

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y  
ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO  
PARA EL APROVECHAMIENTO DE  
LOS RECURSOS NATURALES EN UN  
INVERNADERO”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

**GARCÍA GARCÍA OSCAR ALEJANDRO**

DIRECTOR:

**DR. JUAN ANTONIO VILLANUEVA HERNÁNDEZ**

CODIRECTORES:

**DR. RUBÉN ALEJANDRO VÁZQUEZ SÁNCHEZ**

**DR. JOSÉ MANUEL GÓMEZ RAMOS**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Marzo, 2025





**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**  
SECRETARÍA GENERAL  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR  
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.  
Fecha: 03 de Marzo de 2025.

C. OSCAR ALEJANDRO GARCÍA GARCÍA

Pasante del Programa Educativo de: INGENIERÍA AMBIENTAL

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS NATURALES  
EN UN INVERNADERO

En la modalidad de: TESIS PROFESIONAL

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

**Revisores**

DR. JOSÉ MANUEL GÓMEZ RAMOS

DR. RUBEN ALEJANDRO VÁZQUEZ SÁNCHEZ

DR. JUAN ANTONIO VILLANUEVA HERNÁNDEZ

Firmas:

Ccp. Expediente

# CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. OBJETIVO GENERAL:.....	4
4.1 Objetivos específicos:.....	4
V. HIPÓTESIS.....	4
VI. MARCO TEÓRICO.....	5
6.1 TECNOLOGÍA AGRÍCOLA.....	5
6.2 INVERNADEROS.....	5
6.3 CULTIVOS VERTICALES.....	6
6.4 FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.....	6
6.5 NECESIDADES DE LAS PLANTAS.....	7
6.6 EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS DISPONIBLES.....	8
6.6.1 El aprovechamiento del agua de lluvia:.....	8
6.6.2 La energía solar.....	9
6.6.3 El compostaje.....	9
6.7 INGENIERÍA DE SISTEMAS.....	9
6.7.1 Sistema embebido.....	9
6.7.2 Microcontrolador.....	9
6.7.3 Sensores y actuadores.....	10
6.7.4 Software.....	10
6.8 PLANTAS PARA CULTIVO.....	11
6.8.1 <i>Rhapanus sativus</i> .....	11
6.8.2 <i>Tradescantia zebrina (matalí)</i> .....	12
6.8.3 <i>Mangifera indica L. var Ataulfo</i> .....	12
6.8.4 <i>Kalanchoe Pinnata</i> .....	13
VII. ANTECEDENTES.....	14
VIII. METODOLOGÍA.....	15
8.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	15
8.2 DISEÑO DEL SISTEMA.....	15
8.3 REQUISITOS PARA SU FUNCIONAMIENTO.....	16
8.4 DISEÑO PRELIMINAR.....	17

<b>IX. RESULTADOS.....</b>	<b>18</b>
<b>9.1 Diseño del sistema .....</b>	<b>18</b>
9.1.1 INVERNADERO .....	18
9.1.2 Diseño interior.....	19
9.1.3 Sistema de captación de agua de lluvia.....	20
9.1.4 Cultivo vertical .....	21
9.1.5 Sistema de compostaje giratorio .....	23
9.2 DESARROLLO DEL HARDWARE .....	24
9.2.1 Arquitectura del sistema embebido.....	24
9.2.2 Sistema embebido .....	25
9.3 DESARROLLO DEL SOFTWARE .....	28
9.3.1 Adafruit IO .....	28
9.3.2 Página web .....	30
9.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	31
<b>9.5 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA. ....</b>	<b>33</b>
9.5.1 CALIBRACIÓN DE SENSORES DE HUMEDAD DE SUELO.....	33
9.5.2 Pruebas de del hardware .....	34
9.5.3 Funcionamiento del software .....	37
9.5.4 Sistema de compostaje .....	38
9.5.5 Nivel del agua.....	39
<b>9.6 VALIDACIÓN DEL SISTEMA.....</b>	<b>41</b>
9.6.1 <i>Raphanus sativus</i> en cultivo vertical .....	41
9.6.2 <i>Raphanus sativus</i> en invernadero .....	42
9.6.3 Crecimiento de <i>Mangifera indica</i> L.var <i>Ataulfo</i> : .....	43
9.6.4 Crecimiento de <i>kalanchoe pinnata</i> .....	44
9.6.5 Crecimiento de <i>Tradescantia zebrina</i> var. <i>zebrina</i> .....	45
9.6.6 Validación de ecotecnias.....	45
<b>X. Análisis de los resultados y Discusión .....</b>	<b>47</b>
<b>XI. Recomendaciones.....</b>	<b>49</b>
<b>XII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>XIII. REFERENCIAS .....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>56</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Principales tipos de cultivo. Adaptado de (Núñez, 2022).....	6
<b>Figura 2.</b> Técnicas de riego (SADER, 2023).....	7
<b>Figura 3.</b> Componentes de un SCALL. Fuente: Elaboración propia.....	8
<b>Figura 4.</b> Proceso de investigación.....	15
<b>Figura 6.</b> Estructura general del sistema.....	17
<b>Figura 7.</b> Partes que conforman la estructura del invernadero.....	18
<b>Figura 8.</b> Diseño interior del invernadero.....	19
<b>Figura 9.</b> Diseño del SCALL.....	20
<b>Figura 10.</b> Componentes del cultivo vertical.....	22
<b>Figura 11.</b> Cultivo vertical.....	22
<b>Figura 12.</b> Sistema de compostaje giratorio.....	23
<b>Figura 13.</b> Arquitectura de los componentes para el sistema embebido.....	24
<b>Figura 14.</b> Diagrama electrónico del Sistema embebido principal.....	25
<b>Figura 15.</b> Diagrama de flujo para el esp82666.....	26
<b>Figura 16.</b> Diagrama de flujo para el Arduino UNO.....	26
<b>Figura 17.</b> Diagrama electrónico para el sistema de compostaje.....	27
<b>Figura 18.</b> Diagrama de flujo del sistema embebido del compostaje.....	27
<b>Figura 19.</b> Interfaz web HTML.....	28
<b>Figura 20.</b> Interfaz de usuario general.....	29
<b>Figura 21.</b> Interfaz web de usuario del sistema de compostaje.....	29
<b>Figura 22.</b> Página de acceso principal.....	30
<b>Figura 23.</b> Esquema de conexión fotovoltaica.....	32
<b>Figura 24.</b> Regulador de carga.....	32
<b>Figura 25.</b> Valores cuando los sensores están en seco.....	33

<b>Figura 26.</b> Valores cuando los sensores están en suelo completamente húmedo. ....	34
<b>Figura 27.</b> Valores cuando los sensores están en suelo completamente húmedo. ....	34
<b>Figura 28.</b> Vista previa de la Interfaz web.....	35
<b>Figura 29.</b> Conexiones de prueba .....	36
<b>Figura 30.</b> Funcionamiento del sistema embebido general.....	36
<b>Figura 32.</b> Página web publicada.....	37
<b>Figura 33.</b> Interfaz web propia.....	37
<b>Figura 34.</b> Interfaz de usuario en Adafruit IO.....	37
<b>Figura 35.</b> Monitor serie del sistema embebido del compostaje. ....	38
<b>Figura 36.</b> Sistema embebido e interfaz web.....	39
<b>Figura 37.</b> Sensor de nivel del agua.....	39
<b>Figura 38.</b> Niveles del tanque del agua mostrados en el servidor web.....	39
<b>Figura 39.</b> Datos del sensor ultrasónico en Adafruit.IO .....	40
<b>Figura 40.</b> Llenado del tanque de agua.....	40
<b>Figura 41.</b> Diagrama del sistema funcionando.....	40
<b>Figura 42.</b> Resultados del sistema embebido.....	41
<b>Figura 43.</b> Crecimiento del mango.....	43
<b>Figura 44.</b> Retoños del <i>kalanchoe pinnata</i> .....	44
<b>Figura 45.</b> Crecimiento de <i>kalanchoe pinnata</i> .....	44
<b>Figura 46.</b> Tradescantia zebrina var. Zebrina.....	45
<b>Figura 47.</b> Crecimiento de <i>Tradescantia zebrina</i> .....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Rhapanus sativus</i> .....	11
Tabla 2. Instrucciones de siembra. ....	11
Tabla 3. Requerimientos edafológicos e indicaciones.....	11
Tabla 4. <i>Tradescantia zebrina (matalí)</i> .....	12
Tabla 5. Cuidados de <i>Tradescantia zebrina (matalí)</i> .....	12
Tabla 6. <i>Mangifera indica L. var Ataulfo</i> .....	12
Tabla 7. Cuidados de <i>Mangifera indica L. var Ataulfo</i> .....	12
Tabla 8. <i>Kalanchoe pinnata</i> .....	13
Tabla 9. Cuidados de <i>Kalanchoe pinnata</i> .....	13
Tabla 10. Condiciones climáticas en el área de implementación. ....	18
Tabla 11. Cantidad de agua recolectada. ....	21
Tabla 12. Descripción y funciones de los componentes. ....	24
Tabla 13. Consumo eléctrico diario.....	31
Tabla 14. Tabla comparativa del uso del sistema integral y sin el sistema integral.. ....	47
Tabla 14. Tabla comparativa con antecedentes.. ....	31

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Temperatura y humedad en cultivo vertical.....	42
Gráfica 2. Altura de semillas germinadas. ....	42
Gráfica 3. Comparativa de humedad del rábano. ....	43
Gráfica 4. Comparativa altura del rábano. ....	43
Gráfica 5. Altura del mango . ....	44
Gráfica 6. Comparativa de humedad de mango .....	44
Gráfica 7. Humedad semanal del <i>kalanchoe pinnata</i> .....	45
Gráfica 7. Humedad de suelo del <i>Tradescantia zebrina</i> .....	47

## Anexos

Anexo 1. Instalación del sistema de captación de agua de lluvia .....	55
Anexo 2. Sistema de compostaje giratorio .....	55
Anexo 3. Crecimiento de Lechuga y rábano en cultivo vertical.....	56
Anexo 4. Crecimiento de Lechuga en invernadero .....	56
Anexo 5. Crecimiento de rábano en cultivo vertical.....	57
Anexo 6. Crecimiento de lechuga.....	57
Anexo 7. Crecimiento de Rábano.....	57
Anexo 8. Composta obtenida y su pH.....	58
Anexo 9. Construcción del cultivo vertical .....	58
Anexo 10. Otras plantas en el invernadero .....	59
Anexo 11. Proceso de compostaje.....	59
Anexo 12. Código del sistema de compostaje .....	60
Anexo 13. Código del sistema emebebido.....	63
Anexo 14. Tabla de costos .....	69

## **I. INTRODUCCIÓN**

La agricultura es una de las actividades más importantes para los seres humanos, esto porque contribuye a la producción de alimentos, fibras y otros bienes ecológicos esenciales, además que su práctica se extiende en todo el planeta (Sarandón, 2020), en la década de los 70's el auge de la agricultura permitió que se incrementara considerablemente el rendimiento de diversos cultivos, utilizando variedades mejoradas de semillas y la aplicación de grandes cantidades de agua, fertilizantes y plaguicidas (Kremer et. al., 2020).

Por definición, la agricultura consiste en modificar los ecosistemas para transformarlos en agro ecosistemas, por lo que tiene impactos dependiendo en la manera que se diseñen y manejen, ya que puede afectar al propio ecosistema, sin embargo esta transformación no debe significar el deterioro de los recursos naturales, por lo que implica asumir un enfoque diferente en la agricultura (Sarandón, 2020) para garantizar las sostenibilidad del desarrollo de este sector e incorporar una perspectiva más integral que exige su combinación con tecnologías de sistemas de posicionamiento global, sensores, satélites e imágenes aéreas y sistemas de información geográfica con el fin de elevar su rendimiento sin afectar el medio ambiente (Kremer et. al., 2020).

El uso tecnologías para la optimización en la agricultura surge como una necesidad de adaptación en la posibilidad de permitir elaborar estrategias de crecimiento para apoyar la seguridad alimentaria mediante el uso de la agricultura inteligente que implica el uso de la tecnología de la información y la comunicación y el internet de las cosas que consiste en la integración de sensores y dispositivos que se conectan y envían información a través de internet para el monitoreo y procesamiento de grandes volúmenes de datos por obtenidos de los cultivos (Tovar et.al, 2019).

La implementación de tecnologías IoT en el sector agrícola se encuentra enfocado en las nuevas tendencias de la era digital por lo que es necesario la revisión del estado actual de investigación para generar conocimientos que pueda responder a las necesidades del agricultor (Espinosa et.al., 2021), es por ello que el objetivo de este trabajo es el diseño e implementación de un sistema embebido que permita la automatización, el monitoreo en tiempo real mediante tecnologías IoT en el que se busca cubrir necesidades como el agua, el sostenimiento eléctrico y el aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante tecnologías existentes utilizando un invernadero.

## **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El medio ambiente natural se ha estado deteriorando debido a la demanda del consumo y producción agrícola lo que ha limitado el presente y futuro crecimiento de este sector, por lo que se han ido incorporando tecnologías, políticas y actividades basadas en principios económicos y ecológicos que logren satisfacer las demandas agrícolas actuales buscando la sostenibilidad (Castellanos y Morales, 2016)

El calentamiento global afecta a las prácticas agrícolas en todo el mundo, provocando problemas como la disminución del rendimiento y de la calidad de los cultivos, debido a causas de climas extremos, erosión de suelos, menor disponibilidad de tierras y recursos hídricos afectando también a la seguridad alimentaria (Piña Borrego, 2020).

La demanda de alimentos exige mayor producción agrícola, por lo que la sobrepoblación agudizará la inseguridad alimentaria, ya que, en las proyecciones de las Naciones Unidas que fueron publicadas en el Día Mundial de la Población mencionan que para el 2030 la población podría alcanzar 8500 millones y 9700 millones de habitantes en 2050 (Naciones Unidas, s.f.)

El impacto del cambio climático afectará a la agricultura global con aumentos en temperaturas que podrían afectar a la mayoría de especies vegetales estresándolas, lo que evita que las plantas realicen sus funciones de manera normal, por lo que sufren cuando las temperaturas aumentan o disminuyen a los umbrales definidos por cada especie (Barrantes y Soto, 2017), también impactará en la producción de alimentos ya que los climas extremos no son favorables ocasionando que haya plagas y enfermedades en plantas y animales, que mayormente afectará a los agricultores a pequeña escala ocasionándole pérdidas (Piña Borrego, 2020), por lo que el uso de tecnología avanzada destaca la importancia de nuevos instrumentos que permitan la modernización del sector agrícola para aumentar la producción y generar un impacto positivo para el 2050 (Soto et. al., 2019)

México es un país mega diverso que cuenta con alrededor de 200 mil especies diferentes, por lo que el cambio climático puede traerle desafíos en su conservación, debido a esto es necesario buscar formas de enfrentarnos ante la escasez del agua y la degradación de los recursos naturales (SADER, 2023) por lo que una agricultura sostenible y sustentable ayudará a equilibrar la producción de cultivos con la conservación del medio ambiente, evitando su destrucción a causas de los fenómenos causados por el cambio climático y la sobrepoblación que afectara principalmente a zonas rurales por la urbanización que disminuirá y degradara las tierras cultivables (Batista, 2024).

### III. JUSTIFICACIÓN

“*Satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las futuras generaciones*”, un término que tiene importancia a nivel mundial y en el que se encuentran los aspectos sociales, económicos y por supuesto, el medio ambiente, el cual conocemos como Desarrollo Sostenible (García, M. B., 2023). El Desarrollo sostenible resulta de gran importancia para evitar la contaminación y las prácticas insostenibles que nos ha llevado al cambio climático, pérdidas permanentes del medio ambiente, pobreza, hambruna y desigualdad social por lo que se convierte en un desafío global que compromete a los gobiernos, las empresas privadas y la población a crear estrategias compartidas que todos debemos asumir y ejercer (Rodríguez, M. G., 2021).

La crisis climática empeora a medida que las emisiones de gases de efecto invernadero aumenta, por lo que esto y otros desafíos ambientales afectan el progreso de los Objetivos del Desarrollo Sostenible, por ello la Agenda 2030 salió como un plan que busca responder a los problemas mundiales mediante 17 objetivos. En este contexto, la agricultura juega un papel importante en esta agenda, siendo el segundo objetivo “Hambre Cero”, en el cual mediante prácticas agrícolas sostenibles se busque el acceso a alimentos que ayuden a mitigar la desnutrición y mejorar la seguridad alimentaria (Naciones Unidas, 2023).

Por lo que la agricultura sostenible busca mantener una mayor productividad a largo plazo evitando el agotamiento de los recursos naturales mediante prácticas como rotación de cultivos, el uso eficiente del agua y la reducción de pesticidas y agroquímicos que pueden ser dañinos para la salud humana (SADER, 2023).

Las poblaciones indígenas y campesinas se encuentran expuesta a pérdidas de cosechas debido a los impactos de los cambios climáticos, volviéndose principalmente susceptibles debido a que sus estrategias convencionales no son suficientes para soportar la severidad de los climas extremos que se predicen (Nicholls y Altieri, 2019), es por ello que surge la necesidad de adaptación en el cual se impone la integración de nuevas tecnologías agrícolas que permitirán mayor producción mediante el uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación y principalmente, el Internet de las Cosas (Espinosa et. al., 2020), con base en lo planteado, esta investigación busca la implementación de invernaderos inteligentes con ecotecias en zonas donde los servicios básicos como la energía eléctrica pública y agua potable son limitados, de esta forma, las ecotecias brindarían la oportunidad de generar sus propios recursos y evitar la dependencia de suministros externos, disminuir la carga de trabajo y facilitar el monitoreo de sus cultivos.

#### **IV. OBJETIVO GENERAL:**

Diseñar un sistema integral basado en sensores ambientales y tecnologías sostenibles que gestionen el uso de los recursos naturales en un invernadero y permita su monitoreo en tiempo real a través de un sistema embebido.

#### **4.1 Objetivos específicos:**

- Diseñar la infraestructura del invernadero considerando sus ecotecnias (captación de agua de lluvia, compostaje y sistema fotovoltaico).
- Desarrollar un sistema embebido considerando los requerimientos necesarios y utilizando sensores ambientales para medición de la Humedad relativa, temperatura, humedad de suelo y distancia (ultrasónico).
- Desarrollar una interfaz de usuario que permita el monitoreo en tiempo real y la interacción con el sistema.
- Implementar un prototipo funcional del sistema embebido en el invernadero.
- Comparar los resultados obtenidos mediante dos grupos experimentales (con y sin el sistema) utilizando datos estadísticos.

#### **V. HIPÓTESIS**

Se espera que el uso de un sistema embebido con sensores ambientales en un invernadero favorezca la gestión sostenible de los recursos naturales y mejore el crecimiento de las plantas con aquellas que se cultiven sin este sistema.

## **VI. MARCO TEÓRICO**

### **6.1 Tecnología agrícola**

La agricultura es una de las actividades más importantes que realizan los seres humanos, ya que permite la producción de alimentos, bienes y servicios ecológicos necesarios para su existencia, siendo una actividad que se realiza en todo el planeta (Sarandón, 2020), por lo que desempeña un papel importante en el desarrollo económico de los países, especialmente los menos desarrollados, ya que dependen de ella para su subsistencia siendo que en algunos países, el 42% depende directamente de la agricultura (Bula, 2020),

En la agricultura se hace uso de técnicas y conocimientos para el cultivar en la tierra, por lo que se realizan trabajos de tratamiento del suelo y los cultivos en el que el principal actor es el ser humano, esto trae consigo una transformación del suelo, es decir, el agotamiento o deterioro de recursos naturales que como consecuencia se obtiene un elevado costo ambiental por el impacto negativo ocasionado (Castellanos y Morales, 2016).

El uso de tecnologías para la agricultura ha aumentado a nivel internacional, esto ante los problemas ambientales que vivimos en la actualidad, por lo cual surge como una necesidad que permite apoyar en la seguridad alimentaria de los países en desarrollo (Espinoza et. al., 2021), entre las tecnologías utilizadas se encuentra la industria 4.0, denominada por diversos autores como la era de la digitalización, el desarrollo de esta tecnología se debe al crecimiento de las tecnologías de información en donde se fusionan los sistemas físicos, digitales y biológicos para generar una red donde distintos componentes interaccionan entre sí (García, 2020) ofreciéndonos tecnologías IoT (internet de las cosas), sistemas embebidos, sensores inalámbricos, inteligencia artificial y sistemas de monitoreo y predicción (Soto et. al., 2019), por lo que su uso en la agricultura permite el monitoreo, automatización de riego y supervisión vía internet (Espinoza et al., 2021).

### **6.2 Invernaderos**

Un invernadero es una estructura diseñada para proteger a los cultivos de las condiciones externas no adecuadas, esta estructura puede ser de madera o metal, y puede estar cubierta de vidrio, plástico o malla en los laterales (Berrios, 2022), estos invernaderos tienen como objetivos obtener producción fuera de épocas de siembra, la incrementación de la producción y mantener condiciones favorables para los cultivos mejorando su calidad (Iglesias y Lenscak, 2019).

### 6.3 Cultivos verticales

Es una técnica que busca brindar la seguridad alimentaria en el futuro cultivando dentro de un sistema cerrado, manteniendo un control climático produciéndolas en múltiples niveles para optimizar el espacio donde se coloque (Lira S., 2022), este sistema permite la cosecha de frutas y vegetales independientemente del clima y del suelo, este cultivo no depende de factores externos (Luz solar y clima exterior) y puede funcionar sin necesidad de usar pesticidas y herbicidas (Núñez, 2022).

