



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO

**SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
PARA CULTIVO DE CAFÉ EN UN INVERNADERO MEDIANTE
TECNOLOGÍA IOT**

AUTOR

Ortega Reyes, Cristian Vinicio

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

TUTOR

Pozo Palma, Paúl Marcelo

Santa Elena, Ecuador

Año 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

**Ing. Paúl Pozo Palma, Ph.D.
TUTOR**

**Ing. Oscar Gómez Morales, Ph.D.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Ing. Luis Chuquimarca Jiménez, Ph.D.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Abg. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **Cristian Vinicio Ortega Reyes**, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Electrónica y Automatización.

TUTOR

Ing. Paúl Pozo Palma, Ph.D.

Santa Elena, 23 de febrero de 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Cristian Vinicio Ortega Reyes

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Sistema de monitoreo de temperatura y humedad para cultivo de café en un invernadero mediante tecnología IoT previo a la obtención del título en Magíster en Electrónica y Automatización, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 23 de febrero de 2026

EL AUTOR


Cristian Vinicio Ortega Reyes



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Sistema de monitoreo de temperatura y humedad para cultivo de café en un invernadero mediante tecnología IoT, presentado por el estudiante, Cristian Vinicio Ortega Reyes fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 6 %, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**
magister

Proyecto de Titulación (Cristian Ortega-2) (1)

6%

Textos sospechosos


< 1% Similitudes
0% similitudes entre comillas
0% entre las fuentes mencionadas

6% Idiomas no reconocidos

26% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: Proyecto de Titulación (Cristian Ortega-2) (1).docx	Depositante: PAUL MARCELO POZO PALMA	Número de palabras: 8811
ID del documento: c8409d08af19a6316a413964578bb9664abdfdc	Fecha de depósito: 23/2/2026	Número de caracteres: 57.822
Tamaño del documento original: 10,34 MB	Tipo de carga: Interface	
	fecha de fin de análisis: 23/2/2026	

Ubicación de las similitudes en el documento:



TUTOR

Ing. Paúl Pozo Palma, Ph.D.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, Cristian Vinicio Ortega Reyes

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi trabajo de titulación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este trabajo de titulación dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 23 de febrero de 2026

EL AUTOR

Cristian Vinicio Ortega Reyes

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento siempre a Dios, por darme salud, fuerza, voluntad y la oportunidad de seguir estudiando.

Un reconocimiento especial a mi tutor y profesor PhD. Marcelo Pozo, por su orientación, observaciones y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Finalmente, mi gratitud a la dirección de maestría y docentes de la maestría y a la institución, por los conocimientos compartidos y el apoyo brindado durante esta etapa de formación profesional.

Cristian Vinicio, Ortega Reyes

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico principalmente a mi esposa Gabriela Elena Armijos Chamba, por acompañarme siempre con paciencia y apoyo en cada meta que me propongo, y a mis hijas Cristina y Valentina Ortega, quienes son mi motivación diaria para seguir preparándome y mejorar profesionalmente.

También a mis padres Luis Vinicio Ortega y Nieves María Reyes, por su ejemplo y valores que han guiado mi formación, y a mi hermano Byron Ortega, con quien he compartido muchas etapas importantes de mi vida.

De igual manera, a mi familia y amigos cercanos, que siempre han estado presentes brindando ánimo y confianza para continuar este proceso académico

Cristian Vinicio, Ortega Reyes

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO.....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
RESUMEN... ..	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Revisión de literatura	5
1.2. Desarrollo teórico y conceptual	7
1.2.1 Sensor de temperatura y humedad relativa del aire	8
1.2.2 Sensor de humedad del suelo	9
1.2.3 Unidad de proceso y control	10
1.3 Actuadores.....	10
1.3.1 Módulos de relé	10
1.3.2 Sistema de riego por atomización	11
1.3.3 Ventilación.....	11
1.3.4 Resistencia calefactora.....	11

1.4	Protocolos de comunicación en sistemas IoT	12
1.4.1	MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).....	12
1.4.2	HTTP / REST.....	12
1.4.3	CoAP (Constrained Application Protocol)	13
1.4.4	WebSockets	13
1.5	Plataformas de digitalización y análisis de datos (IoT)	14
1.5.1	Ubidots.....	14
1.5.2	ThingSpeak	14
1.5.3	Firebase	15
1.5.4	AWS IoT / Azure IoT Hub	15
1.6	Normativas y estándares	16
1.6.1	FAO – Buenas prácticas en agricultura protegida	16
1.6.2	ASABE – Normas para ventilación en estructuras agrícolas	16
1.6.3	IEC 60204-1 – Seguridad eléctrica en sistemas automatizados	17
1.6.4	IEC 60529 – Grados de protección IP	17
1.6.5	OASIS MQTT – Protocolo de comunicación IoT	17
1.6.6	IEEE 802.11 – Comunicación inalámbrica Wi-Fi.....	18
1.6.7	ECMA-404 – Formato JSON	18
1.6.8	IEEE 1451 – Sensores inteligentes	18
1.6.9	IEC 61508 – Seguridad.....	19
1.7	Formas estadística del rendimiento del cultivo.....	19
1.7.1	Muestreo probabilístico simple.....	19
1.7.2	Variables agronómicas de evaluación.....	20
1.7.3	Estadística descriptiva.....	20
1.7.4	Pruebas de normalidad: Kolmogorov-Smirnov	21

