: primera parte. *Revista Ethos Venezolana*, 7(1), 28-45.

<https://biblat.unam.mx/hevila/RevistaEthosvenezolana/2015/vol7/no1/2.pdf>

Samper, M. (2024). Ronny Viales Hurtado y Andrea Montero Mora, El arado y el tractor.

La agricultura como historia de la ciencia, la tecnología y la sociedad. Costa Rica, 1900-1970. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica (UCR) y Centro de Investigaciones Históricas de América Central (CIHAC), 2024, 207, pp. ISBN 978-9930-9815-3-5. *Historia Agraria de América Latina*, 5(02), 165-169.
<https://obregon.cihac.fcs.ucr.ac.cr/items/1aa4c861-f1c4-4223-8df1-236bc3960e87>

Santos, L. K. C. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(14), 25-32.
<https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol2iss14.2018pp25-32>

Schugurensky, C. y Capraro, F. (diciembre, 2008). Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo. *Actas de XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA)*. Santiago, Chile. <http://unsjcuencas.com.ar/pdf/evento33.pdf>

Serrano Ceballos, J., Granados Torres, J. M. y Avendaño González, L. E. A. (2017). Equidad y desarrollo humano sobre la base del acceso al agua. *Revista Médica Electrónica*, 39 (Supl. 1), 750–764. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1684-18242017000700006&script=sci_arttext&tlng=en

Serrano Cermeño, Z. (2005). *Construcción de invernaderos*. (3.^a ed. revisada y ampliada). Ediciones Mundi-Prensa.
https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=Glip3Q7T9mEC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Construcci%C3%B3n+de+invernaderos&ots=Q3uAs7t6sL&sig=RTBBP7B-6UfK8W2DnQ_DmBAtnpE&redir_esc=y#v=onepage&q=Construcci%C3%B3n%20de%20invernaderos&f=false

- Silva Arroyave, S. M y Correa Restrepo, F. J. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13-34. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0120-63462009000100002&script=sci_arttext
- Soltek Online (2020). La historia de AMD: el líder de microprocesadores en el mundo. <https://blog.soltekonline.com/la-historia-de-amd-el-lider-de-microprocesadores-en-el-mundo/>
- Stallamn, R. (2020). La definición de software libre. *Communiars. Revista de Imagen, Artes y Educación Crítica y Social*, (3). <https://dx.doi.org/10.12795/Communiars.2020.i03.09>
- Stelling, S., Syah, T. Y. R., Indrawati, R., & Dewanto, D. (2018). Role of payback period, ROI, and NPV for investment in clinical health business. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(7), 78–82. <https://iarjset.com/wp-content/uploads/2018/09/10.17148.IARJSET.2018.5714.pdf>
- Thompson, H. y Aguayo, P. (2009). *Como utilizar un servo motor con Arduino*. (Guía técnica). https://www.academia.edu/4270145/Fabricante_Voltaje_positivo_Tierra_Se%C3%B1al_de_control
- Torres, F. y Rojas, A. (2018). Suelo agrícola en México: retrospección y prospectiva para la seguridad alimentaria. Realidad, datos y espacio. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(3), 137-155. https://www.researchgate.net/profile/Agustin-Rojas-Martínez/publication/344279640_Suelo_agricola_en_Mexico_Retrospeccion_y_Prospectiva_para_la_Seguridad_Alimentaria/links/5f62fa97299bf1d43c0acfd/Suelo_agricola_en_Mexico_Retrospeccion_y_Prospectiva_para_la_Seguridad_Alimentaria/links/5f62fa97299bf1d43c0acfd/Suelo_agricola_en_Mexico_Retrospeccion_y_Prospectiva_para_la_Seguridad_Alimentaria

[o-agricola-en-Mexico-Retrospeccion-y-Prospectiva-para-la-Seguridad-Alimentaria.pdf](#)

Torres Cobo, L. E. (2024). Estrategias para el uso sostenible del agua en la agricultura. *Horizon Nexus Journal*, 2(4), 1-14.
<https://doi.org/10.70881/hnj/v2/n4/40>