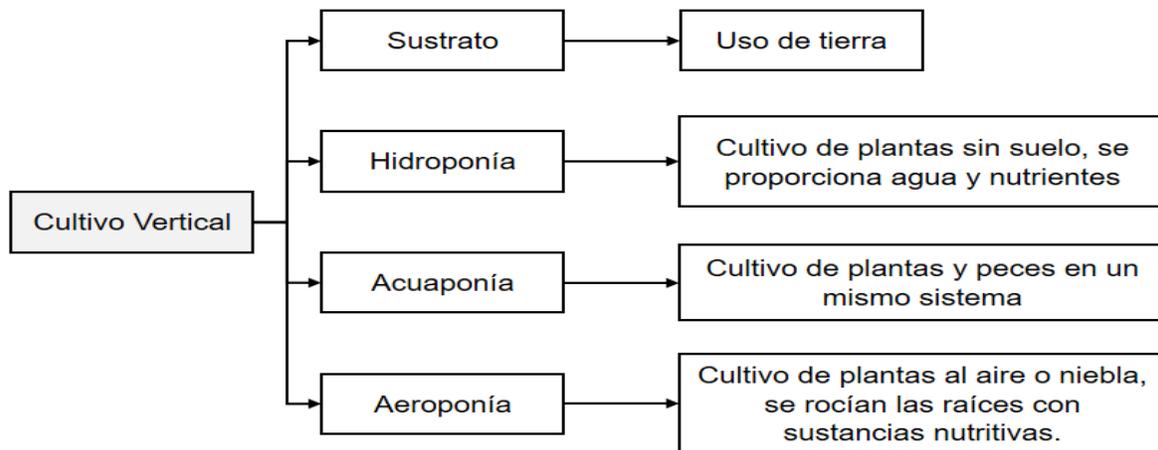


Figura 1. Principales tipos de cultivo. Adaptado de Núñez (2022).

### 6.4 Factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas

- **Temperatura;** La temperatura es un parámetro fundamental para gestionar la actividad y respuesta fisiológica en las plantas, la temperatura puede medirse en el aire, las hojas de las plantas e incluso en la solución nutritiva, esto puede servir para compararla con el aire del medio y saber si una planta se encuentra estresada (Niu et.al., 2020).
- **Humedad:** La humedad relativa es la cantidad de agua que se encuentra en el aire y su cantidad dependerá de la temperatura y presión determinadas (Niu et.al., 2020), una baja concentración de esta puede provocar una mayor evaporación de las hojas ocasionando una excesiva pérdida de agua, esto provoca que la planta cierre sus estomas y no se pueda absorber más CO<sub>2</sub>. La humedad en el suelo es fundamental para el correcto desarrollo de las plantas, regulación de temperatura, salinidad y disponibilidad de nutrientes ayudando a evitar la erosión (Ballesteros y Bermúdez, 2020).
- **pH:** Es una propiedad química que indica la concentración de iones de hidrógeno, su rango va de 0 a 14, siendo 7 pH neutro, el pH afecta el crecimiento de la vegetación, la actividad microbiana,

las tasas de descomposición y la disponibilidad de nutrientes, por lo que debe mantenerse en un rango óptimo, ya que un suelo ácido puede ser nocivo para la vegetación (Ballesteros y Bermúdez, 2020).

### 6.5 Necesidades de las plantas.

- **Agua:** El agua es uno de los recursos más importantes para la producción de alimentos en la agricultura (Secretaría de agricultura y Desarrollo Rural, 2023), por lo que una buena calidad influirá en el éxito de la producción de los cultivos, es decir, altas cantidades de sales, metales y contaminantes afectarían la calidad del producto (USU, 2019). El rango de pH normal para regar los cultivos debe ser entre los 6.5 a 8, si el pH se encuentra fuera de este rango se deben tomar medidas para evitar un desequilibrio nutricional (Ballesteros y Bermúdez, 2020).

Para el uso más preciso del agua se realizan técnicas de riego que permiten proporcionar la cantidad de agua necesaria en el momento que se requiera, que entre sus ventajas se encuentra el evitar el exceso de humedad y reducir la cantidad de agua utilizada.

Algunas técnicas de riego se muestran en la figura 2.

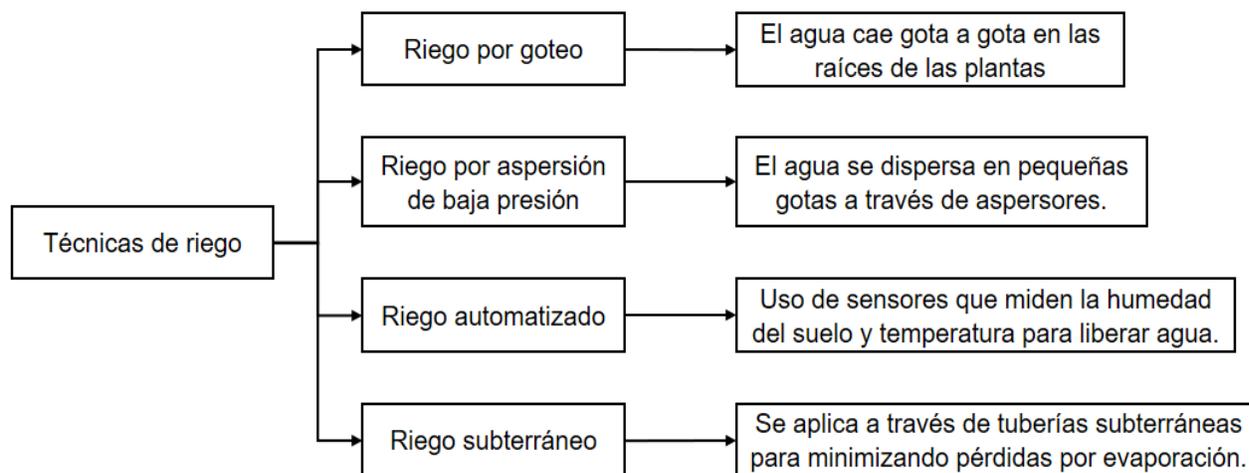


Figura 2. Técnicas de riego. Fuente: adaptado de SADER (2023).

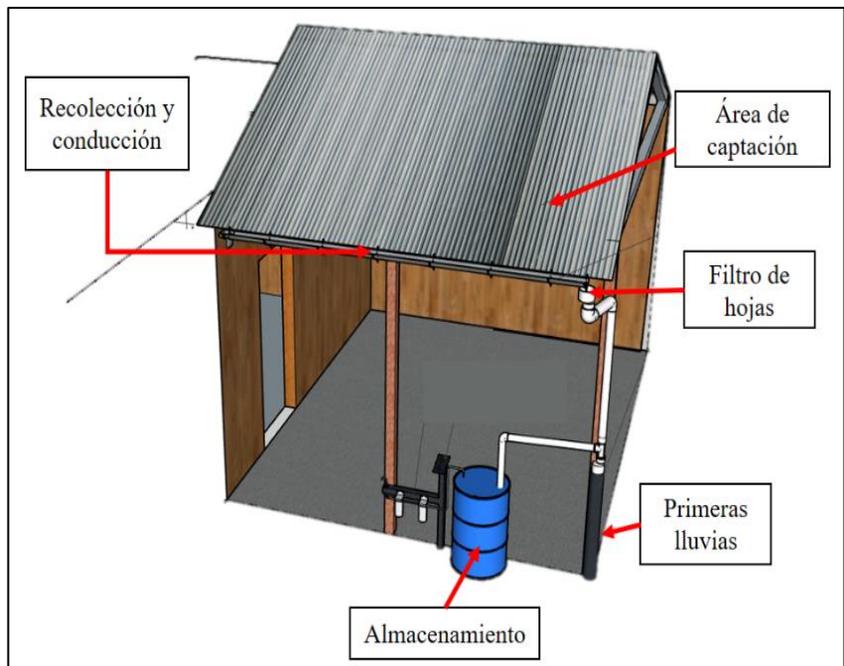
- **Luz:** La luz es una fuente de energía que las plantas necesitan para poder vivir, está la absorben a través de sus hojas donde junto con el dióxido de carbono realizan la fotosíntesis, durante este proceso las plantas únicamente aprovechan una pequeña parte del espectro electromagnético entre los 400 a 700 nanómetros a esta longitud de onda visible se le denomina radiación fotosintéticamente activa (PAR), siendo el espectro azul (430 nm) y rojo (662 nm) los más relevantes para la fotosíntesis (Kaltsidi et. al, 2019).

- **Luz artificial:** La luz artificial es utilizada en plantas interiores como los cultivos verticales, convirtiéndose en una técnica novedosa que permite mayor eficiencia en el crecimiento de las plantas, ya que se equilibra la intensidad y el fotoperiodo (Kaltsidi et. al, 2019),
- **Nutrientes:** Los nutrientes resultan esenciales para el crecimiento de las plantas, los minerales son obtenidos del suelo de donde crecen a través de sus raíces encontrándose con sustancias como el nitrógeno, potasio, fósforo, carbono, oxígeno, nitrógeno, entre otros (Gatiboni, 2022).
- **Aire:** El aire es tomado a través de las hojas, y es el aire que comúnmente respiramos tomando, el CO<sub>2</sub> lo utilizan para poder realizar la fotosíntesis mediante una reacción química en donde la planta rompe las moléculas de CO<sub>2</sub> obteniendo el carbono que necesita para después liberar moléculas de O<sub>2</sub> al medio ambiente (Arriols, 2018).

## 6.6 El aprovechamiento de los recursos disponibles

### 6.6.1 El aprovechamiento del agua de lluvia:

La escasez y dificultad del acceso del agua hace necesaria la implementación de alternativas para captar agua, siendo una de las alternativas los “Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL)” convirtiéndose en un medio fácil para obtener agua para uso y consumo en lugares donde no se dispone de suficiente cantidad (Hugues, 2019). El SCALL tiene como función recolectar, conducir y almacenar el agua de lluvia a través de componentes como los son: área de captación, sistema de recolección y conducción, filtro de hojas, eliminación de primeras lluvias y almacenamiento, (Quintanar et. al., 2022).



**Figura 3.** Componentes de un SCALL. Fuente: Elaboración propia.

### **6.6.2 La energía solar**

Actualmente las energías renovables o energías limpias pretenden el aprovechamiento de fuentes naturales como lo es el Sol, que tiene una energía abundante lo que podríamos considerar como inagotable, por lo que para aprovecharlo se utilizan paneles solares que funcionan capturando la radiación solar y transformándola en energía eléctrica (Cancino López, 2019).

### **6.6.3 El compostaje**

La fracción orgánica tiene un alto potencial de aprovechamiento que además de brindar beneficios ambientales, productivos y económicos que sirve para el fomento de prácticas agrícolas, de conservación y para el mejoramiento de suelos, por lo que el tratamiento adecuado de este genera productos como la composta convirtiéndose en un recurso potencialmente aprovechable para la conservación del ambiente (DOF, 2018). La composta como alternativa para el tratamiento de los residuos orgánicos trata de un proceso biológico de descomposición aeróbico, en donde se transforman un producto orgánico estable, irreconocible de su estado de origen que es utilizado como fertilizante, en donde suceden cuatro fases: mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración (SEDAR, 2022).

## **6.7 Ingeniería de sistemas**

Un sistema es la combinación de elementos que funcionan juntos para tener la capacidad de requerida para satisfacer una necesidad, el sistema puede incluir hardware, software, equipos, personas, procesos y procedimientos para cumplir con un propósito específico (NASA, 2019).

### **6.7.1 Sistema embebido**

Es un dispositivo electrónico que procesa información digital o analógica que realiza una o varias funciones en tiempo real, su funcionamiento requiere un bajo consumo de energía además que tiene un tamaño reducido, están diseñados para realizar tareas determinadas para ello utilizan uno o varios microcontroladores (Zúñiga, 2024)

### **6.7.2 Microcontrolador**

Es un circuito integrado programable capaz de ejecutar tareas que se grabaron en su memoria, funciona como una unidad computacional que procesa información, la almacena en su memoria y cuenta con periféricos de entrada/salida, está diseñado para administrar tareas específicas en un sistema embebido/integrado sin necesidad de un sistema operativo (Schneider & Smalley, 2024)

### **6.7.3 Sensores y actuadores**

Los sensores son utilizados como recolectores de información sobre su entorno físico y ambiental, mientras que un actuador es un dispositivo que reacciona y se activa con la finalidad de generar un movimiento (Núñez, 2022).

### **6.7.4 Software**

#### **Arduino IDE**

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) que contiene un editor de texto para escribir código que permita conectar microcontroladores y cargar programas para comunicarse con ellos. Esta IDE se encuentra como una aplicación multiplataforma compatible con diversos sistemas operativos y que está escrita en Java. Los programas escritos se llaman bocetos y admite los lenguajes C y C++ en su estructura de código (Universidad Autónoma de México, s.f.)

#### **HTML**

El Lenguaje de Marcado de Hipertexto (HTML) es un entorno que sirve para escribir código que se utiliza para estructurar páginas web y su contenido, dentro del código se puede agregar párrafos, listas, imágenes y tablas, Html no es un lenguaje de programación, es un lenguaje de marcado que permite modificar la apariencia según lo requerido por el usuario (MDN contributors, 2024).

#### **CSS**

La Hojas de Estilo en Cascada (CSS) es el código utilizado para aplicar estilos a elementos en documentos HTML permitiendo dar estilo a una página web. CSS es un lenguaje de hojas de estilo y es necesario su uso en HTML (MDN contributors, 2024).

#### **JavaScript**

Es un lenguaje de programación que puede ser aplicado a un documento HTML para añadir características interactivas a una página web, entre sus funciones puede realizarse juegos, animaciones, gráficos, respuestas a pulsaciones de botones, entre otros (MDN contributors, 2024).

#### **ADAFRUIT IO**

Es una plataforma diseñada para interactuar con datos de un proyecto existente con conexión a internet de manera gratuita, su servicio se basa en la nube diseñado específicamente para proyectos de

Internet de las cosas (IoT) (Adafruit Industries, s.f.), esta plataforma cuenta de dos componentes principales, el primero es el Feed, el cual funciona como una base de datos que puede asociarse a un nombre único y puede almacenar datos de sensores, actualizaciones de estado y entradas de usuario y el segundo, el Dashboard el cual consiste en paneles que permiten proporcionar una interfaz visual para monitorear y controlar los proyectos IoT, los paneles pueden personalizarse utilizando gráficas, medidores, botones, entre otros (IIES, 2024)

## 6.8 Plantas para cultivo

### 6.8.1 *Rhapanus sativus*.

La planta de rábano es una especie comestible que se seleccionó debido a su rápido crecimiento, por lo que a continuación se describen sus características:

**Tabla 1.** *Rhapanus sativus*.

Especie	Descripción	Razones de su elección
<i>Rhapanus sativus</i>	Es una crucífera de raíz comestible que puede cultivarse en todo tipo de zonas templadas (Hernández, 2024).	Resulta ser un alimento bastante digerible, y contiene antioxidantes que ayudan a mantener sano el sistema digestivo (SADER, 2019).

Las semillas fueron obtenidas en el supermercado siendo estas provenientes del “Rancho los molinos”, el producto se encuentra en bolsa hermética y en el sobre se indican sus instrucciones de uso y algunas recomendaciones. La tabla 2 menciona las instrucciones de siembra para cada planta.

**Tabla 2.** Instrucciones de siembra.

Especie	Profundidad de siembra	Distancia entre plantas	Días de germinación	Días de maduración
<i>Rhapanus Sativus</i> (Rábano Champion)	3 mm	5-8 cm	4-6 días	30 días

En cuanto a los requerimientos edafológicos, para su crecimiento óptimo deben mantenerse a lo mencionado en la tabla 3.

**Tabla 3.** Requerimientos edafológicos e indicaciones.

Especie	Temperatura (°C)	Riego	Trasplante	Cuidados
<i>Rhapanus Sativus</i>	18-22	60-65%	Siembra directa	Regar con regularidad

### 6.8.2 *Tradescantia zebrina (matalí).*

Es una planta que se seleccionó por ser del tipo medicinal, sus características se describen a continuación:

**Tabla 4.** *Tradescantia zebrina (matalí).*

Descripción	Razones de su elección	Referencia
Es una planta herbácea con brotes rastreros y hojas canosas con forma de óvalos de color verde en la parte superior y morada en la parte inferior.	Puede ser utilizada como planta de interior, y como planta medicinal a la cual se le atribuye propiedades desinflamatorias, diuréticas y desintoxicantes del riñón, cura contra la disentería y la fertilidad femenina.	Gómez, 2023.

**Tabla 5.** Cuidados de *Tradescantia zebrina (matalí).*

Temperatura (°C)	Siembra	Riego	Luz	Referencias
20-30°C	La siembra se da por medio de esquejes.	2-3 veces a la semana en verano y evitar el exceso de humedad de suelo.	Indirecta	Méndez, 2020

### 6.8.3 *Mangifera indica L. var Ataulfo*

**Tabla 6.** *Mangifera indica L. var Ataulfo*

Descripción	Razones de su elección	Referencias
Es una variedad tropical originaria de México que destaca por sus propiedades sensoriales (sabor, olor y textura), es succulento, carnoso, de forma oval con semilla delgada, además es rico en minerales, fibras y antioxidantes.	Es una fruta originaria de Chiapas que en su interior se encuentra una semilla que puede ser germinado facilitando su reutilización.	Chiguachi J. et. al. (2020) Mendoza H. et. al. (2020)

**Tabla 7.** Cuidados de *Mangifera indica L. var Ataulfo*

Temperatura (°C)	Riego	Luz	Referencias
20-25	Precipitación promedio de 1,000 a 1,500 mm	Directa	SADER, 2023

#### 6.8.4 *Kalanchoe Pinnata*

**Tabla 8.** *Kalanchoe pinnata*

Descripción	Razones de su elección	Referencias
Es una planta no endémica de México, pero muy utilizada por sus propiedades medicinales, posee hojas carnosas, espesas y poco ramificadas y puede llegar a medir un metro de altura.	Si bien no es una planta endémica, ha sido aceptada como planta medicinal en el que el zumo de las hojas ha sido utilizado para el tratamiento de tos, heridas, golpes quemaduras, dolores de cabeza, fiebre, picaduras de insectos esto debido a que ha presentado actividades antitumorales, antihistamínicas, antiinflamatorias, antibacteriana e inmunomoduladoras.	Navarro et. al., 2023

**Tabla 9.** Cuidados de *Kalanchoe pinnata*

Cuidados				
Temperatura (°C)	Siembra	Riego	Luz	Referencias
20-38	Su reproducción se da mediante retoños que crecen en sus hojas.	Bajo	Indirecta	Corredera (2023)

## VII. ANTECEDENTES

Herrera (2018) construyó un invernadero de tres metros cúbicos automatizado para zonas urbanas, en donde controlaba la humedad por medio de microcontroladores con el objetivo de generar una producción constante de alimentos, en donde pudo controlar la temperatura en un rango de 12 a 27 grados centígrados y establecer la humedad del suelo hasta en un 62% ahorrando 20% del agua suministrada.

Hernández (2021) desarrolló un invernadero inteligente a escala para el desarrollo y crecimiento de cualquier tipo de plantas con dimensionamiento fotovoltaico para su sostenimiento eléctrico. En su estudio utilizó Rábano e implemento las herramientas de IoT y la plataforma ThinkSpeak para almacenar información y monitorear los cultivos otorgando a las plantas luz artificial a 400-700 nm, siendo la luz azul y roja la utilizada.

Suárez y Valverde (2023) implementaron un sistema inteligente en un invernadero para cultivo de hortalizas utilizando tecnología IoT y energía solar mediante un Raspberry Pi 4 logrando recopilar y almacenar datos para observarlas en tiempo real mediante un dashboard que muestra el comportamiento de cada una de las variables medidas en el invernadero mediante servicios IoT tales como Mosquitto, InfluxDB y Grafana, teniendo un ambiente controlado en el que cultivo rábano.

Chasiluisa en 2020 desarrollo el diseño y construcción de un sistema automático de control y monitorización del microclima de un invernadero que utilizó varios nodos de monitoreo de variables ambientales para medición y con el valor obtenido generar acciones de activación para manipular el clima a conveniencia, al no poseer una red de internet en el invernadero implemento tecnología LoRa produciendo una comunicación a 433 MHz de frecuencia para analizarlos posteriormente en la base de datos Firebase que permite interactuar en tiempo real con una pc o por medio de una aplicación móvil, esto simulado en Unity 3D.

Tapia y Torres (2023), desarrollo un cultivo vertical de especies vegetales para uso medicinal en una comunidad indígena en el que integro un sistema de cultivo vertical, un sistema hídrico y un sistema de energías renovables, el enfoque de riego automático ayudó en la productividad de las plantas medicinales, ya que garantizó que recibieran la cantidad precisa de agua entre 80-90% de acuerdo a la humedad requerida de las plantas mediante sensores de humedad de suelo y Arduino.