1.7.5 Prueba t de student	21
1.7.6 Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney	22
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	23
2.1 Diagrama general del proyecto	23
2.2 Contexto de la investigación	24
2.3 Diseño y alcance de la investigación	24
2.4 Tipo y métodos de investigación.....	25
2.5 Población y muestra	25
2.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	25
2.7 Procesamiento de la evaluación	25
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
3.1 Cálculos de ventilación y dimensionamiento térmico.	26
3.2 Componentes físicos	27
3.2.1 Sensor DHT22	28
3.2.2 Sensor HD-38	29
3.2.3 Placa ESP32-DEVKITC	31
3.2.4 Módulo relé de 1–2 canales	33
3.2.5 Bomba de diafragma y boquillas de atomización del sistema de riego	34
3.2.6 Ventilación.....	35
3.2.7 Resistencia.	36
3.3 Componentes lógicos	39
3.3.1 Ubidots.....	39
3.3.2 Arduino IDE	39
3.3.3 Librería WiFi.h	39
3.3.4 Librería PubSubClient.h	39

3.3.5 Protocolo MQTT.....	39
3.3.6 Formato JSON	40
3.4 Programación	40
3.5 Dashboard	41
3.5.1 Variación temporal de la temperatura dentro del invernadero	44
3.5.2 Comportamiento de la humedad relativa del aire	45
3.5.3 Humedad del suelo.....	46
3.5.4 Caracterización y comparación de los colinos de café	47
3.5.5 Variables evaluadas en las plántulas de café	49
3.5.6 Diferencias en el desarrollo de plántulas	53
3.6 Discusión de los Resultados.....	55
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS.....	60
ANEXOS.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparaciones en protocolo de comunicación	14
Tabla 2. Comparación entre las plataformas de visualización.....	15
Tabla 3. Cálculos realizados para el invernadero.	27
Tabla 4. Características técnicas del sensor DHT22.....	28
Tabla 5. Sensor de humedad del suelo HD-38.....	30
Tabla 6. Características técnicas de la placa ESP32-DEVKITC	31
Tabla 7. Características del módulo de relé utilizado para el control de actuadores	33
Tabla 8. Características del sistema de riego por atomización	34
Tabla 9. Características del sistema de ventilación	35
Tabla 10. Resistencia calefactora en espiral de 800 W.....	36
Tabla 11. Datos de altura y diámetro evaluados.....	50
Tabla 12. Comparación de las plántulas en prototipo controlado y sin control.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo sobre el proceso de funcionamiento del proyecto.	23
Figura 2. Ubicación del área de estudio.....	24
Figura 3. (a) Ubicación del sustrato en las fundas de vivero; (b) Almácigos de café antes de ingresar al invernadero.....	26
Figura 4. Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22	28
Figura 5. Sensor de humedad del suelo HD-38	30
Figura 6. Placa de desarrollo ESP32-DEVKITC.....	32
Figura 7. Módulo relé de 1–2 canales utilizado para el control de actuadores.....	33
Figura 8. Bomba de diafragma y boquillas de atomización del sistema de riego.....	34
Figura 9. Ventilador axial y extractores del sistema de ventilación	35
Figura 10. Resistencia calefactora en espiral de 800 W	36
Figura 11. Diagrama de cableado y fuente de alimentación.....	38
Figura 12. Pseudocódigo del sistema de monitoreo y control IoT	40
Figura 13. Dashboard en Ubidots.	43
Figura 14. Temperatura interna del almácigo.....	44
Figura 15. Humedad relativa del almácigo.....	45
Figura 16. Gráfica de Humedad del Suelo vs Tiempo.....	47
Figura 17. Plantas de café enumeradas para escoger la muestra	48
Figura 18. Comparación del diámetro de copa.....	49
Figura 19. Comparación de la altura de la planta	50
Figura 20. Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de planta (Automatizado).	51
Figura 21. Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de la planta (No Automatizado).	52

Figura 22. Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta (Automatizado)	52
Figura 23. Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta (No Automatizado)	53
Figura 24. Plántulas del prototipo controlado.....	54
Figura 25. Plántulas del prototipo no controlado.....	55

RESUMEN

El Internet de las Cosas (IoT) permite optimizar la eficiencia y sostenibilidad agrícola, especialmente en el cultivo de café durante la fase de almácigo, donde la temperatura y la humedad son variables críticas. En este estudio se implementó un sistema IoT basado en un microcontrolador ESP32, un sensor DHT22 y dos sensores HD-38, con transmisión de datos mediante MQTT a la plataforma Ubidots para el monitoreo en tiempo real.

Los resultados muestran estabilidad térmica entre 22 y 26 °C y humedad relativa entre 65 y 80 %. Las plantas del sistema automatizado alcanzaron 77,2 mm de altura, 59,4 mm de diámetro de copa y cuatro hojas, frente a 49,5 mm, 46,5 mm y dos hojas en el sistema no automatizado. Se concluye que el sistema IoT es una alternativa eficiente y de bajo costo para optimizar el crecimiento inicial del café en invernadero, pese a la dependencia de conectividad a internet.