Tovar Soto, J. P., Solórzano Suárez, J. de los S., Badillo Rodríguez, A. y Rodríguez Cainaba, G. O. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, (22), 86-105.
<https://revistas.ucatolicaluisamigo.edu.co/index.php/lampsakos/article/view/3253/2635>

Valdés, F. y Areny, R. P. (2007). Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC (Vol. 1149). *Marcombo*.
[https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=ODenKGOHMRkC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Vald%C3%A9s,+F.,+%26+Areny,+R.+P.+\(2007\).+Microcontroladores+fundamentos+y+aplicaciones+con+PIC+\(Vol.+1149\).+Marcombo.&ots=uotO2i493w&sig=pyjO661CqKOGVxa6Pcmn_Cga5aM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=ODenKGOHMRkC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Vald%C3%A9s,+F.,+%26+Areny,+R.+P.+(2007).+Microcontroladores+fundamentos+y+aplicaciones+con+PIC+(Vol.+1149).+Marcombo.&ots=uotO2i493w&sig=pyjO661CqKOGVxa6Pcmn_Cga5aM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Valverde Delgado, B. S. (2023). *Evaluación térmica de un invernadero no automatizado ubicado en la zona de Guápiles mediante el uso de dinámica de fluidos computacional*. (Trabajo final de graduación, Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas). Universidad de Costa Rica.
<https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/23448>

Velthuis, M. G. P. (2014). *Métodos de investigación en ingeniería del software*. Ra-Ma Editorial.
<https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=g6a6EAAQBAJ&oi=fnd&pg=>

[PP1&dq=tipos+de+investigaciones+de+ingenieria&ots=Gt71qmw41v&sig=E5N80wugDKoT1jxo4p44iqfDNA#v=onepage&q=tipos%20de%20investigaciones%20de%20ingenieria&f=false](https://www.repositorio.cimmyt.org/bitstreams/3a7817a9-ba9c-4514-ae80-9d9c4b9d8852/download)

Verhulst, N., François, I. y Govaerts, B. (2015). *Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).
<https://repository.cimmyt.org/bitstreams/3a7817a9-ba9c-4514-ae80-9d9c4b9d8852/download>

Villarreal, D. Z. y Marín, P. C. G. (2008). El origen de la agricultura, la domesticación de plantas y el establecimiento de corredores biológico-culturales en Mesoamérica. *Revista de Geografía Agrícola*, (41), 85-113.
<https://www.redalyc.org/pdf/757/75711472007.pdf>

Wang, M. (2024). Paquete QFN: ¿qué es? *PCBMay*.
<https://www.pcbmay.com/es/paquete-qfn/>

Zambrano, P. M. P., Plaza, G. N. M., Matute, L. G. y Rivas, Y. E. G. (2021). Importancia de la pertinencia de la carrera de Agronomía, Ecuador. *Ciencia Huasteca Boletín Científico de la Escuela Superior de Huejutla*, 9(18), 28-33.
<https://doi.org/10.29057/esh.v9i18.7138>

Apéndices y anexos

Anexo 1

Camas de cultivo



Nota: Imagen de la izquierda corresponde a las camas de cultivo instaladas en el INA de Heredia por funcionarios del Núcleo Agropecuario. Imagen de la derecha corresponde al invernadero en el que se instaló el sistema de monitoreo y control electrónico.

Anexo 2

Lechugas: día 1 después del trasplante



Nota: Fotografía tomada el primer día después de haber realizado el trasplante de lechugas.

Lechugas: día 7 después del trasplante



Nota: Fotografía tomada el día 7 después del trasplante

Lechugas: día 19 después del trasplante



Nota: Fotografía tomada el día 19 después del trasplante.

Lechugas: día 36 después del trasplante



Nota: Fotografía tomada el día 36 después del trasplante

Lechugas: día 40 después del trasplante



Nota: Fotografía tomada el día 40 después del trasplante cuando se realizó la cosecha de las primeras 7 lechugas. Se aprecia el color, el tamaño y la textura de las hojas.