## VIII. METODOLOGÍA

### 8.1 Diseño de investigación

Para el presente trabajo se realizó la investigación de tipo cuantitativa que, de acuerdo a Sampieri & Mendoza (2018), la investigación cuantitativa consiste en recolectar y analizar datos que se encuentran en forma de números y se deben analizar con métodos estadísticos, además de la investigación de tipo aplicada, en el cual se plantea resolver problemas prácticos y mejorar la eficacia de los procesos y tecnologías existentes (Monjarás et.al., 2019),

### 8.2 Diseño del sistema

El diseño metodológico de este trabajo se basa en el enfoque de ingeniería de sistemas, específicamente del *Systems Engineering Handbook* (NASA, 2016), que fue seleccionado por su carácter estructurado y adaptable a distintos proyectos. Esta metodología fue ajustada al contexto de este proyecto enfocado en la agricultura y uso de tecnología, con el fin de asegurar que el sistema embebido cumpla con los requisitos establecidos. Para ello se siguió una secuencia de fases representadas en la figura 4:

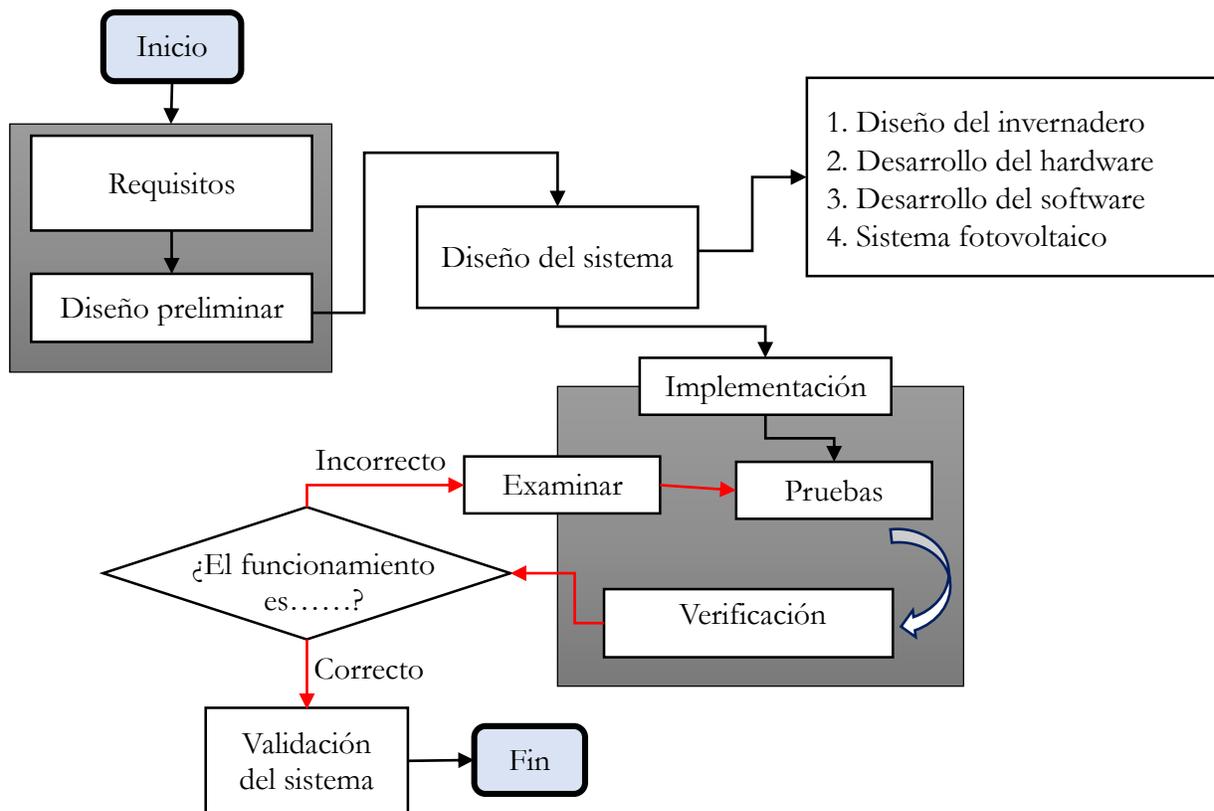


Figura 4. Proceso de investigación

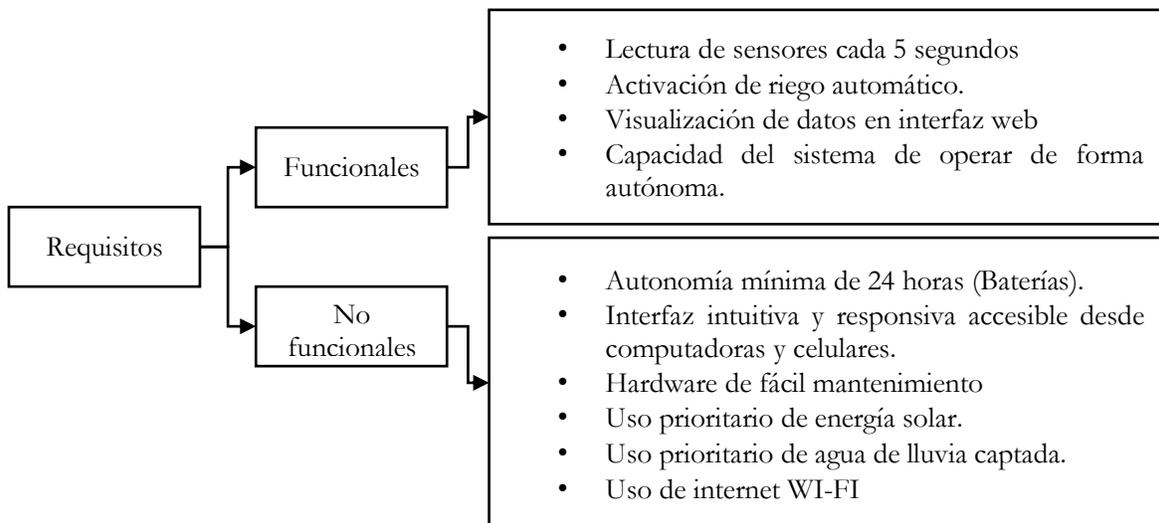
### 8.3 Requisitos para su funcionamiento

#### Requisitos:

Para la implementación se obtienen los siguientes requisitos:

1. Integración de un sistema de riego automático que, mediante sensores de humedad de suelo, se active de acuerdo a lo requerido por la planta.
2. Diseño e integración de tecnologías ambientales para optimizar los recursos disponibles y mantener un ciclo de uso continuo.
3. Minimizar la dependencia de recursos externos.
4. El monitoreo en tiempo real las condiciones ambientales mediante una interfaz web que reciba datos de un sistema embebido conformado por sensores y actuadores.

Basado en lo anterior la figura 5 muestra los requisitos funcionales (lo que hace el sistema integral) y no funcionales (como lo hace):



**Figura 5.** Requisitos funcionales y no funcionales del sistema. Fuente: elaboración propia

#### Para la validación del sistema se toma en cuenta lo siguiente:

- Variables a medir: Crecimiento de plantas con y sin el sistema.
- Indicadores de éxito: Obtener agua de lluvia suficiente para riego, obtener composta como sustrato, mantener el sistema embebido en funcionamiento con el uso de un sistema fotovoltaico, sistema embebido e interfaz de usuario funcional.

## 8.4 Diseño Preliminar

Se muestra de manera general un diagrama sobre las partes que componen el proyecto y la tecnología utilizada en base a las necesidades y requerimientos que conforma el sistema integral.

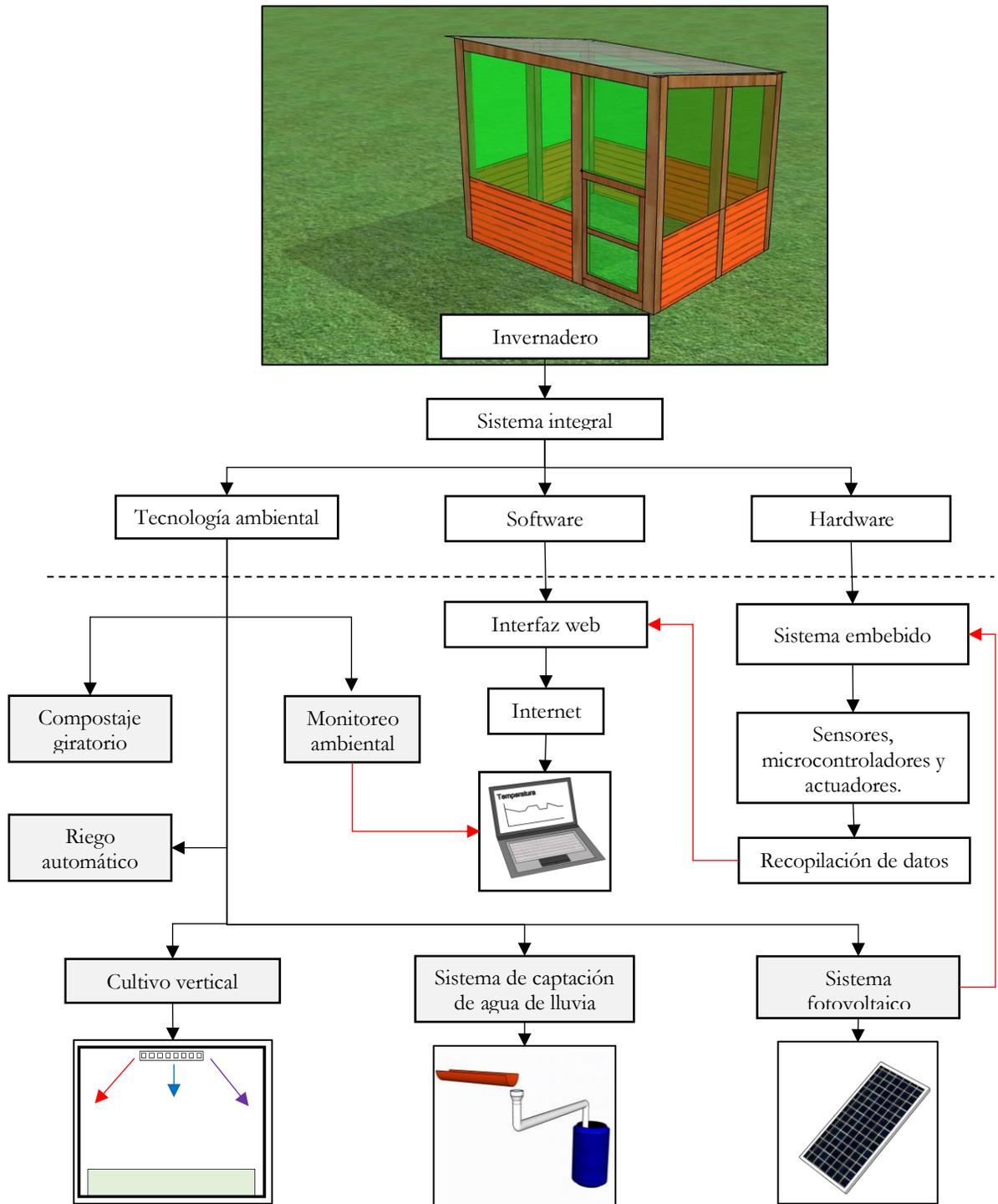


Figura 6. Estructura general del sistema. Fuente: Elaboración propia

## IX. RESULTADOS

### 9.1 Diseño del sistema

#### 9.1.1 Invernadero

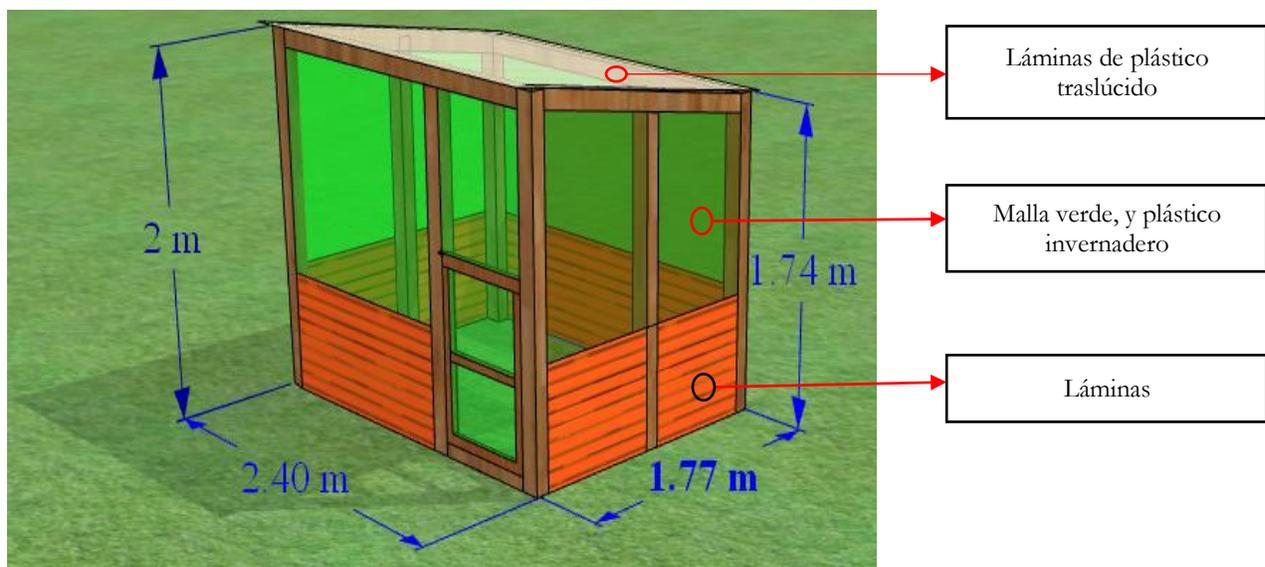
El presente estudio se llevó a cabo en el municipio de Pantepec, Chiapas ubicado en la zona norte del estado, el cual es conocido por sus actividades agrícolas y pecuarias, con un uso de suelo distribuido en 30.42% de pastizal cultivado, 3.30% para agricultura y 0.57% de zona urbana (INEGI, 2010), por lo que el drenaje, agua potable y energía eléctrica no es accesible en todo el municipio.

Las condiciones climáticas del área de estudio se describen en la tabla 10.

**Tabla 10.** Condiciones climáticas en el área de implementación.

Ubicación	Pantepec, Chiapas		Referencias
Clima	Cálido húmedo con lluvias todo el año.		CEIEG, 2024
	24-27 °C Mayo a octubre	15-18 °C Noviembre a abril	
Precipitación	1700-2000 mm Mayo a octubre	1000-1200 mm Noviembre a abril	

Se realiza el diseño de un invernadero media agua con caída del techo a un solo lado con 4.248 m<sup>2</sup> de área, la estructura está hecha de postes de madera, como cubierta lateral se utilizó malla sombra verde que permite la ventilación natural, en la parte baja se encuentra rodeado de lámina reutilizada para mayor protección de los cultivos. El techo de lámina plástica translúcida como material resistente que permite el paso de luz indirecta y la captación del agua de lluvia.



**Figura 7.** Partes que conforman la estructura del invernadero. Fuente: Elaboración propia.

### 9.1.2 Diseño interior.

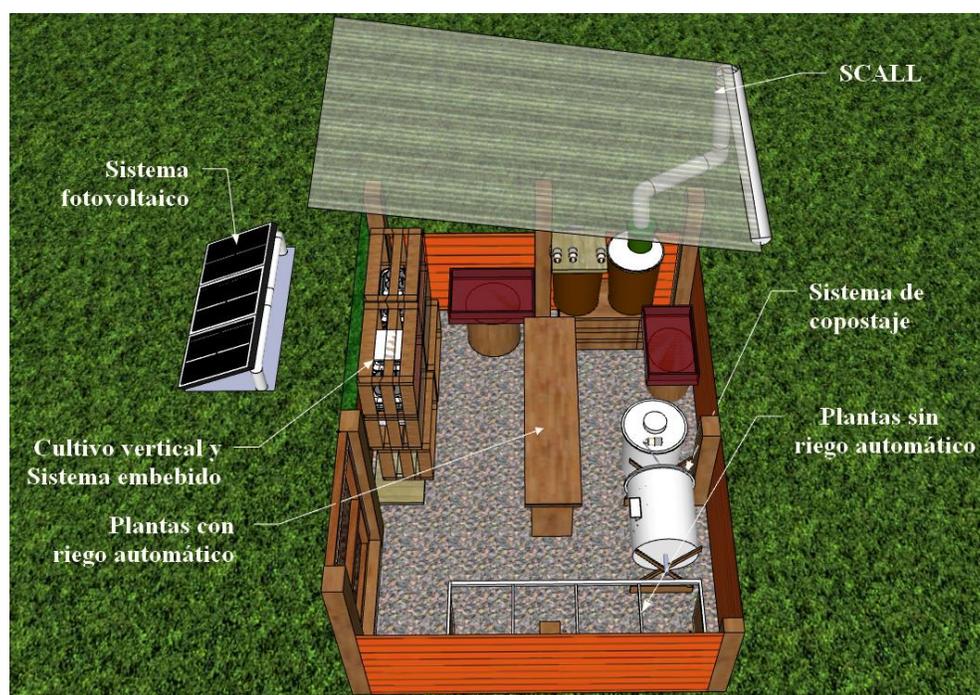
Para la optimización de espacios se realizó el diseño interior con el fin de ubicar las partes necesarias para el correcto funcionamiento, simplificando la recolección, movimiento de plantas, el mantenimiento y limpieza.

En la figura 8 se puede observar las tecnologías mencionadas en la figura 5 siendo el sistema de captación de agua de lluvia, el cultivo vertical para germinación de plantas utilizando luz artificial mediante un estante en donde también se ubica el sistema embebido y el compostaje giratorio que se encuentran en el interior del invernadero.

Se ubicaron dos espacios distintos para el riego:

1. Riego automático: riego por goteo con sensores de humedad y bombas de agua.
2. Sin riego automático: Riego manual sin sensores.

El diseño es de tipo modular, que permita mantener movilidad a través de pasillos estrechos con acceso seguro evitando dañar las plantas al caminar, además de que la siembra de plantas es a través de macetas y charolas (bandejas) que permiten reorganizar el espacio según las necesidades requeridas.



**Figura 8.** Diseño interior del invernadero. Fuente: Elaboración propia.

### 9.1.3 Sistema de captación de agua de lluvia

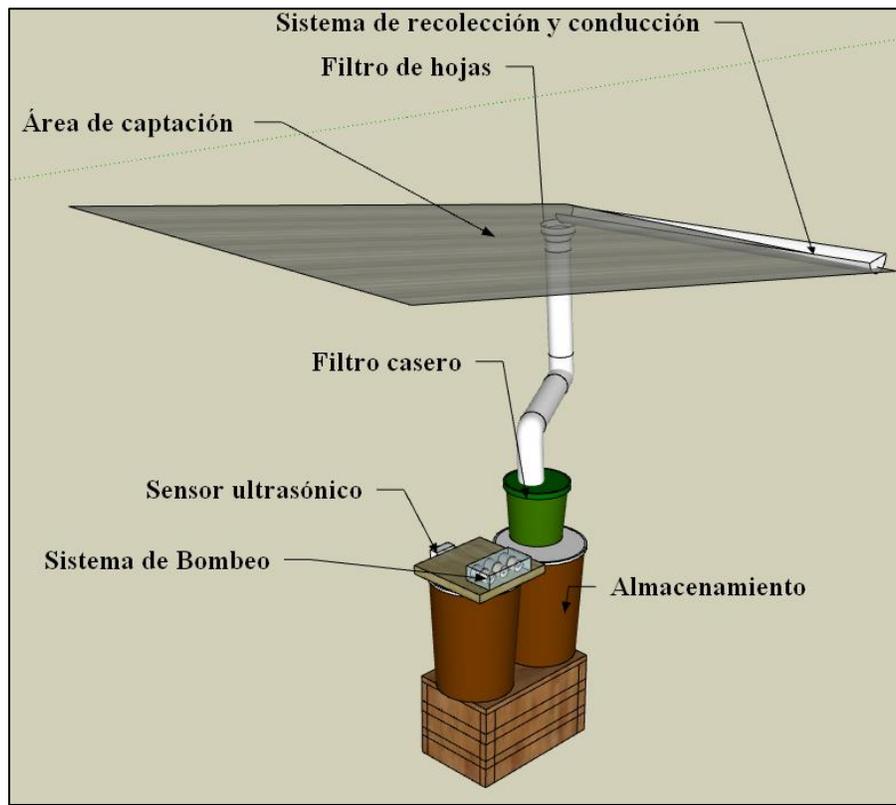


Figura 9. Diseño del SCALL. Fuente Elaboración propia.

Para el sistema de riego se implementó un sistema de captación de agua de lluvia utilizando tubos de PVC y siguiendo el manual de instalación del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, considerando lo siguiente:

1. Área de captación: el techo de láminas de plástico con un área de 2. 928 m<sup>2</sup>.
2. Línea de conducción: canaletas, tuberías y accesorios de PVC donde será conducido el agua, la canaleta cuenta con una medida de 1.2 metros.
3. Filtro de hojas: después de la canaleta, la caída del agua pasa por un filtro de hojas hecho con una reducción de PVC 4" a 3", con una malla para evitar el paso de ramas, hojas u otros objetos que puedan ocasionar obstrucciones en la tubería.
4. Filtro casero: filtro para sedimentos como tierra y polvo que pueda obstruir las bombas de agua, y ensuciar los depósitos, construido en un contenedor de plástico, en donde se añadieron capas de algodón, grava y arena fina.
5. Depósito: dos contenedores de 20 L donde se almacenará el agua, y una de repuesto para llenado automático.