Palabras claves: Internet de las Cosas; automatización; café; monitoreo ambiental; agricultura inteligente.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) enables the optimization of agricultural efficiency and sustainability, particularly in coffee cultivation during the seedling (nursery) stage, where temperature and humidity are critical variables. In this study, an IoT-based system was implemented using an ESP32 microcontroller, a DHT22 sensor, and two HD-38 sensors, with data transmission via the MQTT protocol to the Ubidots platform for real-time monitoring.

The results show thermal stability within a range of 22 to 26 °C and relative humidity between 65 and 80 %. Plants in the automated system reached a height of 77.2 mm, a canopy diameter of 59.4 mm, and four leaves, compared to 49.5 mm, 46.5 mm, and two leaves in the non-automated system. It is concluded that the IoT system represents an efficient and low-cost alternative for optimizing the early growth of coffee plants in a greenhouse environment, despite its dependence on internet connectivity.

Keywords: Internet of Things; automation; coffee; environmental monitoring; smart agriculture.

INTRODUCCIÓN

El café constituye una de las mercancías agrícolas de mayor relevancia a nivel mundial, tanto por su volumen de producción, su impacto económico y social. En 2023, la producción global de café verde alcanzó aproximadamente 11,06 millones de toneladas, con Brasil, Vietnam y Colombia como principales países productores (FAOSTAT, 2023; Investopedia, 2023). Paralelamente, el consumo per cápita refleja una demanda sostenida y creciente, destacándose países como Finlandia, donde se superan los 11 kg por persona al año (Times of India, 2022). Este escenario evidencia la importancia estratégica del café en la economía global y la necesidad de optimizar los procesos agrícolas en su etapa inicial, donde inicia el crecimiento de su raíz y se define gran parte de la productividad y calidad final del grano.

En Ecuador, la caficultura representa un pilar económico, social y cultural, especialmente en la provincia de Loja, reconocida por la producción de café arábica de alta calidad. Durante las primeras fases de desarrollo del cultivo, particularmente en el estado de chapola o almácigo, la planta establece su sistema radicular y sus primeras hojas, proceso sensible a las condiciones ambientales. Variaciones en la temperatura y la humedad durante esta etapa pueden comprometer la supervivencia, el vigor y el crecimiento inicial de las plántulas, generando pérdidas productivas significativas (Ariza García et al., 2022; Chanchí Golondrino et al., 2022).

Diversos estudios agronómicos coinciden en que el desarrollo óptimo del cafeto se alcanza cuando la temperatura ambiental se mantiene entre 22 °C y 26 °C, mientras que la humedad relativa debe situarse entre el 70 % y el 85 %. Valores fuera de estos rangos provocan retrasos en el crecimiento, estrés fisiológico, disminución del vigor vegetal y mayor incidencia de plagas y enfermedades, como la broca (*Hypothenemus hampei*), la roya (*Hemileia vastatrix*) y la antracnosis (*Colletotrichum* spp.) (Ruíz-Martínez et al., 2019; González Gaitán et al., 2024). De igual forma, la humedad del suelo debe mantenerse entre el 60 % y el 80 % de la capacidad de campo para evitar fenómenos de marchitez por déficit hídrico o anoxia radicular por exceso de agua (Montagut & Rey, 2024). En este sentido, el monitoreo continuo y preciso de estas variables se convierte en un factor determinante para garantizar la estabilidad fisiológica de los almácigos.

La creciente variabilidad climática y el estrés hídrico, han impulsado la incorporación de tecnologías digitales en la agricultura para controlar las variables, destacándose el Internet de las Cosas (IoT) como una herramienta eficaz para el registro, análisis y control en tiempo real de variables ambientales. Investigaciones recientes evidencian que la integración de sensores, microcontroladores y plataformas digitales permite mejorar la gestión agronómica, optimizar el uso de recursos y fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos frente al cambio climático (Brewster et al., 2017; Kumar et al., 2019; Guzmán Vaca et al., 2021). No obstante, persiste el desafío de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles y adaptadas a las condiciones de pequeños caficultores, especialmente en zonas rurales del Ecuador, donde el costo y la complejidad técnica limitan la adopción de sistemas avanzados.

En este contexto, la presente investigación propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de temperatura y humedad para el cultivo de café en un invernadero mediante tecnología IoT, utilizando dispositivos de bajo costo y fácil implementación. El sistema integra un microcontrolador ESP32, un sensor DHT22 para la medición de temperatura y humedad relativa del aire, dos sensores HD-38 para el monitoreo de la humedad del suelo, así como actuadores destinados al control ambiental, con transmisión de datos en tiempo real mediante el protocolo MQTT hacia la plataforma Ubidots.