Para conocer la cantidad en m<sup>3</sup> recolectados en un mes se siguió la siguiente fórmula:

$$Vc = \frac{P * A * Kc}{1000}$$

En donde:

- Vc: es el agua recolectada en m<sup>3</sup>, (Volumen captado)
- P: es la precipitación del área en donde está ubicado el SCALL, (tabla 6).
- A: es el área de captación, siendo 2. 928 m<sup>2</sup>.
- Kc: es el coeficiente del material del que está hecho el área de captación, que al ser plástico equivale a 0.95.

Resolviendo la ecuación se obtiene cómo resultado lo siguiente:

**Tabla 11.** Cantidad de agua recolectada.

Cantidad de agua recolectada	
Mayo-Octubre	Noviembre-Abril
Entre 4.73 y 5.5632 m <sup>3</sup>	Entre 2.7816 y 3.338 m <sup>3</sup>

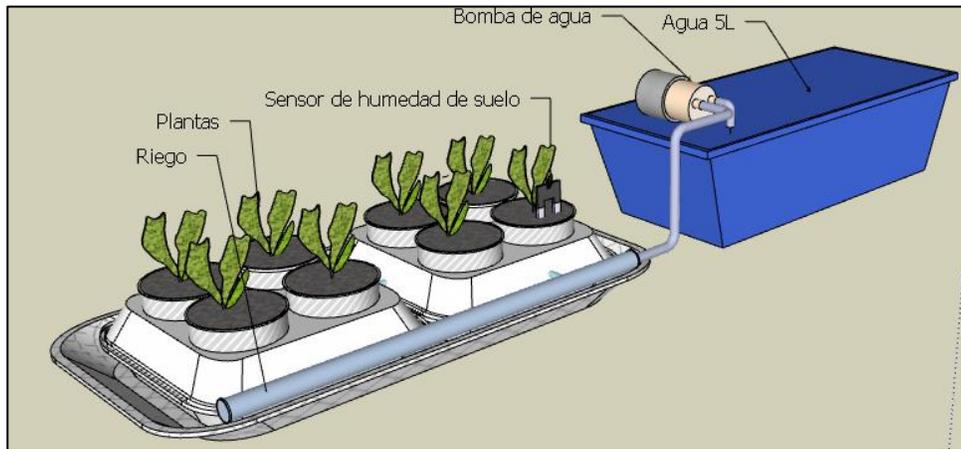
#### 9.1.4 Cultivo vertical

Se diseñó e implemento un cultivo vertical en un estante hecho de rejas de madera de 50 cm \* 30 cm, esto como una solución para maximizar el uso de espacios logrando germinar y mantener en crecimiento de plantas, obteniendo las siguientes ventajas.

- Ahorro de espacio
- Ahorro de agua
- Control de riego y ajuste de luz artificial.

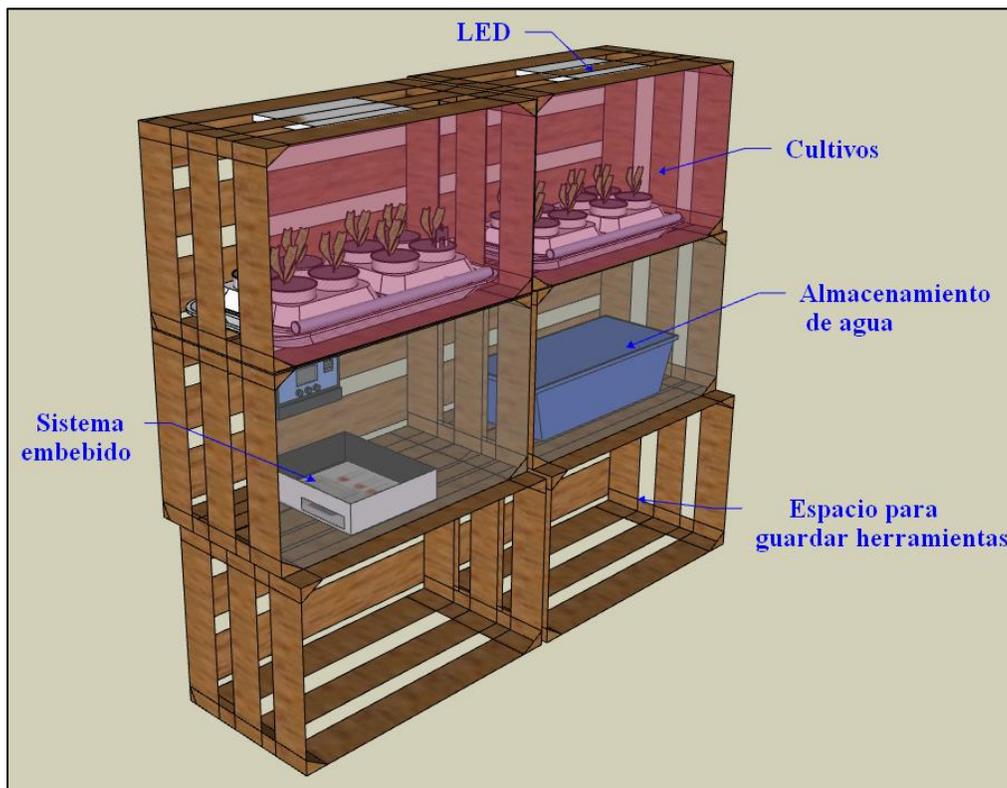
Su diseño se basa en una estructura de madera, en el cual se apilo 6 rejas utilizando 3 de estas para el cultivo vertical, siendo dos para las plantas y uno para el recipiente de agua con capacidad de 5 litros. El sistema cuenta con iluminación artificial utilizando LED del espectro completo, un sensor de humedad de suelo que funciona con riego por capilaridad (figura 10).

La figura 10 muestra los componentes del cultivo vertical:



**Figura 10.** Componentes del cultivo vertical. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11 se observa el diseño general del estante donde se encuentra colocado el cultivo vertical.



**Figura 11.** Cultivo vertical. Fuente: Elaboración propia.

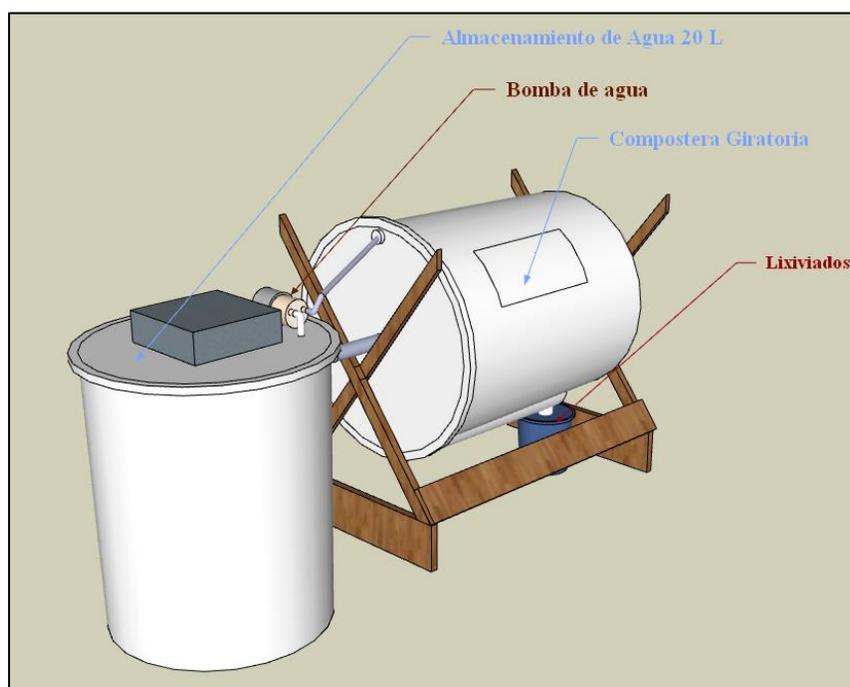
### 9.1.5 Sistema de compostaje giratorio

Se implementó un sistema de compostaje giratorio, en el que, para la elaboración del compost, se siguió “El manual práctico de elaboración de bioensumos” de la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (2022), el material utilizado fueron residuos orgánicos (cascaras de frutas y vegetales), residuos verdes (hojas de diferentes cultivos), hojas secas y tierra o composta terminada.

Se utilizó un contenedor cilíndrico de 20 L el cual se insertó un tubo en el centro y posteriormente se fijó en una estructura de madera cómo se observa en la figura 12, el contenedor cuenta con agujeros para ventilación, esto se debe a que se trata de un proceso del tipo aeróbico y una puerta de acceso que servirá para agregar los residuos orgánicos y retirar el compost, por lo que su diseño permite menor esfuerzo lo que indica una mayor facilidad de uso, en la parte inferior un recipiente para drenar lixiviados en caso de ser necesarios.

Su diseño compacto permite ocupar menor espacio que una pila de compost tradicional, por lo que puede colocarse dentro del invernadero y al mantener una estructura cerrada evita accesos no deseados.

A su costado se encuentra un contenedor de 20 litros en dónde se almacena agua de lluvia para riego automático mediante una bomba de agua controlado por un sistema embebido, además de sensores para el monitoreo de la humedad del suelo y la temperatura.



**Figura 12.** Sistema de compostaje giratorio. Fuente: Elaboración propia

## 9.2 Desarrollo del Hardware

### 9.2.1 Arquitectura del sistema embebido

Se muestran la arquitectura general que conforman el hardware destacando el microcontrolador Esp8266 encargado del envío de datos al servidor web.

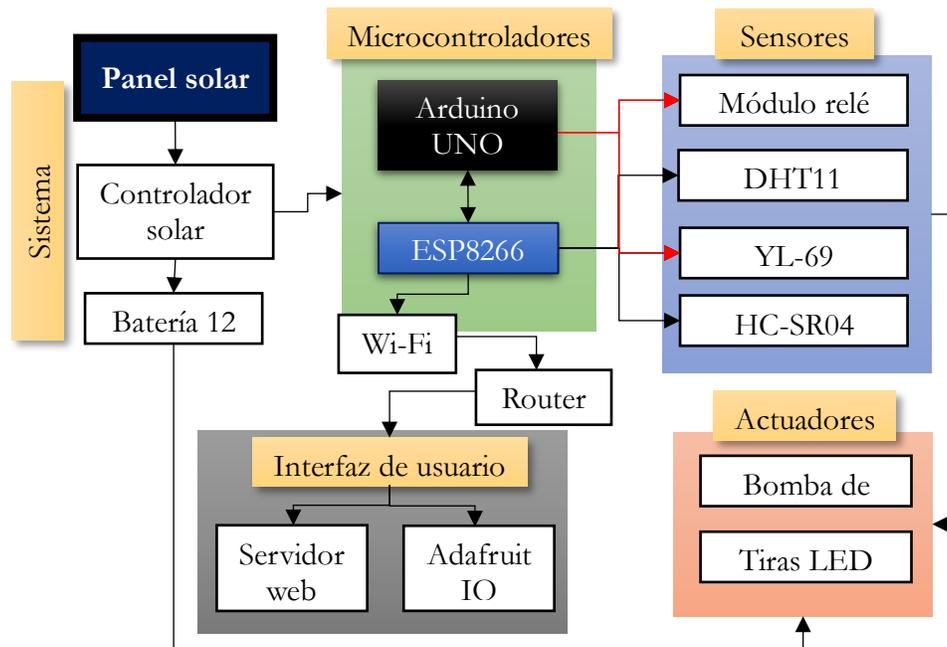


Figura 13. Arquitectura de los componentes para el sistema embebido. Fuente: Elaboración propia

### Componentes

La tabla 12 describe las funciones de los componentes utilizados en el entorno de desarrollo del sistema embebido.

Tabla 12. Descripción y funciones de los componentes.

Componentes	Tipo	Función establecida en el sistema embebido
	Microcontrolador	Automatizar el riego mediante sensores de humedad.
	Microcontrolador integrado con conexión Wi-Fi	Recopilar y enviar datos sobre el estado de los sensores a la interfaz web.

	Sensor DS18B20	Medir temperatura del suelo del compost.
	Sensor DHT11	Medir la temperatura y humedad relativa.
	Sensor HC-SR04	Medir la distancia de un objeto, siendo su uso la medición del nivel del agua en los contenedores.
	Sensor YL-69	Medir la humedad de suelo de las plantas, el compost y cultivos.
	Módulo Relé	Activar y desactivar los actuadores.

### 9.2.2 Sistema embebido

El sistema principal consta de un esp8266 para envío de datos a plataforma de un sensor de humedad de suelo, un sensor DHT11 y un sensor ultrasónico.

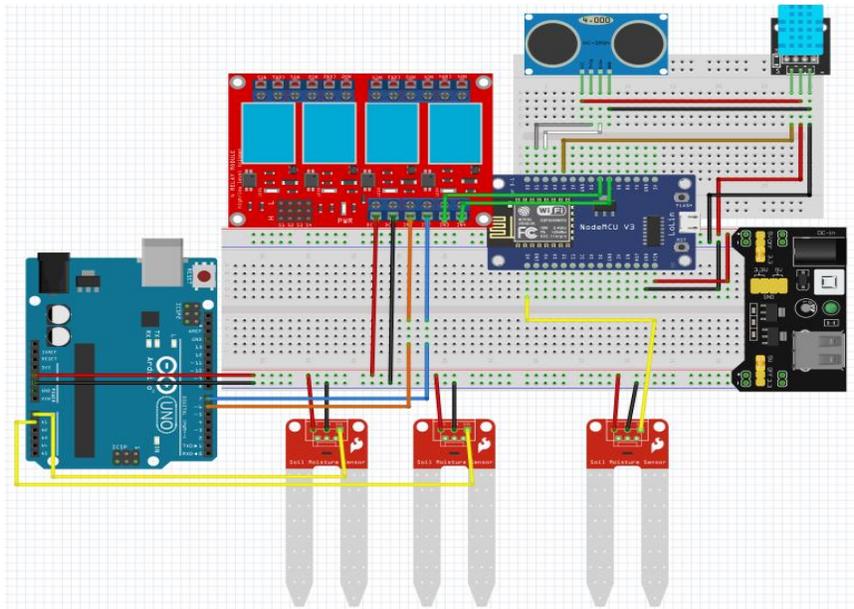


Figura 14. Diagrama electrónico del Sistema embebido principal. Fuente: Elaboración propia

Para la lectura de datos y tareas realizadas por el Esp8266, se diseñó el siguiente algoritmo, en el que tendrá la tarea de llenar el tanque de agua cuando el nivel sea menor a 50% y encender la bomba de agua en el cultivo vertical a configuración de la humedad de la planta que se encuentre.

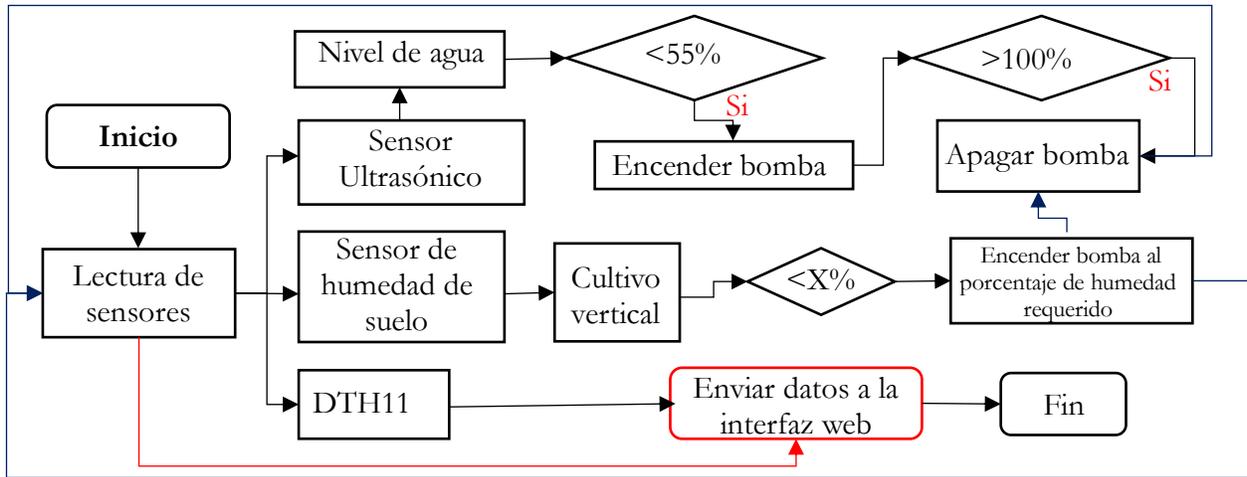


Figura 15. Diagrama de flujo para el esp82666. Fuente: Elaboración propia.

Para gestionar la automatización del riego, la placa Arduino UNO R3 se encuentra conectado a 2 sensores de humedad de suelo, para dos porcentajes de humedad distintos, por lo cual se diseñó el siguiente algoritmo:

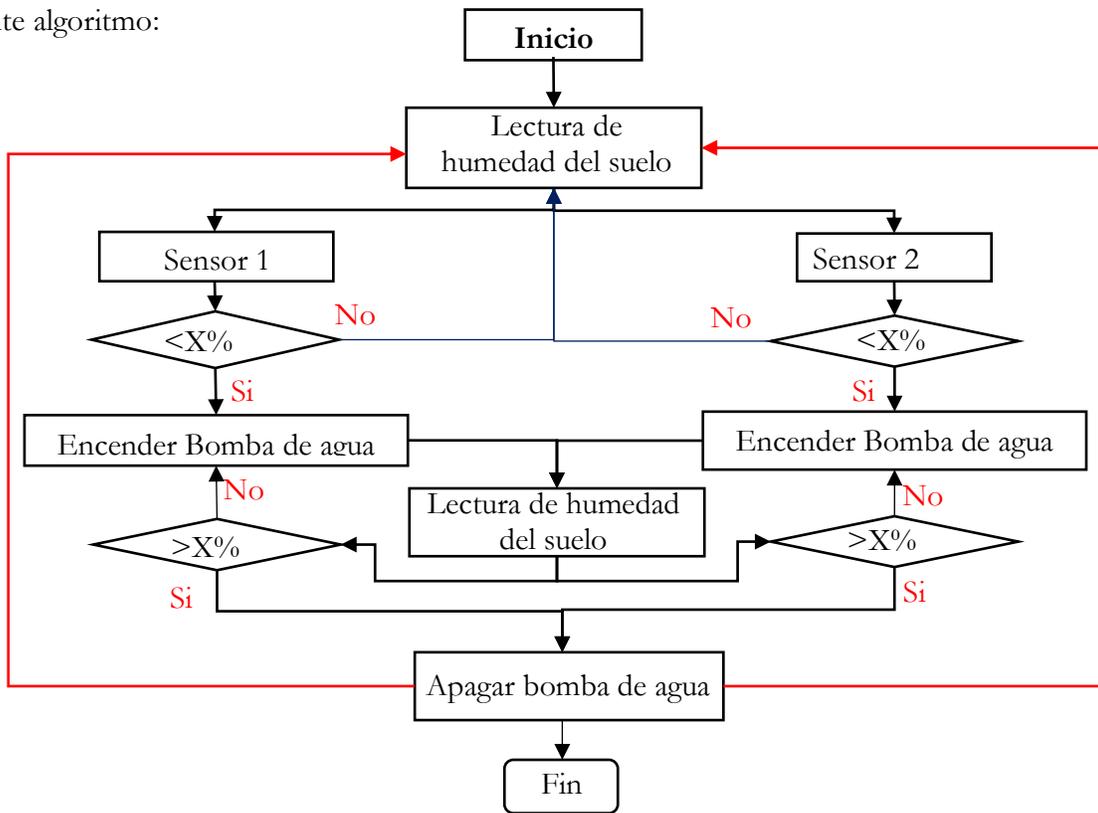
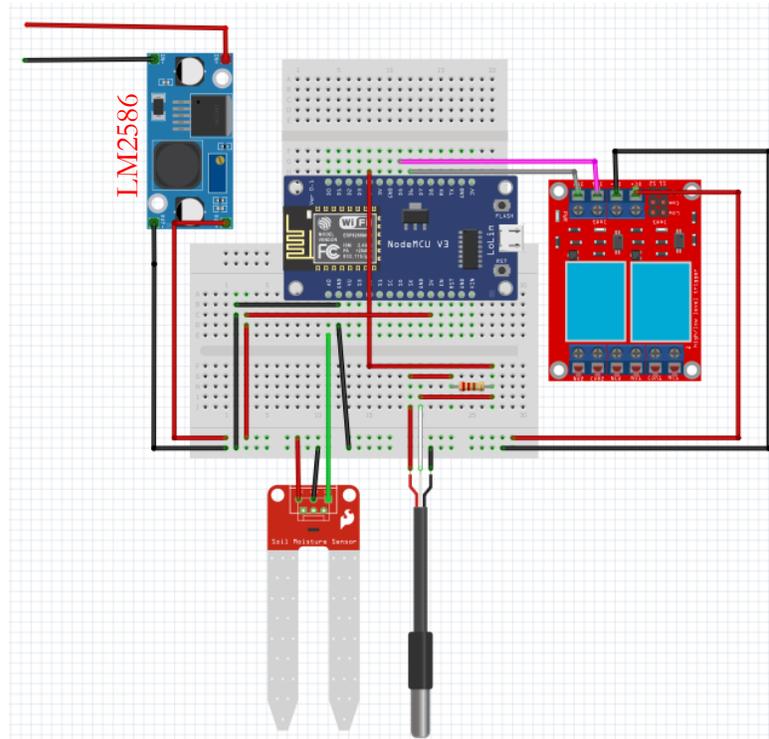


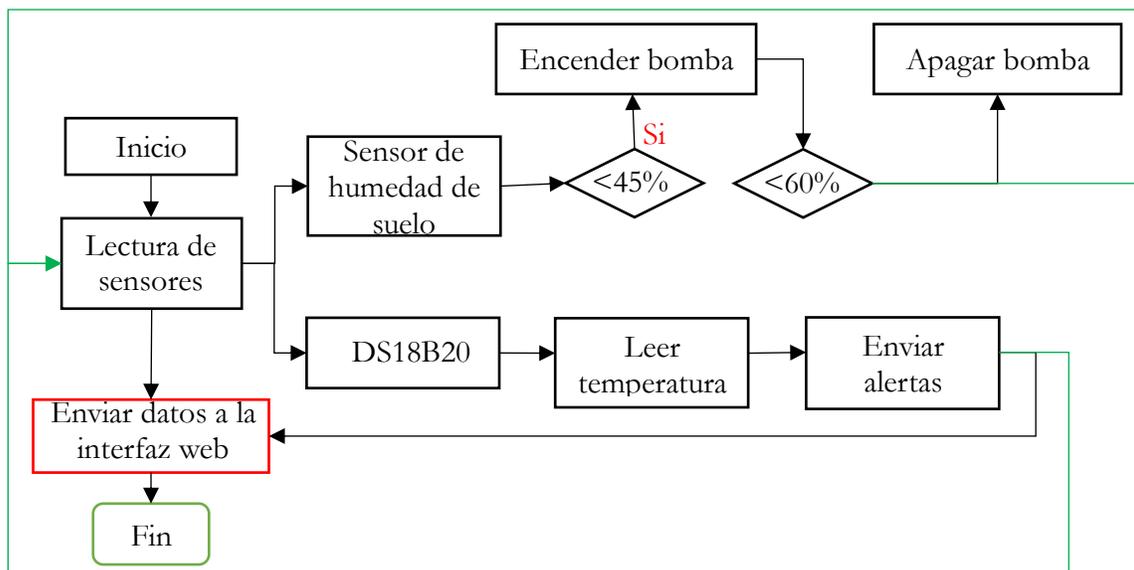
Figura 16. Diagrama de flujo para el Arduino UNO. Fuente: Elaboración propia.