Planteamiento de la investigación (Fundamentación de la investigación)

El cultivo de café es una actividad agrícola de alta importancia económica y cultural, especialmente en regiones tropicales. Sin embargo, su producción enfrenta desafíos significativos debido a la dependencia de factores climáticos como la temperatura y la humedad. Estas variables son determinantes para el desarrollo óptimo de las plantas de café, ya que influyen en procesos clave como la germinación, floración, formación de frutos y calidad del grano. Los cambios climáticos, junto con la variabilidad ambiental, han incrementado la dificultad para mantener condiciones óptimas de cultivo, especialmente en invernaderos donde se busca simular un entorno controlado. A pesar de los avances tecnológicos, muchos agricultores aún dependen de métodos tradicionales y manuales para monitorear y ajustar las condiciones climáticas dentro de los invernaderos. Esta perspectiva puede resultar ineficiente, ya que carece de precisión y no permite

detectar a tiempo variaciones críticas que podrían afectar la productividad y calidad del cultivo. Además, la falta de acceso a datos, dificulta la toma de decisiones proactivas, aumentando el riesgo de pérdidas económicas y reduciendo la sostenibilidad de la producción. En este contexto, surge la necesidad de diseñar un sistema que integre la tecnología IoT para automatizar y optimizar el monitoreo de la temperatura y la humedad en invernaderos de café. Un sistema de este tipo no solo proporcionaría datos en tiempo real, sino que también permitiría una gestión más eficiente de los recursos y un control más preciso de las condiciones ambientales. Esto beneficiaría a los agricultores al mejorar la calidad del cultivo, incrementar los rendimientos y reducir los costes con el manejo manual. Por tanto, este trabajo busca abordar esta problemática mediante la implementación de una solución tecnológica accesible y efectiva.

Formulación del problema de investigación

¿Cómo influye la integración de tecnología IoT en el control de las variables climáticas sobre la productividad y calidad del café en invernaderos?

Objetivo General:

Diseñar un sistema de monitoreo basado en tecnología IoT para medir y controlar la temperatura y la humedad en un invernadero dedicado al cultivo de café, con el fin de optimizar las condiciones de cultivo y mejorar la calidad y productividad del café.

Objetivos Específicos:

1. Desarrollar un sistema integrado de sensores IoT que permita la medición precisa y en tiempo real de la temperatura y la humedad en el invernadero, garantizando la confiabilidad de los datos recolectados.
2. Implementar una plataforma digital de monitoreo y análisis de datos, accesible desde dispositivos móviles y web, que facilite la visualización de las condiciones ambientales del invernadero y permita la toma de decisiones informadas.
3. Evaluar la efectividad del sistema IoT en el control de las condiciones climáticas mediante pruebas en un entorno de invernadero real, identificando su impacto en el crecimiento, calidad y rendimiento del cultivo de café.

Planteamiento hipotético

El uso de tecnología IoT en invernaderos para el cultivo de café mejorará significativamente el monitoreo y control de las variables de temperatura y humedad, resultando en una mayor productividad y calidad del café cultivado.

La implementación de sistemas basados en IoT en la caficultura permite a los pequeños productores de regiones como Loja adoptar prácticas agrícolas sostenibles, optimizando recursos y enfrentando los retos del cambio climático de manera efectiva.

Preguntas Científicas

- ¿Cómo influye la integración de tecnología IoT en el control de las variables climáticas sobre la productividad y calidad del café en invernaderos?
- ¿Qué beneficios económicos y ambientales trae el uso de sistemas IoT en la caficultura de la provincia de Loja?
- ¿Cuáles son las principales barreras para la adopción de tecnologías IoT en invernaderos de café y cómo pueden superarse?

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Revisión de literatura

En Europa Brewster et al. (2017) desarrollaron un estudio de IoT in Agriculture Designing a Europe-Wide Large-Scale Pilot, cuyo objetivo fue proponer y validar un esquema de despliegue IoT para agricultura a gran escala, considerando interoperabilidad, captura de datos y comunicación en red. Metodológicamente integraron sensores, conectividad y arquitectura de gestión de datos en un entorno piloto. En cuanto al procesamiento, enfatizan la transmisión estructurada de datos y su disponibilidad para analítica y toma de decisiones. Concluyen que el IoT habilita la toma de datos, la integración de múltiples fuentes de información y la mejora operativa en ambientes agrícolas mediante infraestructuras escalables.

La incorporación de sensores y sistemas de monitoreo en la agricultura (IoT), permite registrar y analizar en tiempo real variables ambientales críticas, como la temperatura y la humedad del aire y del suelo, mejorando la eficiencia del manejo agronómico y reduciendo la variabilidad operativa. En la caficultura, estos sistemas resultan especialmente relevantes frente a la variabilidad climática y el estrés hídrico, puesto que la integración de sensores con plataformas digitales facilita la identificación de patrones ambientales, la corrección de desviaciones respecto de rangos óptimos y el uso más eficiente de los recursos hídricos y del microclima del cultivo (Brewster et al., 2017; Guzmán Vaca et al., 2021).

En la fase de almácigo, Ariza García et al. (2022) y Chanchí Golondrino et al. (2022) coinciden en que las condiciones de temperatura y humedad son factores determinantes para el desarrollo radicular, la supervivencia y el vigor de las plántulas, y advierten que las fluctuaciones ambientales no controladas incrementan el estrés fisiológico y reducen la homogeneidad del crecimiento. De forma complementaria, González Gaitán et al. (2024); establecen que desviaciones térmicas fuera de los rangos óptimos favorecen la aparición de estrés térmico y la proliferación de plagas como la broca del café, comprometiendo la estabilidad fisiológica del cultivo en sus etapas iniciales, lo que refuerza la importancia de mantener rangos térmicos adecuados dentro del manejo agronómico del almácigo.