Para el monitoreo y riego automático en el compostaje se utilizó el siguiente diagrama electrónico:



**Figura 17.** Diagrama electrónico para el sistema de compostaje. Fuente: Elaboración propia.

Su funcionamiento se basa en el siguiente algoritmo:



**Figura 18.** Diagrama de flujo del sistema embebido del compostaje. Fuente: Elaboración propia.

### 9.3 Desarrollo del software

La interfaz web se diseñó a partir de los lenguajes HTML, JavaScript y CSS, de manera que permita al usuario acceder a una IP local para la visualización de datos de los sensores en una computadora o un celular, cuenta con un panel de control del lado izquierdo para realizar acciones remotas del control de actuadores para verificar su funcionamiento, gráficas de humedad y temperatura relativa del sensor DHT11 con acción de descarga en formato PNG, nivel del agua del tanque de almacenamiento y humedad del suelo mediante animaciones para una mejor observación (figura 19). Su uso principal es para mantenimiento y verificación del funcionamiento de los sensores y actuadores.



Figura 19. Interfaz web HTML de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

#### 9.3.1 Adafruit IO

La interfaz local permite al usuario utilizar la plataforma únicamente en el rango de alcance del router, por lo que para su observación en otros dispositivos fuera de esta red se optó por el uso de la plataforma Adafruit IO, el cual permitirá administrar, monitorear y controlar los datos del esp8266 de manera gratuita, pero con Feeds (base de datos temporal) limitados.

Una vez realizado el registro, se deben seguir los siguientes pasos: crear un tablero donde se van a colocar las acciones (feeds) necesarias, descargar las librerías necesarias para el esp8266 por lo que en el código se incluye lo siguiente:

Librerías:

```
#include <Adafruit_MQTT.h>
#include <Adafruit_MQTT_Client.h>
```

Usuario y llave:

```
#define AIO_USERNAME "Usuario"
#define AIO_KEY "Llave"
```

Envío de datos

```
Adafruit_MQTT_Publish temperatureFeed = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME
"/feeds/ dependerá de la acción requerida (Feed Name)");
```

## Dashboard para el sistema principal del invernadero

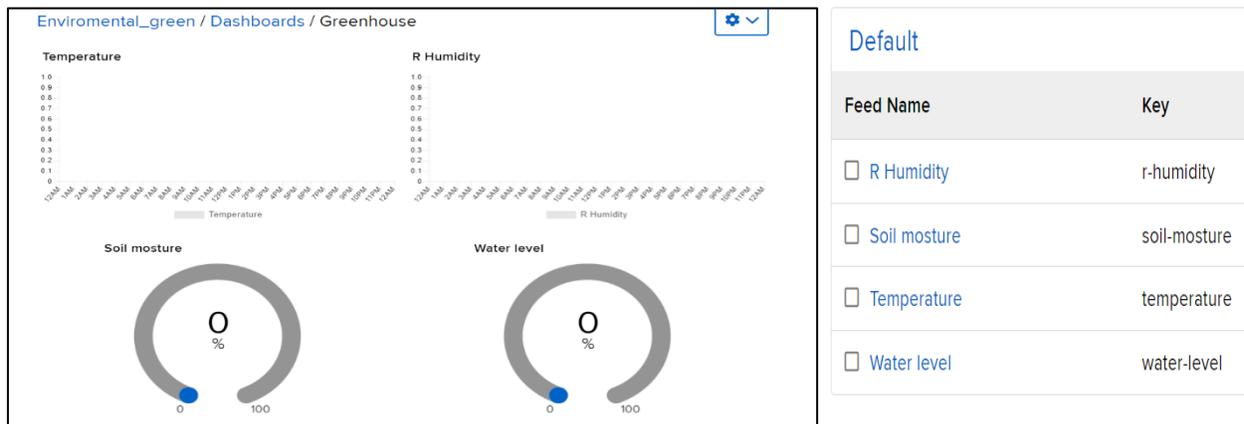


Figura 20. Interfaz de usuario general. Fuente: Elaboración propia.

## Dashboard de la interfaz de usuario para visualización del compostaje.

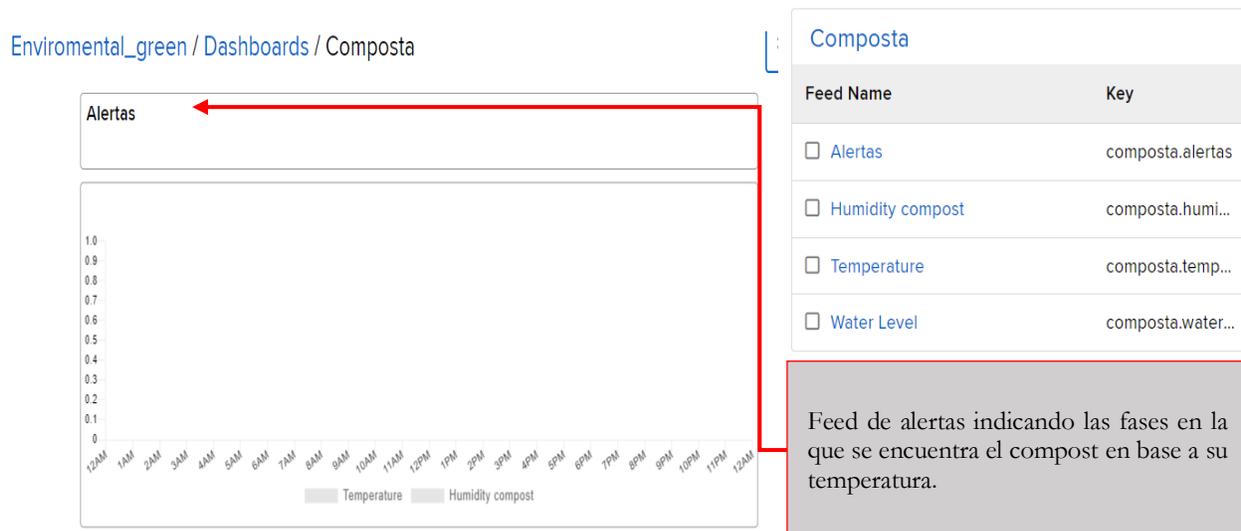


Figura 21. Interfaz web de usuario del sistema de compostaje. Fuente: Elaboración propia.

### 9.3.2 Página web

La página principal se diseñó con HTML y JavaScript, creado como página de acceso público utilizando un repositorio en GitHub, en esta página se podrá acceder a la interfaz web local de la figura 19 mediante un usuario y contraseña, ya que es la página donde se encuentra el control remoto de los relés, mientras que los otros dos botones dirigen a la página de Adafruit IO, en donde podrá observarse las gráficas y estado de los sensores sin necesidad de iniciar sesión.

Los botones azules redirigen a links externos para acceder a la lectura de este trabajo, al correo electrónico y al repositorio de GitHub público donde se encuentra el código de la página web.



Figura 22. Página de acceso principal. Fuente: Elaboración propia.

## 9.4 Sistema fotovoltaico

El diseño del sistema fotovoltaico permitió proveer energía suficiente para el consumo eléctrico del sistema embebido mediante el uso de paneles solares, acumuladores energéticos (baterías), un regulador de carga y reguladores de voltaje, ya que al ser cargas de corriente directa no se necesita de un inversor.

**Calculo del consumo energético por componente:**

**Tabla 13.** Consumo eléctrico diario.

Componentes	Cantidad	Consumo (W)	Voltaje (V)	Tiempo de uso (horas)	Energía diaria (Wh)
Esp8266	2	0.528	3.3	24	12.672
Arduino UNO R3	1	0.25	5	24	6
YL-69	4	0.06	5	24	1.44
DHT11	1	0.0125	5	24	0.3
HC-SR04	1	0.075	5	24	1.8
Módulo relé 4 puertos	1	0.4	5	24	9.6
Módulo relé dos puertos	1	.2	5	24	4.8
DS18B20	1	0.005	5	24	0.12
Bomba de agua	4	24	12	0.17	4.08
Tira LED	1	4.8	12	10	48
<b>Total</b>					<b>88.332</b>

**Dimensionamiento del panel solar:**

Suponiendo 5 horas solares pico:

$$\frac{\text{Consumo diario}}{\text{HPS}} * 1.2 = \frac{88.332}{5} * 1.2 = 21.2 \text{ W}$$

### Batería:

$$\frac{Wh}{V \text{ batería}} * 1.2 = \frac{88.332}{12} * 1.2 = 9.5693$$

Batería usada: Batería recargable sellada de ácido-plomo de 12V, 12Ah. Y Regulador de carga utilizado: Regulador Controlador De Panel Solar Pwm De 30 A, 12-24v, con puerto USB.

### Autonomía Necesaria

$$E_{\text{batería}} = 12V * 12Ah = 144 Wh$$

$$\text{Autonomía} = \frac{E_{\text{batería}}}{\text{Consumo Diario}} = \frac{144 Wh}{88.332 Wh} = 1.63 \text{ días}$$

### Esquema de conexión

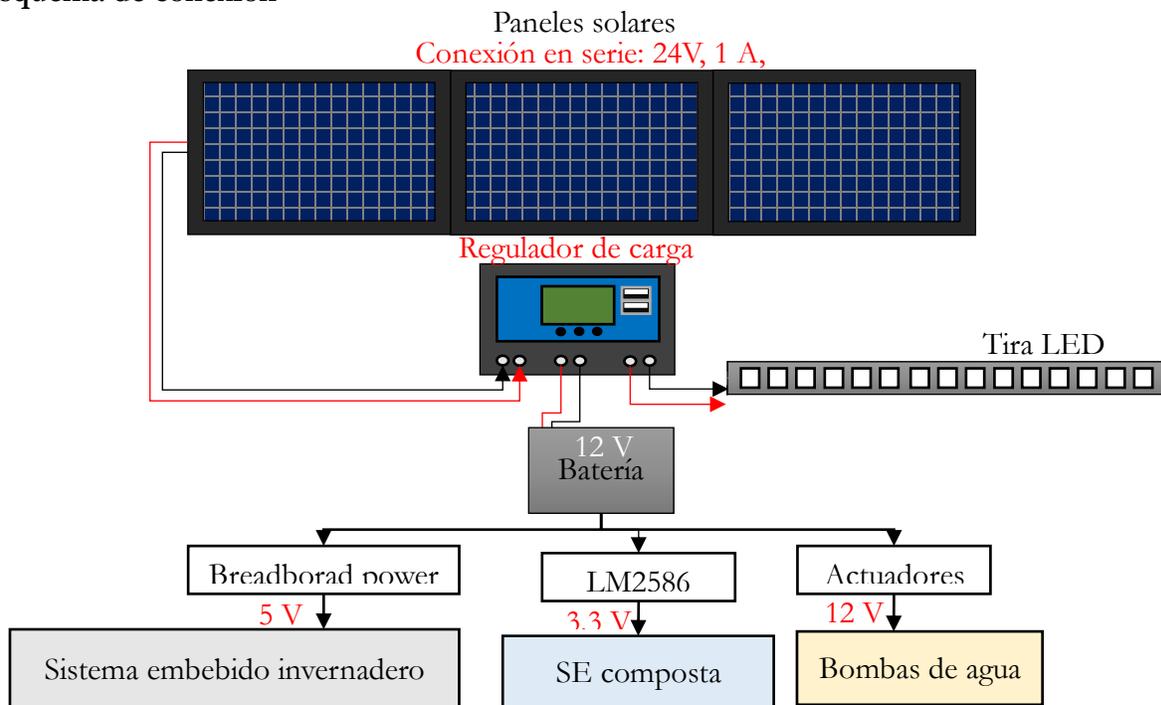


Figura 23. Esquema de conexión fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.

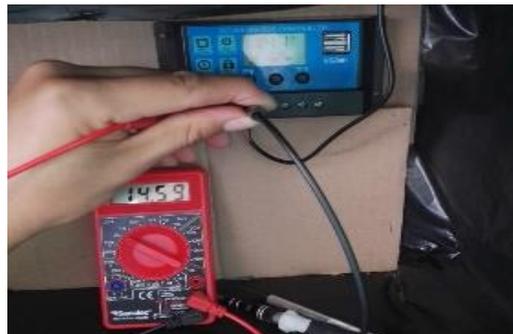


Figura 24. Regulador de carga. Fuente: Elaboración propia.

## 9.5 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA.

### 9.5.1 Calibración de sensores de humedad de suelo

Para la calibración de sensores de humedad se utilizó el siguiente código:

```
1  const int sensorPin1 = A0;
2  const int sensorPin2 = A1;
3  const int sensorPin3 = A2;
4  int sensorValue1 = 0;
5  int sensorValue2 = 0;
6  int sensorValue3 = 0;
7  void setup() {
8  Serial.begin(9600);
9  }
10 void loop() {
11 sensorValue1 = analogRead(sensorPin1);
12 sensorValue2 = analogRead(sensorPin2);
13 sensorValue3 = analogRead(sensorPin3);
14 Serial.print("Sensor 1: ");
15 Serial.print(sensorValue1);
16 Serial.print(" | Sensor 2: ");
17 Serial.print(sensorValue2);
18 Serial.print(" | Sensor 3: ");
19 Serial.println(sensorValue3);
20 delay(4000);
21 }
```

Utilizando el código anterior se realizó la lectura de los sensores, para ello se conectaron tres sensores a un Arduino UNO R3, para proceder con la lectura de tres sensores yl-69 en suelo completamente seco y completamente húmedo, para su posterior calibración.

```
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1019 | Sensor 3: 1020
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1018 | Sensor 3: 1020
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1019 | Sensor 3: 1020
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1019 | Sensor 3: 1019
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1018 | Sensor 3: 1019
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1018 | Sensor 3: 1018
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1018 | Sensor 3: 1019
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1018 | Sensor 3: 1019
Sensor 1: 1018 | Sensor 2: 1018 | Sensor 3: 1019
Sensor 1: 1017 | Sensor 2: 1018 | Sensor 3: 1019
```

**Figura 25.** Valores cuando los sensores están en seco: Fuente: Elaboración propia.

El valor más alto obtenido corresponde a cuando el sensor se encuentra en un suelo completamente seco, y el valor mínimo cuando el sensor detecta un suelo completamente húmedo, por lo que para su calibración se tomó los datos obtenidos en el monitor serie mostradas en las figuras 25 y 26, siendo estos 1018 en seco y 300 en húmedo.

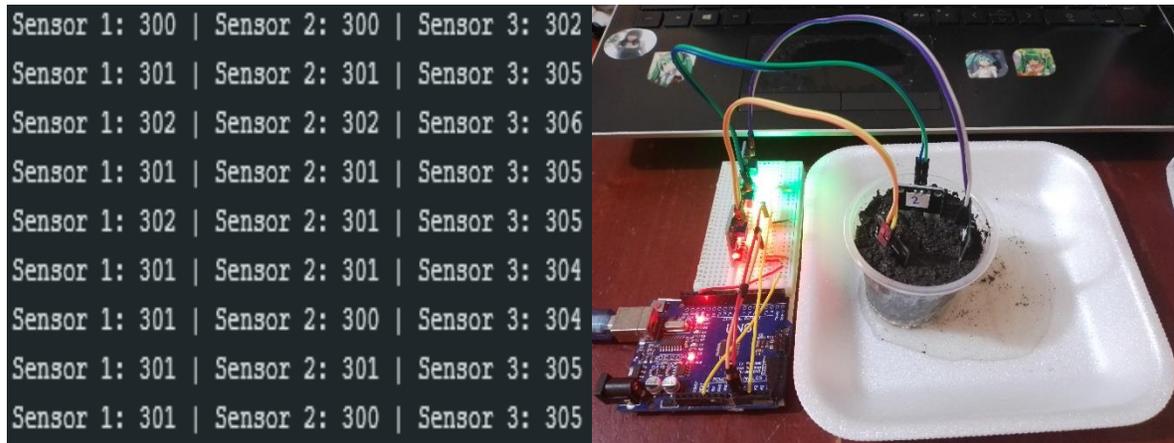


Figura 26. Valores cuando los sensores están en suelo completamente húmedo. Fuente: Elaboración propia.

### 9.5.2 Pruebas de del hardware

Una vez calibrados los sensores, se realizó la conexión y carga del código al sistema embebido, donde para el microcontrolador Arduino, se obtuvo los valores esperados siguiendo el diagrama de flujo de la figura 16, observando en el monitor serie los datos que corresponden a la humedad del suelo y el encendido/ apagado de las bombas de agua.

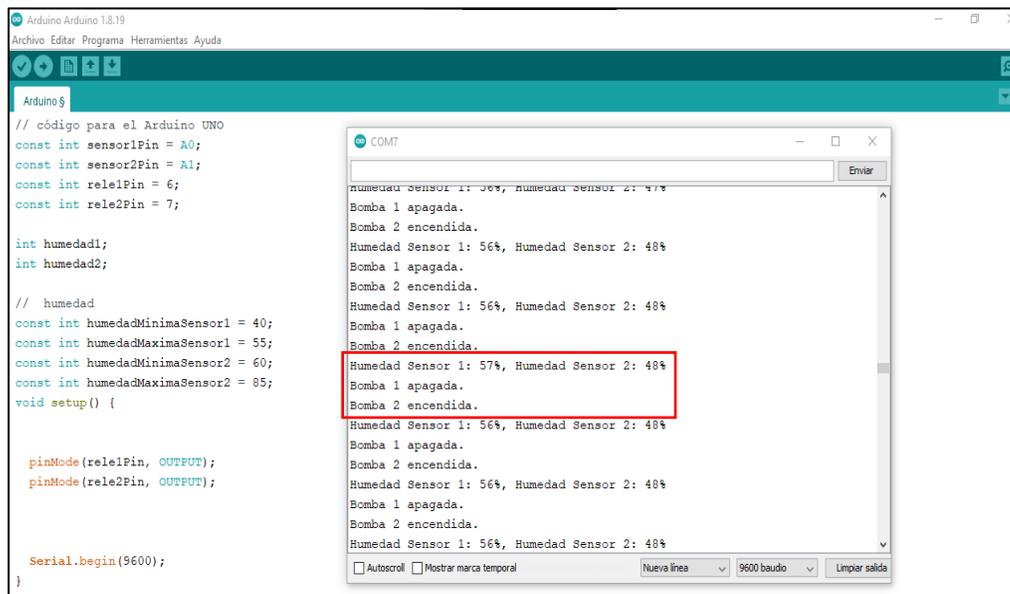


Figura 27. Valores cuando los sensores están en suelo completamente húmedo. Fuente: Elaboración propia.

En donde el sensor 1 corresponde a las plantas que necesitan al menos 50 % de humedad de suelo, por lo que al mantenerse mayor a la humedad requerida se apaga la bomba, mientras que en el sensor 2 para las hortalizas la humedad se encuentra menor a lo requerido por lo cual se enciende la bomba.