El equilibrio hídrico constituye un factor determinante en el desarrollo fisiológico del café, tanto a nivel aéreo como radicular. La literatura especializada señala que la humedad relativa del aire condiciona directamente los procesos de transpiración y el vigor vegetal, de modo que desviaciones respecto de los rangos recomendados incrementan la susceptibilidad a enfermedades fúngicas o inducen situaciones de estrés hídrico que afectan el crecimiento de la planta, especialmente en ambientes controlados como los invernaderos (Ruíz-Martínez et al., 2019). De manera complementaria, estudios más recientes sobre el comportamiento del sistema radicular del café evidencian que el contenido de humedad del sustrato debe mantenerse dentro de intervalos adecuados para evitar tanto la marchitez asociada al déficit hídrico como la anoxia provocada por el exceso de agua, lo que confirma la importancia del monitoreo de la humedad del suelo como parte integral del manejo agronómico del cultivo (Montagut & Rey, 2024).

Diversas investigaciones han demostrado el potencial de las tecnologías IoT para el monitoreo y control de variables ambientales en sistemas agrícolas. En este sentido, se ha evidenciado que la automatización basada en el sensado continuo de variables microclimáticas y edáficas, combinada con reglas de control, permite estabilizar las condiciones ambientales y mejorar la gestión agronómica en contextos caracterizados por una creciente variabilidad climática, especialmente en cultivos como el café (Nurwarsito et al., 2024; Salgado Villanueva et al., 2025). No obstante, otros estudios advierten que la incorporación de arquitecturas más complejas, como el edge computing, si bien incrementa la eficiencia y la precisión en el procesamiento de datos, introduce mayores requerimientos técnicos y costos de implementación que pueden limitar su adopción por parte de pequeños productores (García-Mireles et al., 2021). De manera similar, el uso de modelos predictivos avanzados basados en redes neuronales recurrentes aplicadas a sistemas IoT ha mostrado altos niveles de exactitud en la estimación de variables edáficas; sin embargo, la sofisticación de estos enfoques representa una barrera para su aplicación directa en entornos rurales con recursos limitados (Selvanarayanan et al., 2024). En el contexto ecuatoriano, se ha identificado que la adopción efectiva de tecnologías IoT en la caficultura está condicionada por factores socioeconómicos como el costo de implementación y el nivel de capacitación técnica disponible, lo que refuerza la pertinencia de desarrollar soluciones tecnológicas simples, accesibles y replicables,

orientadas a las necesidades reales de los pequeños caficultores (Peña-Holguín et al., 2025).

1.2. Desarrollo teórico y conceptual

El café se reconoce como uno de los productos agrícolas de mayor relevancia económica a nivel mundial. FAOSTAT (2023) reporta que la producción global de café verde alcanzó aproximadamente 11,06 millones de toneladas, lo que evidencia la magnitud del sector y la necesidad de mejorar los procesos productivos desde las etapas iniciales del cultivo para responder a una demanda sostenida y competitiva.

En el contexto internacional, Investopedia (2023) identifica a Brasil, Vietnam y Colombia como los principales países productores de café, mientras que Times of India (2022) destaca que los países nórdicos, especialmente Finlandia, registran los mayores consumos per cápita, superando los 11 kg por persona al año. Este escenario global robustece la importancia de garantizar altos estándares de calidad y productividad mediante un manejo agronómico eficiente y tecnificado.

En Ecuador, el cultivo de café posee un considerable beneficio para el entorno socioeconómico, particularmente en la región sur del país. Durante la fase de almácigo o chapola, la plántula establece su sistema radicular y su estructura foliar inicial, etapa en la que resulta altamente sensible a los cambios de temperatura y humedad. Ariza García et al. (2022) y Chanchí Golondrino et al. (2022) coinciden en que estas fluctuaciones ambientales pueden comprometer la supervivencia, el vigor y la uniformidad del crecimiento del material vegetal.

Desde el punto de vista agronómico, se ha determinado que la temperatura óptima para el desarrollo del almácigo de café se sitúa entre 22 y 26 °C. González Gaitán et al. (2024) señalan que valores fuera de este rango inducen estrés térmico, afectan el crecimiento y favorecen la aparición de plagas. De forma complementaria, Ruíz-Martínez et al. (2019) establecen que la humedad relativa ideal oscila entre 70 % y 85 %, ya que tanto el exceso como el déficit generan desequilibrios fisiológicos y sanitarios.

La humedad del suelo constituye otro factor determinante para el establecimiento radicular del cafeto. Montagut y Rey (2024) indican que mantener valores entre 60 % y

80 % de la capacidad de campo favorece la absorción de nutrientes y evita tanto la anoxia radicular como el estrés hídrico, aspectos críticos durante las etapas tempranas del cultivo.