### Envío de datos

Para el microcontrolador esp8266, quien tiene la tarea de enviar datos para su observación web, se debe tomar en cuenta que para su conexión a internet debe escribirse el nombre de la red (SSID) y la contraseña, y para la obtención de la IP se escribe un Serial.print para su vista en el monitor serie como se muestra en el siguiente código:

```
1  WiFi.begin(ssid, password);
2  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
3    delay(1000);
4    Serial.println("Connecting...");
5    Serial.println("Conectado a la red WiFi");
6    Serial.print("Dirección IP: ");
7    Serial.println(WiFi.localIP());
8  }
```

La figura 28 muestra el resultado del código obteniendo la IP, que al colocarlo en cualquier navegador se puede observar la interfaz web.

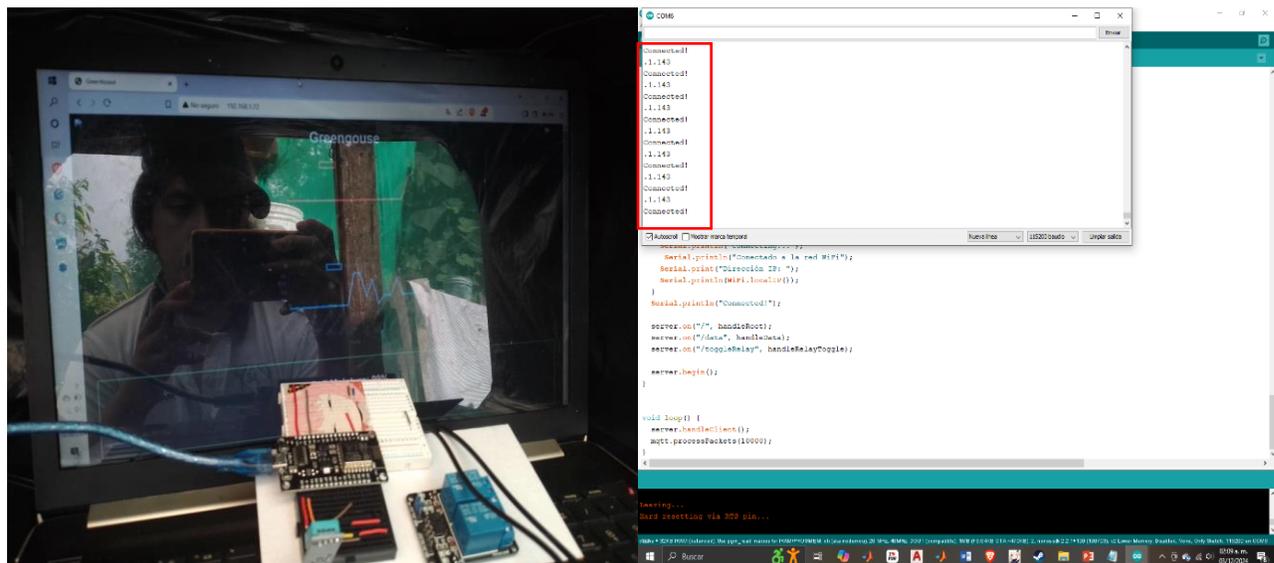


Figura 28. Vista previa de la Interfaz web. Fuente: Elaboración propia.

## Pruebas del sistema embebido

Se realizó la conexión de los componentes incluyendo el sistema fotovoltaico, las luces LED y los microcontroladores para comprobar su autonomía conectándolos al puerto USB verificando el encendido y comportamiento del sistema, obteniendo un resultado positivo en el envío de datos de ambos sistemas embebidos, carga de la batería y luces del cultivo vertical.



Figura 29. Conexiones de prueba. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó la prueba del sistema completo en plantas y comunicación con el servidor web desde el panel de control.

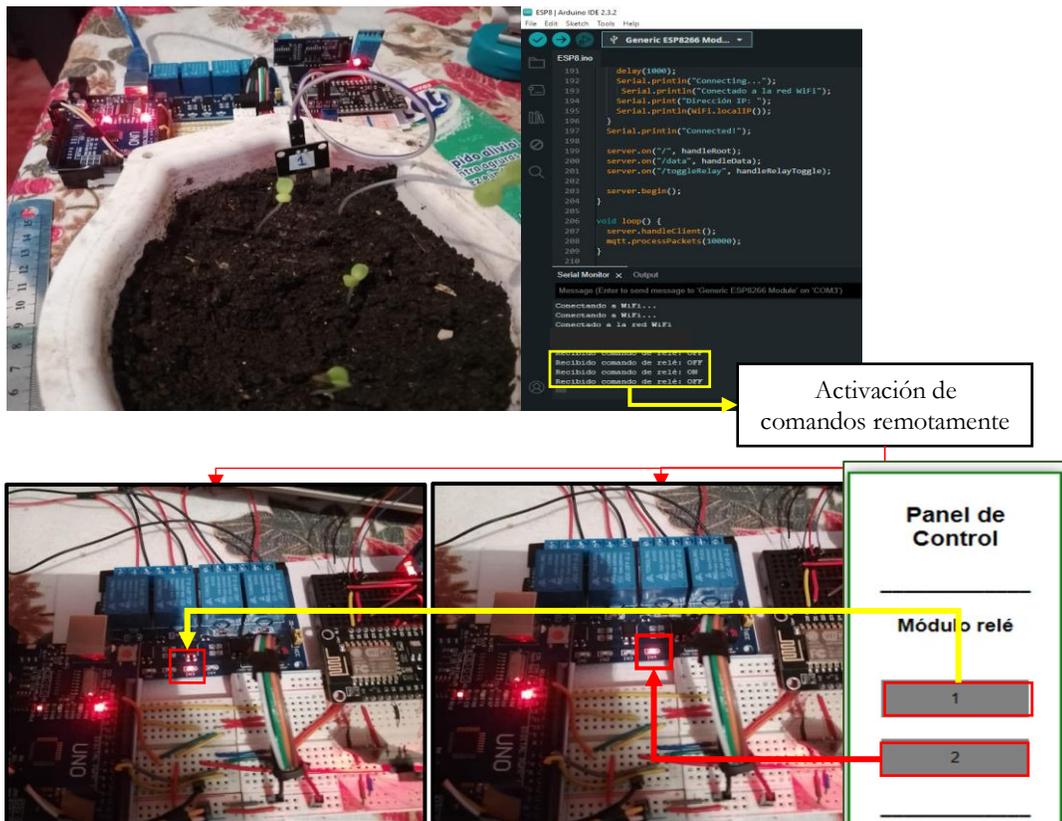


Figura 30. Funcionamiento del sistema embebido general. Fuente: Elaboración propia.

### 9.5.3 Funcionamiento del software

La página principal se encuentra publicada en GitHub pages con el siguiente link:

<https://mokasama.github.io/PWtesis/>



Figura 32. Página web publicada. Fuente: Elaboración propia.

El acceso al servidor local cuenta con un usuario y contraseña, que en caso de colocarlo incorrectamente menciona “Usuario o contraseña incorrecta”, una vez colocada correctamente se puede acceder, observar los niveles de agua, humedad, temperatura y utilizar el panel de control

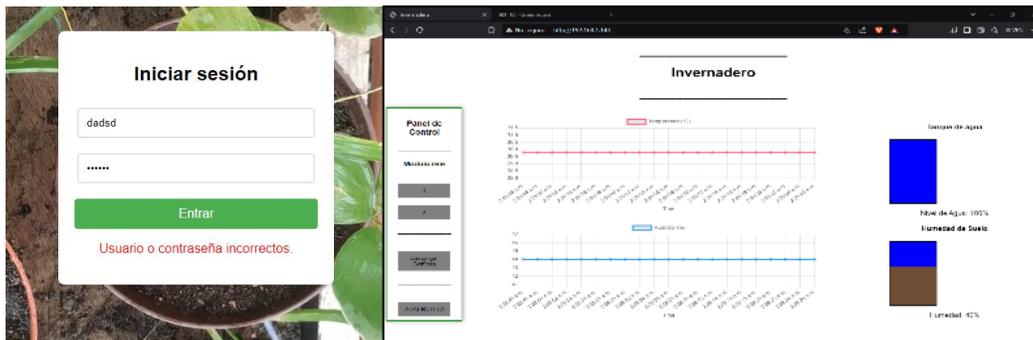


Figura 33. Interfaz web para mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

Para el acceso a Adafruit bastará con dar click a los botones “Composta” e “Invernadero”, Para acceder a una vista previa de los datos.

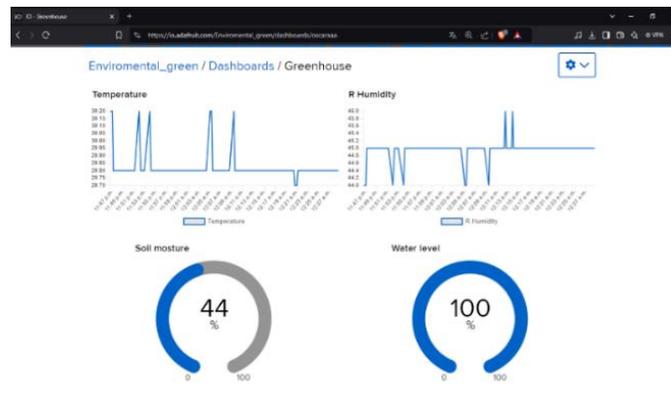


Figura 34. Interfaz de usuario en Adafruit IO. Fuente: Elaboración propia.



En la figura se observa el sistema embebido basado en el diagrama electrónico de la figura 17, y a su izquierda los datos enviados después de conectarlo al sistema de compostaje giratorio.



Figura 36. Sistema embebido e interfaz web. Fuente: Elaboración propia.

### 9.5.5 Nivel del agua

El sensor ultrasónico mide la distancia en la que se encuentra el agua, en el que, para el contenedor utilizado, se colocó en la parte superior a una distancia de 45 cm del fondo, 40 cm para los 20 litros del agua y 5 cm de para evitar contacto directo del sensor con el agua.

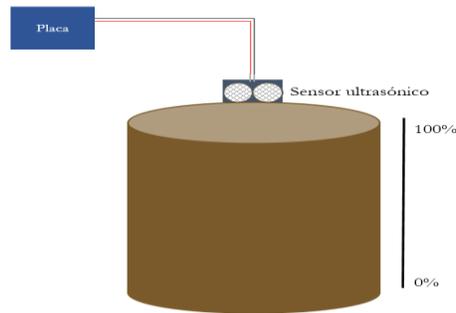


Figura 37. Sensor de nivel del agua. Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de nivel de agua se interpretan de la siguiente manera:

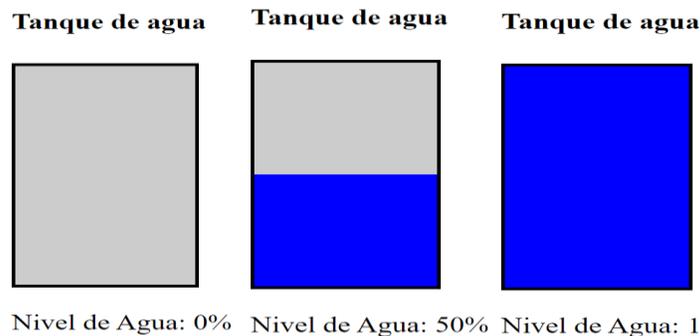


Figura 38. Niveles del tanque del agua mostrados en el servidor web. Fuente: Elaboración propia.

Cuando el sensor ultrasónico detecta un nivel bajo de agua en valores menores de 49% se activa la bomba de agua automáticamente por orden del esp8266, hasta llegar al 100% equivalente a 20 litros.

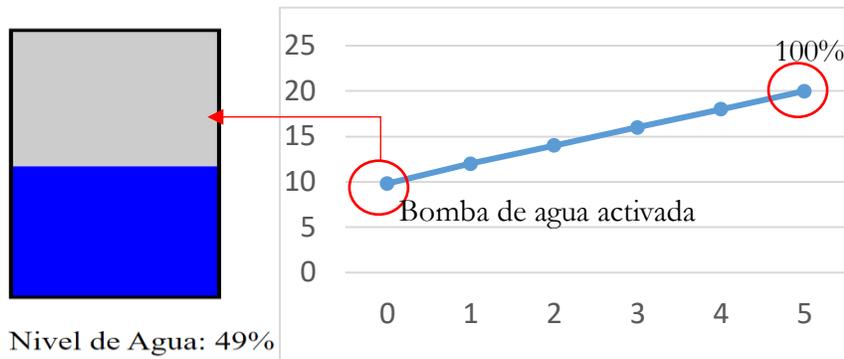
En la figura 38 se observa el comportamiento del sensor a distintas distancias, observados en la base de datos de Adafruit.IO:



**Figura 39.** Datos del sensor ultrasónico en Adafruit.IO. Fuente: Elaboración propia.

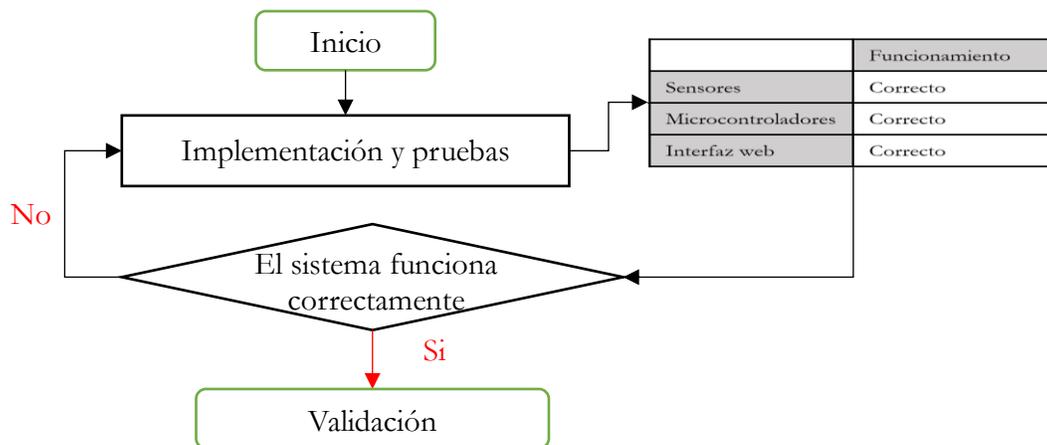
En la figura 39, se observa el gráfico que cuando el nivel del agua disminuyó a 49%, se enciende la bomba de agua para el llenado hasta el 100% del agua en donde se detiene hasta su disminución.

**Tanque de agua**



**Figura 40.** Llenado del tanque de agua. Fuente: Elaboración propia.

La implementación y pruebas fueron satisfactorias por lo que se continua con la validación.



**Figura 41.** Diagrama del sistema funcionando. Fuente: Elaboración propia.

## 9.6 VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para comprobar el funcionamiento del sistema se utilizaron 4 especies para verificar su crecimiento dentro del invernadero con el sistema implementado, siendo estos el *raphanus sativus*, *mangifera indica*, *kalanchoe pinnata* y *Tradescantia zebrina* var. *Zebrina* utilizando como sustrato la composta obtenida del sistema de compostaje.

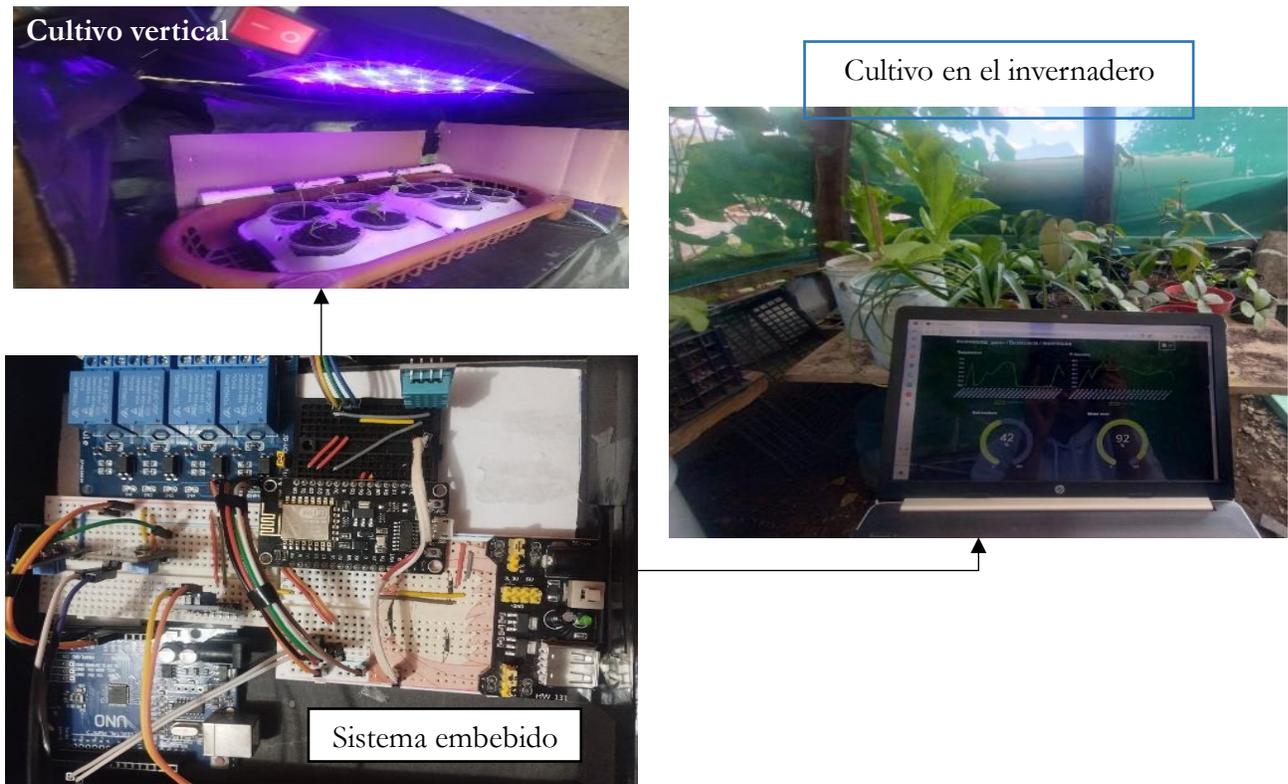
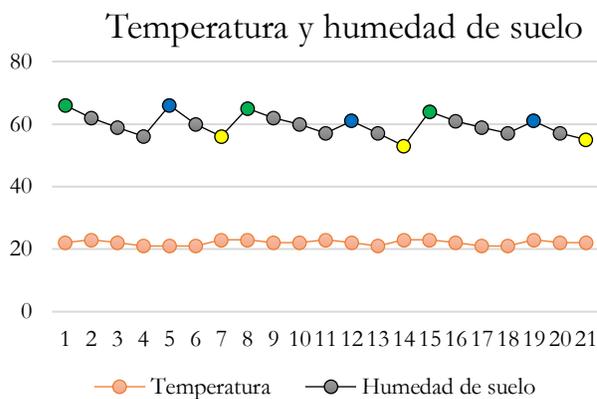
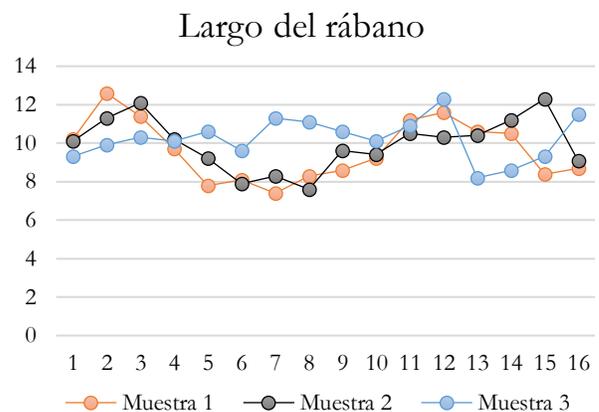


Figura 42. Resultados del sistema embebido

### 9.6.1 *Raphanus sativus* en cultivo vertical



Gráfica 1. Temperatura y humedad en Cultivo vertical.



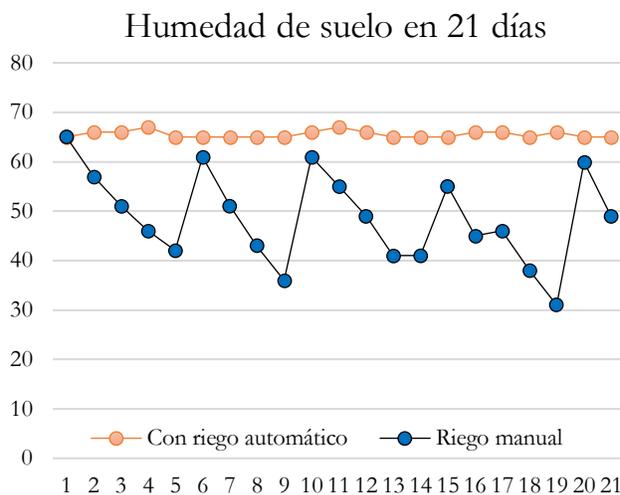
Gráfica 2. Altura de semillas germinadas

La gráfica 1 muestra el resultado de la humedad de suelo y la temperatura registrados por los sensores en 21 días, en donde cada 7 días se retiró y sembró nuevas semillas en 3 repeticiones. Los puntos azules en la humedad son las veces de encendido de la bomba de agua, los puntos verdes siembra de nuevas semillas, y amarillas el retiro de las plantas germinadas, registrando una humedad promedio de 59.7%, y una temperatura promedio de 22.04 °C y un gasto hídrico de 1.35 litros para germinación de 48 semillas de rábano.