El concepto de microclima resulta clave para comprender las variaciones locales de temperatura y humedad dentro de un invernadero. Motisi et al. (2019) y NOAA (2015) destacan que estas variaciones influyen directamente en el comportamiento fisiológico del cultivo, justificando la necesidad de instrumentación específica y control continuo de las condiciones ambientales para garantizar estabilidad y rendimiento.

El Internet de las Cosas aplicado a la agricultura se fundamenta en la adquisición de datos mediante sensores, su transmisión a través de redes de comunicación y su análisis en plataformas digitales. Brewster et al. (2017), junto con Kumar et al. (2019) y Guzmán Vaca et al. (2021), demuestran que estos sistemas permiten registrar y analizar en tiempo real variables ambientales críticas, facilitando la automatización de procesos y la toma de decisiones agronómicas informadas, especialmente en entornos controlados como los invernaderos.

1.2.1 Sensor de temperatura y humedad relativa del aire

La medición de la temperatura y la humedad relativa del aire constituye un componente fundamental en el control microclimático de sistemas agrícolas protegidos, especialmente en la etapa de almácigo del cultivo de café, donde pequeñas variaciones ambientales pueden generar estrés fisiológico en las plantas. La temperatura influye directamente en procesos fisiológicos como la tasa metabólica, la fotosíntesis y la respiración vegetal, mientras que la humedad relativa condiciona la transpiración y el balance hídrico del cultivo, afectando el desarrollo y la adaptación de las plántulas (Taiz et al., 2015).

Para la medición de estas variables se emplean sensores ambientales electrónicos que permiten obtener datos continuos del microclima. Entre ellos, el sensor DHT22 (AM2302) integra dos elementos de medición: un termistor de precisión para temperatura y un sensor capacitivo de humedad relativa.

El principio de funcionamiento del sensor de humedad se basa en la variación de la capacitancia de un polímero higroscópico, cuya constante dieléctrica cambia en función de la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Este cambio es interpretado por un circuito interno que convierte la señal analógica en un valor digital proporcional al

porcentaje de humedad relativa. Por su parte, la medición de temperatura se realiza mediante un termistor NTC, cuya resistencia eléctrica varía con la temperatura del ambiente. El microcontrolador interno del sensor procesa ambas señales y las transmite como datos digitales a través de un protocolo de comunicación de un solo hilo (single-wire), lo que facilita su integración con plataformas de adquisición de datos como Arduino o ESP32 (Aosong Electronics, 2018).

1.2.2 Sensor de humedad del suelo

La humedad del suelo constituye una de las variables más importantes en el desarrollo inicial del cafeto, especialmente durante la etapa de almácigo, donde el sistema radicular aún se encuentra en formación y presenta alta sensibilidad a las condiciones del sustrato. El contenido de agua en el suelo influye directamente en la absorción de nutrientes, el crecimiento radicular y la estabilidad fisiológica de la planta. Un déficit hídrico prolongado puede provocar estrés hídrico, disminución del crecimiento y reducción en la eficiencia fotosintética, mientras que el exceso de humedad puede generar condiciones favorables para el desarrollo de patógenos y enfermedades radiculares (Allen et al., 1998).

Para el monitoreo de esta variable se emplean sensores electrónicos que permiten estimar el contenido de agua presente en el sustrato. Entre ellos, el sensor HD-38 es ampliamente utilizado en sistemas de automatización agrícola y prototipos de monitoreo ambiental debido a su simplicidad de funcionamiento y bajo costo.

El principio de operación de este sensor se basa en la conductividad eléctrica del suelo. El dispositivo dispone de dos electrodos metálicos que se insertan en el sustrato. Cuando el contenido de agua en el suelo aumenta, la conductividad eléctrica también se incrementa, reduciendo la resistencia entre los electrodos. Por el contrario, cuando el suelo se encuentra seco, la resistencia eléctrica es mayor. Esta variación de resistencia es interpretada por un circuito electrónico que convierte la señal en una salida proporcional al nivel de humedad del suelo.

El módulo electrónico asociado al sensor permite obtener una señal analógica proporcional al contenido de humedad, así como una salida digital con umbral ajustable, lo que facilita su integración en sistemas de control automático para la activación de sistemas de riego o monitoreo remoto mediante plataformas IoT.

1.2.3 Unidad de proceso y control

La unidad de procesamiento constituye el núcleo de los sistemas de automatización y monitoreo, debido a que integra las funciones de adquisición de datos, procesamiento de información, toma de decisiones y comunicación con sistemas externos. Desde una perspectiva conceptual, los microcontroladores permiten transformar señales físicas provenientes de sensores en información digital que puede ser procesada mediante algoritmos programados para ejecutar acciones de control de forma automática y autónoma.

En sistemas de monitoreo ambiental aplicados a la agricultura, los microcontroladores permiten implementar estrategias de control basadas en umbrales, análisis de variables ambientales y transmisión de datos hacia plataformas de supervisión remota. De esta manera, la unidad de procesamiento se convierte en el elemento encargado de coordinar la interacción entre sensores, actuadores y sistemas de comunicación dentro de una arquitectura de IoT (Brewster et al., 2017; Ray, 2018).

1.3 Actuadores

Los actuadores son dispositivos utilizados para activar señales eléctricas de control en acciones físicas dentro de un sistema automatizado.