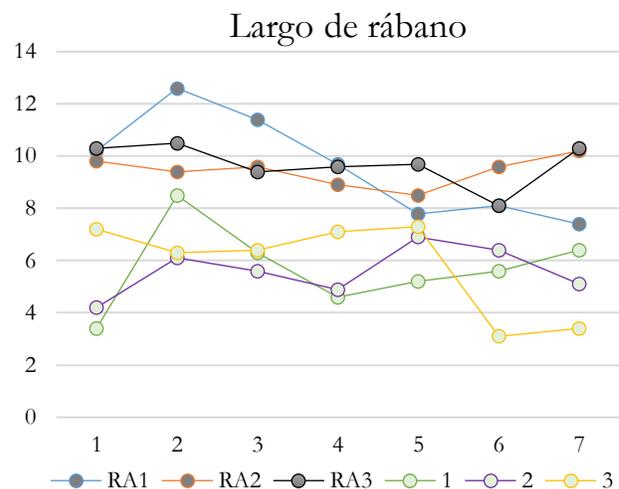
La gráfica 2 muestra el crecimiento en altura que obtuvieron las plantas durante su crecimiento en 7 días. Obtenido un promedio de 9.64 cm para la muestra 1, 9.968 para la muestra 2 y 10.23 para la muestra 3, obtenido un promedio general de 9.94 de altura.

### 9.6.2 *Raphanus sativus* en invernadero

Se cultivó dos grupos de crecimiento de 7 semillas de rábano en 7 días por 21 días, en riego automático y riego manual obteniendo los siguiente:



**Gráfica 3.** Comparativa humedad del rábano



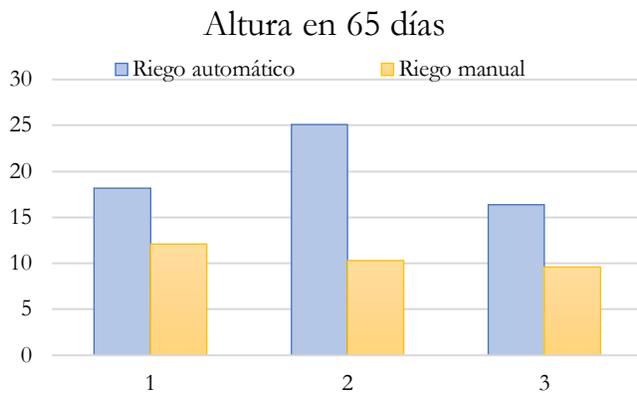
**Gráfica 4.** Comparativa altura del rábano.

La gráfica 3 muestra la humedad del suelo en el que se observa que con riego automático la humedad promedio se encuentra en 65.52% de humedad en todo el tiempo, mientras que en el riego manual tiene una humedad promedio de 48.7%, siendo los puntos más altos cuando se realiza el riego manual, la gráfica 4 muestra un promedio de crecimiento de 9.57 cm para el riego automático y 5.71 cm para riego manual, además de que el sistema de riego automático presenta un mayor número de hojas y grosor del tallo.

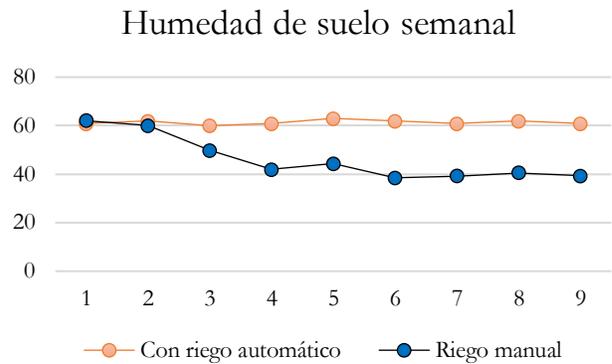
### 9.6.3 Crecimiento de *Mangifera indica* L. var *Ataulfo*:

Para la germinación se colocó en el cultivo vertical a una temperatura entre 25-28 °C a 60% de humedad de suelo, obteniendo 6 semillas germinadas en 17 días por lo que se trasplantó a macetas para después dividirlos en dos grupos, con y sin riego automático, tres semillas en cada uno.

Las gráficas muestran el crecimiento de la planta de mango en 65 días



**Gráfica 5.** Altura del Mango en 65 días



**Gráfica 6.** Comparativa de humedad del mango.

En la gráfica se observa mayor tamaño en el grupo con riego automático con un promedio de 19.9 centímetros de altura, mientras que con riego manual se encuentra un promedio de 10.66 cm de altura.

El registro de humedad de suelo con riego automático se encuentra en promedio de 61.4%, mientras que en riego manual se encuentra en promedio de 46.21%.



**Figura 43.** Crecimiento del mango. Fuente: Elaboración propia.

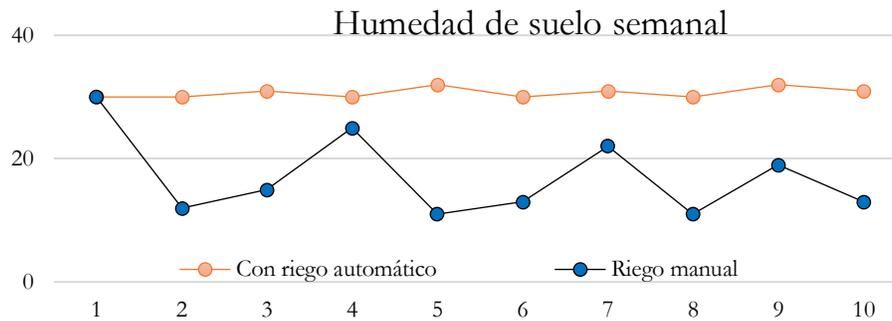
#### 9.6.4 Crecimiento de *kalanchoe pinnata*.

Para esta especie de uso medicinal se obtuvo dos hojas y se sembraron en el cultivo vertical a una temperatura entre 20-25° C y a una humedad de 30% para obtener sus retoños.



Figura 44. Retoños del *kalanchoe pinnata*. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se trasplantó y colocó en el espacio de los grupos con riego automático y manual en un total de 70 días.



Gráfica 7. Humedad semanal del *kalanchoe pinnata*. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de su crecimiento se observa en la siguiente imagen:



Figura 45. Crecimiento de *kalanchoe pinnata*. Fuente: elaboración propia.

### 9.6.5 Crecimiento de *Tradescantia zebrina* var. *zebrina*

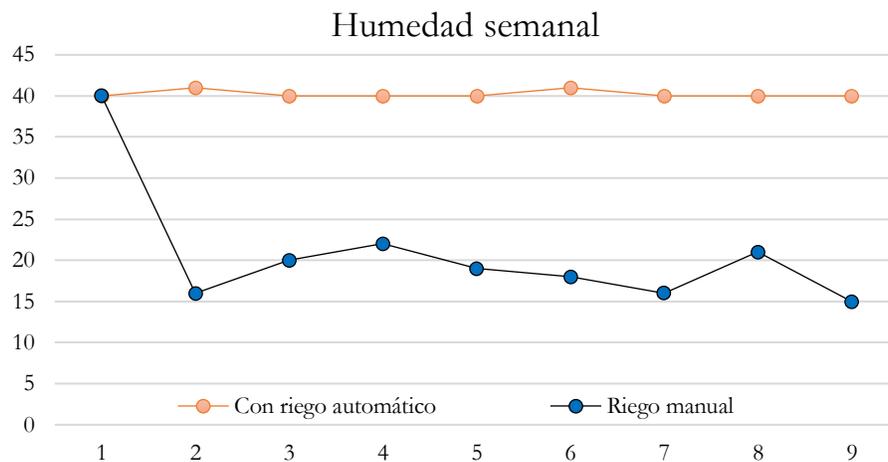
Se obtuvieron esquejes de esta especie utilizando dos para colocarlos dos contenedores de gran tamaño para su observación de crecimiento en 60 días en los dos grupos de riego.



Figura 46. *Tradescantia zebrina* var. *Zebrina*. Fuente: Elaboración propia.

Su cultivo fue por medio de esquejes en el invernadero que se encontraba a una temperatura de entre los 20- 25°C.

La humedad del suelo se mantuvo en 40.2% en el riego automático, mientras que con el riego manual se mantuvo menor a 20.7%.



Gráfica 8. Humedad de suelo del *Tradescantia zebrina*. Fuente: Elaboración propia.

Después de 60 días, los resultados son notorios, ya que, al mantener los niveles de humedad muy bajos, menor al 30%, se observó poco crecimiento de la planta en comparación de mantenerlo a 40% de humedad, por lo que en el riego automático se observa mayor densidad, y hojas que se encuentran próximas a florecer.



Figura 47. Crecimiento de *Tradescantia zebrina*.. Fuente: Elaboración Propia

### 9.6.6 Validación de las ecotecnias

#### Sistema de compostaje giratorio:

Se logró la monitorización de temperatura y control de la humedad del compost, obteniendo al final de cada composta un pH de 6.5- 6.7.

#### SCALL

Se obtuvo cantidad suficiente para riego, ya que debido al lugar donde se colocó, la actividad pluvial sucede al menos una vez a la semana lo cual fue suficiente para llenado de los tanques (40 L) por lo que no se requirió llenarlos de forma manual.

#### Sistema Fotovoltaico

Se mantuvo un sistema autónomo que mantiene despierto al sistema al menos 1.63 días con un gasto de 88.32 Wh utilizando una batería de 12V, 12 ah.

## X. Análisis de los resultados y Discusión

La tabla muestra una comparación de lo realizado en este proyecto entre los dos grupos experimentales:

**Tabla 14.** Tabla comparativa del uso del sistema integral y sin el sistema integral.

		Con el sistema	Sin el sistema
<b>Trabajo manual</b>		Bajo, riego y llenado de tanque automático, mantenimiento mensual y limpieza de malezas.	Medio, con riegos manuales diariamente, limpieza de malezas.
<b>Riego automático</b>		Si	No
<b>Costos</b>		Alto, compra de paneles solares, microcontroladores, sensores entre otros.	Bajo, solo macetas si ya se cuenta con la infraestructura.
<b>Mantenimiento del sistema</b>		Medio, necesario conocimientos en electrónica para cambiar sensores, microcontroladores o cables.	Solo limpieza de malezas en plantas
<b>Rendimiento de las plantas</b>	<b>Rábano</b>	Altura media de 9.57, mayor presencia de hojas y grosor de tallo.	Altura media de 5.71 cm, menor cantidad de hojas y tallo delgado, hojas caídas presentado estrés hídrico.
	<b>Mango</b>	Altura media de 19.9 cm	Altura media de 10.66 cm.
	<b><i>Tradescantia zebrin</i></b>	Mayor densidad y crecimiento de las hojas.	Menor densidad y hojas malformadas.
	<b><i>kalanchoe pinnata</i></b>	Mayor densidad con podas constantes, flores en algunas hojas.	Menor densidad, sin presencia de flores, humedad muy baja.
<b>Uso del agua</b>		Moderado	Sin control de eso
<b>Monitoreo constante</b>		Alto, puede verse desde cualquier región pero se necesita conexión a internet.	Bajo, solo cuando se visita el invernadero.

<b>Ventajas</b>	Sistema autónomo que no necesita de recursos naturales externos.	Sin altos costos
<b>Desventajas</b>	Alto costo inicial	Más trabajo manual y sin monitoreo.

La tabla anterior se describe como una comparación que muestra la validación del sistema y como este influye en su implementación, destacando que, a pesar de tener un costo alto, la eficiencia y rendimiento tanto en control, monitoreo y crecimiento de las plantas es mayor con el uso del sistema embebido, obteniendo un sistema con menor trabajo manual.

**Tabla 15.** Tabla comparativa con estudios anteriores:

Estudios previos	Tecnología utilizada	Herramientas IoT usadas	Observaciones
García Oscar (2025)	Sistemas fotovoltaicos para el sistema embebido, compostaje, SCALL, riego automático y monitoreo IoT.	Adafruit IO	Se implementó un sistema autónomo de recursos externos y se mantuvo un control automático de riego y llenado de tanque.
Herrera (2018)	Control automático de humedad de suelo y temperatura del aire	Ninguno	Mantuvo control de la temperatura y ahorro 20% de agua.
Hernández (2021)	Sistema fotovoltaico, luz artificial, monitoreo IoT.	ThinkSpeak	Cultivó rábano utilizando luz artificial y monitoreó el proceso.
Suárez & Valverde (2023)	Sistema fotovoltaico, monitoreo IoT, Control automático de humedad y temperatura.	Mosquito, Influx DB y Grafana.	Desarrolló un ambiente controlado y monitoreo en el cultivo de rábano.

Chasiluisa (2020)	Microclima automático, Monitoreo Inalámbrico, Simulación.	LoRa, Firebase	Simuló en Unity 3D un sistema de control automático y monitoreo para un posible invernadero a gran escala.
Tapía & Torres (2023)	Cultivo vertical, Riego solar con Arduino.	Ninguno	Cultivó plantas medicinales usando riego automático solar.

La tabla 15 es el resultado de comparar 5 trabajos similares en cuanto a usos de sistemas embebidos o controladores teniendo cada uno tareas y usando tecnologías distintas, una diferencia clave con el sistema desarrollado en este proyecto es que algunos estudios aun dependen de recursos externos como el agua, sustrato y en algunos casos energía, además de que se trata de un invernadero de mayor tamaño. En cuestiones de automatización el sistema desarrollado solo cuenta con dos tareas, riego automático y llenado de tanque, mientras que Chasiluisa (2023), Suárez y Valverde (2023) y herrera (2018) cuentan con un control de la temperatura y riego automático.

## XI. Recomendaciones

- Mantenimiento al sistema embebido de manera mensual, revisando que los sensores y actuadores funcionen de manera correcta.
- Adición de sensores como un caudalímetro ayudarán a medir de manera con precisión el gasto hídrico, y un sensor de lluvia indicaría las veces de llenado de tanque y datos más precisos sobre el agua almacenada.
- Adición de más paneles solares y baterías para más autonomía en tiempo de invierno.
- Adición de más actuadores para climas muy calientes o fríos.

## XII. CONCLUSIONES

En conclusión, el trabajo permitió demostrar el funcionamiento de un sistema integral en que se implementó correctamente tecnologías sostenibles consiguiendo lo siguiente:

- Mediante un sistema fotovoltaico autónomo con una batería de 12 V, 12Ah, se logró mantener el sistema en funcionamiento durante 1.63 días, evitando cortes de energía y reinicios que podrían afectar su desempeño.
- El sistema de captación de agua de lluvia permitió la recolección y uso del recurso mediante un sistema de riego por goteo que se activa automáticamente, complementando con sensor ultrasónico para medir el nivel del agua y mantener al contenedor siempre al 100%.
- Se desarrolló un sistema de compostaje giratorio con su propio módulo de monitoreo de (temperatura y humedad) y alertas sobre el estado del compost, además de riego automático.
- Cultivo vertical: esta técnica permitió optimizar el espacio del invernadero, logrando germinar exitosamente semillas de mango, la obtención de retoños del *kalanchoe pinnata* y la germinación de rábano mediante luz artificial.
- La página web principal puede visualizarse desde cualquier red y por cualquier usuario, además el servidor local permite realizar mantenimiento del sistema embebido para comprobar su funcionamiento.
- Se validó el sistema utilizando dos grupos experimentales dentro del invernadero, el primero grupo contaba con el sistema embebido, mientras que el segundo no, los resultados fueron positivos para el primer grupo, que presento un mayor crecimiento y menor dependencia de recursos externo, ya que el propio sistema lo provee.

De esta manera se cumplen los objetivos propuestos y se valida la hipótesis, abriendo la oportunidad de implementar este tipo de proyectos en zonas donde el acceso a servicios básicos como la energía eléctrica pública y agua potable, es limitados.

### XIII. REFERENCIAS

- [1] [1] Sarandón, S. J. (2020). El papel de la agricultura.
- [2] [2] Sott, M. K., Furstenau, L. B., Kipper, L. M., Giraldo, F. D., Lopez-Robles, J. R., Cobo, M. J., ... & Imran, M. A. (2020). Precision techniques and agriculture 4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: state of the art, challenges and future trends. *IEEE Access*, 8, 149854-149867.
- [3] [3] Soto, J. P. T., Suárez, J. D. L. S. S., Rodríguez, A. B., & Cainaba, G. O. R. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, (22), 86-105.
- [4] [4] Espinosa, A., Ponte, D., Gibeaux, S., & González, C. (2021). Estudio de Sistemas IoT Aplicados a la Agricultura Inteligente. *Revista Plus Economía*, 9(1), 33-42.
- [5] [5] Castellanos, R. M., & Morales-Pérez, M. (2016). Análisis crítico sobre la conceptualización de la agricultura de precisión. *Ciencia en su PC*, (2), 23-33.
- [6] Piña Borrego, C. E. (2020). Cambio climático, inseguridad alimentaria y obesidad infantil. *Revista Cubana de Salud Pública*, 45, e1964.
- [7] Naciones Unidas. (s.f.). La población mundial. Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20mundial%20alcanz%C3%B3%20los,y%202000%20millones%20desde%201998>.
- [8] Batista, D. (2024). Superpoblación y retos de la agricultura del futuro. *Giroenviro | Ingeniería Civil, Ambiental y Agrícola*. <https://giroenviro.com/superpoblacion-y-retos-de-la-agricultura-del-futuro/>
- [9] Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 255-271.
- [10] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (23 de agosto de 2023). El campo ante el cambio climático. [gob.mx. https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/el-campo-ante-el-cambio-climatico?idiom=es](https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/el-campo-ante-el-cambio-climatico?idiom=es)
- [11] García, M. B. (18 de septiembre, 2023). ¿En qué consiste el desarrollo sostenible? *Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2023/08/what-is-sustainable-development/>
- [12] Rodríguez, M. G. (2021). La lucha contra el cambio climático y la agricultura. *Retos actuales del sector agrario español*, 37.

- [13] Naciones Unidas. (2023). The Sustainable Development Goals Report 2023 [PDF]. Naciones Unidas. [https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf)
- [14] Nicholls, C. I., & Altieri, M. A. (2019). Bases agroecológicas para la adaptación de la agricultura al cambio climático. Cuadernos de Investigación UNED, 11(1), 55-61.
- [15] Bula, A. O. (2020). Importancia de la agricultura en el desarrollo socio-económico. <https://rephip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/d9042436-7d26-4d43-a85f-c865302ad83c/content>
- [16] Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. Revista UIS Ingenierías, 19(2), 177-191.
- [17] Berrios Gómez, S. (2022). Diseño de un sistema IOT para el monitoreo y control del cultivo de lechugas en un invernadero (Tesis de grado). Universidad Privada De Tacna. <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/2362/Berrios-Gomez-Sebastian.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [18] Lenscak, M. P., & Iglesias, N. B. (2019). Invernaderos: tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54). INTA Ediciones.
- [19] Lira Saldívar R. H. (31 de enero, 2022). Agricultura protegida vertical. Departamento de Biociencias y Agrotecnología del CIQA. Centro de investigación en Química Aplicada. <https://ciqa.edu.mx/AgriculturaPV.aspx>
- [20] Núñez Acosta, R. S. (2022). Sistema de control con visión artificial para cultivos con luz artificial (Tesis de Maestría). Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. <https://repositorio.uta.edu.ec/items/75135261-c291-49f5-99ed-264c36449145>
- [21] Niu, Haoyu; Hollenbeck, Derek; Zhao, Tiebiao; Wang, Dong; Chen, YangQuan (2020). Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture. Sensors, 20(22), 6427. <https://doi.org/10.3390/s20226427>
- [22] Ballesteros Calvete, N. A., & Bermúdez Barón, L. F. (27 de noviembre, 2023). Desarrollo de camas de cultivo elevadas con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH y humedad, para el cultivo de rábano *Raphanus sativus* y lechuga *Lactuca sativa* en el LEATYER, campus de Chía, Universidad El Bosque.