1.3.1 Módulos de relé

Los módulos de relé son dispositivos de interfaz electromecánica utilizados para aislar y conmutar cargas de mayor potencia a partir de señales de control de baja potencia emitidas por microcontroladores. Su principio de funcionamiento se basa en la acción de una bobina electromagnética que, al energizarse, genera un campo magnético capaz de desplazar una armadura móvil y cambiar el estado de los contactos eléctricos, permitiendo abrir o cerrar un circuito de potencia sin conexión directa entre la etapa de control y la carga conectada (Omron, 2021).

Cumplen una función esencial porque permiten que una unidad de control, como la ESP32, accione de manera segura elementos de potencia tales como ventiladores, bombas de riego o resistencias calefactoras. De esta forma, se protege la electrónica de control y se garantiza una operación confiable de los actuadores dentro del sistema automatizado (Omron, 2021).

1.3.2 Sistema de riego por atomización

El riego por atomización consiste en la aplicación de agua mediante boquillas que pulverizan el líquido en pequeñas gotas, permitiendo una distribución uniforme sobre el área de cultivo. Este sistema funciona a partir de una bomba hidráulica que genera presión suficiente para impulsar el agua a través de boquillas calibradas, produciendo una niebla fina que favorece la hidratación del sustrato y el control del microclima (FAO, 2011).

1.3.3 Ventilación

La ventilación en sistemas agrícolas protegidos cumple la función de renovar el aire interior, evacuar el exceso de calor y humedad, y favorecer condiciones microclimáticas adecuadas para el desarrollo de las plantas. Su principio de funcionamiento se basa en el movimiento forzado del aire mediante ventiladores y extractores, promoviendo el intercambio entre el aire interno y el externo. Este proceso permite controlar la temperatura, disminuir la acumulación de humedad y mejorar la uniformidad ambiental dentro de la estructura protegida (ASABE, 2003; FAO, 2011).

En términos de diseño, la ventilación mecánica suele evaluarse mediante la tasa de renovación de aire o air changes per hour (ACH), indicador que expresa cuántas veces se reemplaza el volumen total de aire del recinto en una hora. En aplicaciones de agricultura protegida, una ventilación adecuada es clave para mantener el equilibrio térmico e higrométrico del sistema (ASABE, 2003; FAO, 2011).

1.3.4 Resistencia calefactora

La resistencia calefactora es un elemento electrotérmico que transforma la energía eléctrica en calor mediante el efecto Joule, fenómeno por el cual un conductor con resistencia eléctrica disipa energía térmica cuando es atravesado por corriente. En aplicaciones térmicas, los elementos calefactores tubulares suelen emplear una aleación de níquel-cromo (NiCr) como material resistivo debido a su estabilidad térmica, resistencia a la oxidación y capacidad de operar a altas temperaturas (Watlow, 2024).

En este tipo de resistencias, el alambre resistivo se dispone en forma helicoidal y se encuentra rodeado por un material aislante, generalmente óxido de magnesio (MgO), que proporciona simultáneamente aislamiento eléctrico y buena conductividad térmica. La transferencia de calor se produce desde la espiral resistiva hacia la envolvente metálica y

posteriormente hacia el medio a calentar, lo que permite su uso en aplicaciones de calentamiento de aire o superficies (Watlow, 2024).

1.4 Protocolos de comunicación en sistemas IoT

En los sistemas de digitalización y análisis de datos, los protocolos de comunicación cumplen un rol fundamental, ya que permiten el intercambio eficiente de información entre sensores, dispositivos embebidos y plataformas en la nube. La elección del protocolo depende de factores como el consumo energético, la latencia, el volumen de datos transmitidos y la compatibilidad con las plataformas de visualización utilizadas en sistemas de monitoreo (Ray, 2018).

1.4.1 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

MQTT es un protocolo de mensajería ligero basado en el modelo publicador–suscriptor, ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas. Este protocolo funciona sobre el protocolo TCP/IP y está diseñado para operar en entornos con limitaciones de ancho de banda y energía, como sensores y microcontroladores (Brewster et al., 2017).

En este esquema de comunicación, los dispositivos publican datos en canales denominados topics, mientras que otros dispositivos o aplicaciones pueden suscribirse a dichos canales para recibir la información transmitida, sin necesidad de establecer una conexión directa entre el emisor y el receptor.

MQTT es el protocolo nativo utilizado por la plataforma Ubidots, lo que lo convierte en una opción idónea para sistemas de monitoreo, ya que permite la transmisión continua de variables ambientales como temperatura, humedad o humedad del suelo con baja latencia y alta confiabilidad.

1.4.2 HTTP / REST

(Hypertext Transfer Protocol) / (Representational State Transfer).

El protocolo CoAP fue diseñado específicamente para dispositivos con recursos limitados, como sensores y nodos de redes de bajo consumo. Este protocolo funciona sobre UDP, lo que permite reducir la sobrecarga de comunicación y mejorar la eficiencia energética en comparación con protocolos basados en TCP.

Su funcionamiento es similar al de HTTP, pero optimizado para entornos IoT. No obstante, su implementación es menos frecuente en plataformas comerciales de visualización de datos, por lo que su uso suele limitarse a entornos experimentales o académicos (Shelby et al., 2014).