<https://repositorio.unbosque.edu.co/server/api/core/bitstreams/86ffe801-b47e-4af6-b40f-976423dd4f87/content>

- [23] USU. (2019). Agricultural uses of water. Extension.usu.edu. Retrieved from <https://extension.usu.edu/waterquality/learnaboutsurfacewater/usesofwater/agriculture>.
- [24] Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (30 de agosto de 2023). Agua: fuente de vida para la agricultura. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/agua-fuente-de-vida-para-la-agricultura?idiom=es>
- [25] Kaltsidi, M. P., Fernández Cañero, R., Franco Salas, A., & Pérez Urrestarazu, L. (2019). Evaluación de la iluminación fotosintética mediante LEDs en Jardinería Vertical (No. COMPON-2019-agri-3414). <https://zaguan.unizar.es/record/84459/files/3414.pdf>
- [26] Gatiboni, L. (2022). Soils & Plant Nutrients. In North Carolina Extension Gardener Handbook (2nd ed.). Raleigh, North Carolina: NC State University.
- [27] Arriols E. (2 de agosto, 2018). Qué necesitan las plantas para vivir. Ecología verde. <https://www.ecologiaverde.com/que-necesitan-las-plantas-para-vivir-1424.html>
- [28] Hugues, R. T. (2019). La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 40(2), 125-139. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382019000200125&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382019000200125&script=sci_arttext&tlng=en)
- [29] Quintanar C. T., Mocva Kurek R. K., Gónzales Correa C. & Centeno Álvarez J. C. (septiembre, 2022). ¿Cómo hacer un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) en mi escuela? Instituto Mexicano del Agua. <https://doi.org/10.24850/b-imta-2022-06>
- [30] Cancino López, E. (2019). *Desarrollo de un prototipo para un sistema de seguimiento solar fotovoltaico en el IIIER*. Obtenido de: <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/2258>
- [31] Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (2022). Manuales Prácticos para la elaboración de bioensumos. 9. Compostaje. Estrategia de Acompañamiento Técnico. Obtenido de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737324/9\\_Composta.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737324/9_Composta.pdf)
- [32] Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2018). NMX-AA-180-SCFI-2018. Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales. Diario Oficial de La Federación. Obtenido de:

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf>

- [33] National Aeronautics and Space Administration (febrero, 2019). *Systems Engineering Handbook*. Obtenido de: <https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/>
- [34] Zúñiga Sibaja R. (15 de marzo, 2024). Explorando los sistemas embebidos: inteligencia en cada dispositivo. Fidélitas Universidad. Obtenido de: <https://ufidelitas.ac.cr/que-son-los-sistemas-embebidos/?currency=CRC>
- [35] Schneider J. & Smalley I. (4 de junio, 2024). ¿Qué es un microcontrolador? IBM. Obtenido de: <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/microcontroller>
- [36] Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). *La plataforma Arduino*. En *Manual de programación con Arduino*. Obtenido de: <https://iaciduino.enp.unam.mx/wpArduino/index.php/manual-de-programacion-con-arduino/la-plataforma-arduino/>
- [37] MDN contributors. (2024). Learn web development. MDN web docs. Obtenido de: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn\\_web\\_development](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn_web_development)
- [38] Adafruit industries. (s.f.). About us. Adafruit. Obtenido de: <https://www.adafruit.com/about>
- [39] Indian Institute of Embedded systems. (s.f.). What are the benefits of using Adafruit IO for IoT projects? IIES. Obtenido de: <https://iies.in/blog/how-can-adafruit-io-benefit-my-iot-project/>
- [40] Hernández V. R. (28 de mayo, 2024). Cultivo de Rábano: Guía práctica de siembra. Hydro ambiental. Obtenido de: [https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=406](https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=406)
- [41] Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (30 de marzo, 2019). El rábano ¿qué sabes de esta hortaliza? SADER. Obtenido de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-rabano-que-sabes-de-esta-hortaliza>
- [42] Gómez Mora, J. E. (2023). Evaluación de coliformes fecales en sistema acuapónico de pequeña escala con las especies (*Oreochromis niloticus*, *Tradescantia zebrina*) y propuesta de remediación. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco [tesis de maestría]. Obtenido de: <https://ri.ujat.mx/bitstream/200.500.12107/4689/3/Jos%c3%a9%20Emmanuel%20G%c3%b3mez%20Mora.pdf>

- [43] Méndez C. (diciembre, 2020). Tradescantia Zebrina: Cuidados, Secretos, Poda y Reproducción. Plantaku. Obtenido de: <https://plantaku.com/blogs/news/tradescantia-zebrina-cuidados-secretos-poda-y-reproduccion>
- [44] Chiguachi, J. A. M., Fajardo, A. G., Esquivel, J. S., González, D. M., Prieto, Á. G., & Rincón, D. (2020). Manejo integrado del cultivo de mango *Mangifera indica* L. *Revista Ciencias Agropecuarias (RCA)*, 6(1), 51-78.
- [45] Mendoza-Hernández, C., Rosas-Quijano, R., Vázquez-Ovando, A., & Gálvez-López, D. (2020). Retos y controversias del mango Ataulfo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(7), 1633-1645.
- [46] Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (2023). Mango. SADER. Obtenido de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/832780/mango.pdf>
- [47] Navarro, L. G., Agosto, J. G., Nolasco H. C. (enero, 2023). Phytochemical composition and antioxidant properties of mala madre plant (*Kalanchoe pinnata*). *South Florida Journal of Development*, Miami, v.4, n.1. p.201-214,2023. ISSN2675-5459.
- [48] Corredera M. (01 de octubre, 2023). *Kalanchoe Pinnata*: todo lo que debes saber de esta suculenta conocida como 'siempreviva'. El Mueble. Obtenido de: [https://www.elmueble.com/plantas-flores/siempreviva-kalanchoe-pinnata\\_51952](https://www.elmueble.com/plantas-flores/siempreviva-kalanchoe-pinnata_51952)
- [49] Chasiluisa Macias, R. J. (2020). *Diseño y construcción de un sistema automático de control y monitorización del microclima de un invernadero para el Cantón Penipe-Chimborazo* (Bachelor's thesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo).

## ANEXOS



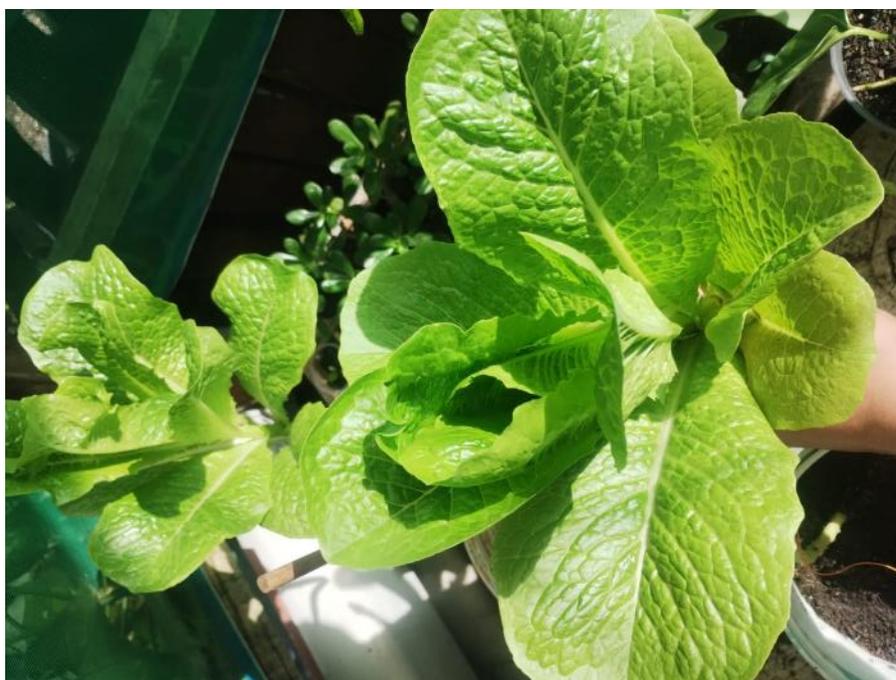
Anexo 1. Instalación del sistema de captación de agua de lluvia



Anexo 2. Sistema de compostaje giratorio



Anexo 3. Crecimiento de Lechuga y rábano en cultivo vertical.



Anexo 4. Crecimiento de Lechuga en invernadero



Anexo 5. Crecimiento de rábano en cultivo vertical.



Anexo 6. Crecimiento de lechuga.



Anexo 7. Crecimiento de Rábano



Anexo 8. Composta obtenida y su pH.



Anexo 9. Construcción del cultivo vertical



Anexo 10. Otras especies en el invernadero con riego automático



Anexo 11. Proceso de compostaje

## Anexo 12. Código del sistema embebido del compostaje

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include <LittleFS.h>
#include <Adafruit_MQTT.h>
#include <Adafruit_MQTT_Client.h>
#include <DS18B20.h>
#include <DallasTemperature.h>

const char* ssid = "";
const char* password = "";

#define AIO_SERVER "io.adafruit.com"
#define AIO_SERVERPORT 1883
#define AIO_USERNAME ""
#define AIO_KEY ""

WiFiClient client;
Adafruit_MQTT_Client mqtt(&client,
AIO_SERVER, AIO_SERVERPORT,
AIO_USERNAME, AIO_KEY);

Adafruit_MQTT_Publish temperatureFeed =
Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
AIO_USERNAME "/feeds/T_compost");

Adafruit_MQTT_Publish humidityFeed =
Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
AIO_USERNAME "/feeds/H_compost");

Adafruit_MQTT_Publish compostPhaseFeed =
Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
AIO_USERNAME "/feeds/Alertas");

#define ONE_WIRE_BUS 4

#define HUMIDITY_PIN A0

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

ESP8266WebServer server(80);
String currentPhase = "";

String determinePhase(float temperature) {
  if (temperature >= 20 && temperature < 40) {
    return "Fase inicial (Mesófila)";
  } else if (temperature >= 40 && temperature <=
70) {
    return "Fase Termófila";
  } else if (temperature < 20) {
    return "Fase de enfriamiento";
  } else {
    return "fuera de rango";
  }
}

void connectWiFi() {
  Serial.print("Conectando a Wi-Fi...");
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("¡Conectado a Wi-Fi!");
}
```

```

}
Serial.println("Error al publicar humedad.");
}
if (!compostPhaseFeed.publish(phase.c_str())) {
    Serial.println("Error al publicar fase.");
}
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    sensors.begin();

    connectWiFi();

    if (!LittleFS.begin()) {
        Serial.println("Error de archivos.");
        return;
    }

    server.on("/", handleRoot);
    server.begin();
    Serial.println("Servidor HTTP iniciado.");
}

void loop() {
    server.handleClient();

    if (!mqtt.connected()) {
        connectMQTT();
    }

    mqtt.processPackets(10000);
}

void connectMQTT() {
    while (!mqtt.connected()) {
        Serial.print("Conectando a MQTT... ");
        if (mqtt.connect()) {
            Serial.println(";Conectado a MQTT!");
        } else {
            Serial.print("Error de conexión: ");
            Serial.println("Reintentando...");
            delay(5000);
        }
    }
}

void handleRoot() {
    String html = "<!DOCTYPE html><html><body>";

    html += "<h1>Monitoreo de Compostaje</h1>";

    html += "<p>Conexión establecida.</p>";

    html += "</body></html>";

    server.send(200, "text/html", html);
}

void sendDataToAdafruit(float temperature, float humidity, String phase) {
    if (!temperatureFeed.publish(temperature)) {
        Serial.println("Error datos de temperatura.");
    }

    if (!humidityFeed.publish(humidity)) {
}

```

```

sensors.requestTemperatures();

float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);

int analogValue = analogRead(HUMIDITY_PIN);

float humidity = map(analogValue, 1023, 0, 0,
100);

if (temperature ==
DEVICE_DISCONNECTED_C) {

    Serial.println("Error al leer datos del DS18B20.");

    return;

}

if (analogValue < 0 || analogValue > 1023) {

    Serial.println("Error al leer datos del YL-69.");

    return;

}

String newPhase = determinePhase(temperature);

if (newPhase != currentPhase) {

    currentPhase = newPhase;

    Serial.println("Nueva fase detectada: " +
currentPhase);

}

sendDataToAdafruit(temperature, humidity,
currentPhase);

delay(2000);

}

```

### Anexo 13. Código del sistema principal

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include <LittleFS.h>
#include <Adafruit_MQTT.h>
#include <Adafruit_MQTT_Client.h>
#include "DHT.h"

const char* ssid = "";
const char* password = "";

#define AIO_SERVER    "io.adafruit.com"
#define AIO_SERVERPORT 1883
#define AIO_USERNAME ""
#define AIO_KEY      ""

WiFiClient client;

Adafruit_MQTT_Client mqtt(&client,
AIO_SERVER, AIO_SERVERPORT,
AIO_USERNAME, AIO_KEY);

Adafruit_MQTT_Publish temperatureFeed =
Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
AIO_USERNAME "/feeds/Temperature");

Adafruit_MQTT_Publish humidityFeed =
Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
AIO_USERNAME "/feeds/R Humidity");

Adafruit_MQTT_Publish soilMoistureFeed =
Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
AIO_USERNAME "/feeds/Soil moisture");

Adafruit_MQTT_Publish waterLevelFeed =
Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
AIO_USERNAME "/feeds/Water level");

#define DPIN 2

```

```

#define DTYPE DHT11
#define SOIL_MOISTURE_PIN A0
#define TRIG_PIN 4
#define ECHO_PIN 5

#define RELAY_CHANNEL_1 12
#define RELAY_CHANNEL_2 13

DHT dht(DPIN, DTYPE);
ESP8266WebServer server(80);

bool relayState1 = false;
bool relayState2 = false;

void saveData(float temperatureC, float humidity,
float soilMoisture, float waterLevel) {
    File file = LittleFS.open("/data.txt", "a");
    if (!file) {
        Serial.println("Failed to open file for writing");
        return;
    }
    file.printf("%s,%0.2f,%0.2f,%0.2f,%0.2f\n",
String(millis()).c_str(), temperatureC, humidity,
soilMoisture, waterLevel);
    file.close();
}

void handleRoot() {

    String html = "<!DOCTYPE html><html
lang=\"en\"><head>";

```

```

    html += "<meta charset=\"UTF-8\"><meta
name=\"viewport\" content=\"width=device-
width, initial-scale=1.0\">";

    html += "<title>Invernadero</title>";

    html
+= "<h2>_____</h2>";

    html += "<h1>Invernadero</h1>";

    html
+= "<h2>_____</h2>";

    html += "<style>body { background-color: white;
color: black; font-family: Arial, sans-serif; text-align:
center; }";

    html += "#leftPanel { width: 10%; float: left;
border: 2px solid green; padding: 10px; box-shadow:
0 0 10px rgba(0, 0, 0, 0.5); margin-left: 30 px;}";

    html += "#centerPanel { width: 60%; float: left;
margin-top: 0px;}";

    html += "#rightPanel { width: 20%; float: right;
padding: 20px; margin-right: 25px;}";

    html += "canvas { display: inline-block; margin:
20px auto; }";

    html += "button { margin-top: 20px; padding:
10px; background-color: gray; color: black; border:
green; width: 80%; cursor: pointer; transition: box-
shadow 0.5s; }";

    html += "button:hover { box-shadow: 0 0 15px
rgba(76, 175, 80, 0.7); }";

    html += "</style></head><body>";

    html += "<div id='leftPanel'><h3>Panel de
Control</h3>";

    html += "<h4>_____</h4>";

```

```

html += "<h4>Módulo relé</h4>";

html += "<button
onclick=\"toggleRelay(1)\">1</button>";

html += "<button
onclick=\"toggleRelay(2)\">2</button>";

html += "<h4>_____</h4>";

html += "<button
onclick=\"downloadCharts()\">Descargar
Gráficas</button>";

html += "<h4>_____</h4>";

html += "<button
onclick=\"goToAdafruit()\">ADAFRUIT
IO</button></div>";

html += "<div id='centerPanel'><h2></h2>";

html += "<canvas id=\"tempChart\"
width=\"700\" height=\"250\"></canvas>";

html += "<canvas id=\"humChart\"
width=\"700\"
height=\"250\"></canvas></div>";

html += "<div id='rightPanel'><h3>
</h3>";

html += "<div><h4>Tanque de agua</h4>";

html += "<div id='waterTank' style='width:
100px; height: 160px; border: 2px solid #000;
background-color: #ccc;'>";

html += "<div id='waterFill' style='width: 100%;
height: 0%; background-color:
#00f;'></div></div>";

```

```

html += "<p>Nivel de Agua: <span
id='waterPercentage'>0</span>%</p></div>";

html += "<div><h4>Humedad de Suelo</h4>";

html += "<div id='coffeeCup' style='width:
100px; height: 160px; border: 2px solid #000;
background-color: #6f4e37;'>";

html += "<div id='coffeeFill' style='width: 100%;
height: 0%; background-color:
#00f;'></div></div>";

html += "<p>Humedad: <span
id='soilMoisturePercentage'>0</span>%</p></d
iv>";

html += "</div>";

html += "<script
src=\"https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js\"></s
cript>";

html += "<script>";

html += "function toggleRelay(channel) {";

html += " fetch(`/toggleRelay?channel=` +
channel)`";

html += "}";

html += "function downloadCharts() {";

html += " var canvas =
document.getElementById('miCanvas'); //
Obtiene el canvas por su ID

html += " var enlace =
document.createElement('a');";

html += " enlace.href =
canvas.toDataURL('image/png');";

html += " enlace.download = 'grafica.png';";

```

```

html += " enlace.click()";
html += "}";

html += "function goToAdafruit() {";
html += "
window.open('https://io.adafruit.com/', '_blank');";
html += "}";

html += "const tempData = { labels: [], datasets:
[ { label: 'Temperature (°C)', borderColor: 'rgb(255,
99, 132)', data: [] } ] }";

html += "const humData = { labels: [], datasets: [ {
label: 'Humidity (%)', borderColor: 'rgb(54, 162,
235)', data: [] } ] }";

html += "const tempConfig = { type: 'line', data:
tempData, options: { scales: { x: { display: true, title:
{ display: true, text: 'Time' } } } } }";

html += "const humConfig = { type: 'line', data:
humData, options: { scales: { x: { display: true, title:
{ display: true, text: 'Time' } } } } }";

html += "const tempChart = new
Chart(document.getElementById('tempChart'),
tempConfig)";

html += "const humChart = new
Chart(document.getElementById('humChart'),
humConfig)";

html += "setInterval(async () => {";
html += "const response = await fetch('/data');";
html += "const data = await response.json()";
html += "const time = new
Date().toLocaleTimeString()";
html += "if (tempData.labels.length > 20) {
tempData.labels.shift();
tempData.datasets[0].data.shift(); }";

```

```

html += "if (humData.labels.length > 20) {
humData.labels.shift();
humData.datasets[0].data.shift(); }";

html += "tempData.labels.push(time);
tempData.datasets[0].data.push(data.temperatureC);
tempChart.update()";

html += "humData.labels.push(time);
humData.datasets[0].data.push(data.humidity);
humChart.update()";

html +=
"document.getElementById('waterFill').style.height
= data.waterLevel + '%";

html +=
"document.getElementById('waterPercentage').inner
Text = data.waterLevel";

html +=
"document.getElementById('coffeeFill').style.height
= data.soilMoisture + '%";

html +=
"document.getElementById('soilMoisturePercentage
').innerText = data.soilMoisture";

html += "}, 2000)";

html += "</script></body></html>";

server.send(200, "text/html", html);
}

void handleData() {
float temperatureC = dht.readTemperature();
float humidity = dht.readHumidity();
int rawSoilMoisture =
analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN);

```

```

float soilMoisture = map(rawSoilMoisture, 1018,
300, 0, 100);
soilMoisture = constrain(soilMoisture, 0, 100);

float waterLevel = getWaterLevel();
saveData(temperatureC, humidity, soilMoisture,
waterLevel);

String jsonData = "{ \"temperatureC\": " +
String(temperatureC) + ", \"humidity\": " +
String(humidity) + ", \"soilMoisture\": " +
String(soilMoisture) + ", \"waterLevel\": " +
String(waterLevel) + " }";

server.send(200, "application/json", jsonData);
}

void handleRelayToggle() {
String channel = server.arg("channel");

if (channel == "1") {
relayState1 = !relayState1;
digitalWrite(RELAY_CHANNEL_1, relayState1
? LOW : HIGH);
} else if (channel == "2") {
relayState2 = !relayState2;
digitalWrite(RELAY_CHANNEL_2, relayState2
? LOW : HIGH);
}

server.send(200, "text/plain", "OK");
}

```

```

float getWaterLevel() {
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
float duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
float distance = (duration / 2) * 0.0343;
return map(distance, 5, 40, 100, 0);
}

void setup() {
Serial.begin(115200);
pinMode(RELAY_CHANNEL_1, OUTPUT);
pinMode(RELAY_CHANNEL_2, OUTPUT);
digitalWrite(RELAY_CHANNEL_1, HIGH);
digitalWrite(RELAY_CHANNEL_2, HIGH);

pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
pinMode(ECHO_PIN, INPUT);

dht.begin();

if (!LittleFS.begin()) {
Serial.println("An error occurred while mounting
LittleFS");
return;
}
}

```

```
WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
  delay(1000);
  Serial.println("Connecting...");
  Serial.println("Conectado a la red WiFi");
  Serial.print("Dirección IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}
Serial.println("Connected!");

server.on("/", handleRoot);
server.on("/data", handleData);
server.on("/toggleRelay", handleRelayToggle);

server.begin();
}

void loop() {
  server.handleClient();
  mqtt.processPackets(10000);
}
```

Anexo 14. Costos generales

<b>COSTOS DEL SISTEMA</b>		
<b>SISTEMA FOTOVOLTAICO</b>		
	Panel solar	\$709
	1 Controlador	\$115
	1 Batería	\$700
	Luces LED 12V	\$150
<b>SISTEMA EMBEBIDO</b>		
	2 ESP8266	\$190
	1 ARDUINO UNO R3	\$189
	5 Sensor YL-69	\$106
	1 DHT11	\$25
	1 Sensor ultrasónico	\$54
	1 DS18B20	\$20
	2 Módulo relé	\$100
	3 Protoboard	\$40
	Cables	\$10
<b>SISTEMA DE COMPOSTAJE</b>		
	1 Contenedor	\$50
	Estructura Madera	Reciclado
<b>SCALL</b>		
	Tubo y accesorios PVC 3"	\$200
	2 contenedores	\$100
	Filtro	\$20
<b>INVERNADERO</b>		
	Estructura	Reciclado
	Plástico invernadero y malla sombra	\$500
<b>TOTAL</b>		
		\$3278