La integración con servicios web y plataformas de almacenamiento de datos; sin embargo, puede generar un mayor consumo de recursos debido al establecimiento repetido de conexiones para cada intercambio de información (Ray, 2018).

1.4.3 CoAP (Constrained Application Protocol)

El protocolo CoAP fue diseñado específicamente para dispositivos con recursos limitados, como sensores y nodos de redes de bajo consumo. Este protocolo funciona sobre UDP, lo que permite reducir la sobrecarga de comunicación y mejorar la eficiencia energética en comparación con protocolos basados en TCP.

Su funcionamiento es similar al de HTTP, pero optimizado para entornos IoT. No obstante, su implementación es menos frecuente en plataformas comerciales de visualización de datos, por lo que su uso suele limitarse a entornos experimentales o académicos (Shelby et al., 2014).

1.4.4 WebSockets

El protocolo WebSockets permite establecer una comunicación bidireccional persistente entre cliente y servidor. A diferencia del protocolo HTTP tradicional, mantiene una conexión abierta que permite enviar y recibir datos de forma continua, reduciendo significativamente la latencia en aplicaciones que requieren actualización en tiempo real.

Aunque WebSockets es ampliamente utilizado en aplicaciones web interactivas y sistemas de monitoreo en tiempo real, su implementación en sensores de bajo consumo es menos común debido a los requerimientos de conexión permanente (Ray, 2018).

Los diferentes protocolos de comunicación utilizados en sistemas de IoT, presentan características particulares en términos de modelo de comunicación, consumo de recursos, latencia y aplicaciones. La selección del protocolo depende de los requerimientos específicos del sistema, especialmente en entornos de monitoreo donde se requiere eficiencia energética y transmisión confiable de datos. Con el fin de sintetizar estas características, en la **Tabla 1**, se presenta una comparación entre algunos de los

protocolos de comunicación más utilizados en aplicaciones IoT, considerando su modelo de comunicación, eficiencia energética y aplicaciones típicas.

Tabla 1. Comparaciones en protocolo de comunicación

Protocolo	Modelo de comunicación	Consumo de recursos	Tiempo real	Uso en IoT
MQTT	Publicador–suscriptor	poco-bajo	alto	muy alto
HTTP	Cliente–servidor	medio alto	medio	medio
CoAP	Cliente–servidor (UDP)	muy bajo	medio	poco-bajo
WebSockets	Bidireccional persistente	medio	alto	medio

Fuente: Ray (2018) y Shelby et al. (2014).

1.5 Plataformas de digitalización y análisis de datos (IoT)

Las plataformas IoT permiten almacenar, visualizar y analizar los datos transmitidos por los dispositivos, lo que facilita la toma de decisiones y el monitoreo remoto en diferentes aplicaciones de automatización y digitalización de procesos (Ray, 2018).

1.5.1 Ubidots

Ubidots es una plataforma IoT enfocada en la visualización y almacenamiento de datos en tiempo real. Soporta de forma nativa el protocolo MQTT, lo que facilita la integración con microcontroladores como ESP32; Permite la creación de dashboards personalizados, alertas automáticas y almacenamiento histórico de datos, siendo especialmente conveniente para proyectos de monitoreo ambiental y agrícola (Ubidots, 2023).

1.5.2 ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma IoT desarrollada por MathWorks que se integra con MATLAB, lo que la hace adecuada para el análisis matemático y el procesamiento avanzado de señales.

Su principal limitación es la cantidad de datos de almacenamiento, ya que no está pensada para monitoreo intensivo en tiempo real, sino más bien para análisis posterior de datos (MathWorks, 2022).

1.5.3 Firebase

Es una plataforma de Google orientada al desarrollo de aplicaciones web y móviles. Permite almacenamiento en tiempo real y sincronización de datos, aunque no está específicamente diseñada para aplicaciones IoT industriales o agrícolas. Generalmente se utiliza en aplicaciones móviles o en sistemas IoT con enfoque en el desarrollo de aplicaciones (Google, 2023).

1.5.4 AWS IoT / Azure IoT Hub

Las plataformas AWS IoT y Azure IoT Hub ofrecen soluciones IoT a gran escala, con alta capacidad de procesamiento, almacenamiento y seguridad. Sin embargo, su complejidad de implementación y costos asociados las hacen menos adecuadas para proyectos académicos o prototipos de bajo costo (Amazon Web Services, 2022; Microsoft, 2022).

En función de las características de estas plataformas, en la **Tabla 2**, se presenta una comparación entre algunas de las principales plataformas de visualización y análisis de datos utilizadas en aplicaciones IoT.

Tabla 2. Comparación entre las plataformas de visualización

Plataforma	Protocolo principal	Visualización	Análisis de datos	Aplicación típica
Ubidots	MQTT / HTTP	Alta	Media	Monitoreo en tiempo real
ThingSpeak	HTTP / MQTT	Media	Alta (MATLAB)	Análisis matemático
Firebase	HTTP / WebSockets	Media	Baja	Apps móviles
AWS IoT	MQTT	Alta	Muy alta	Sistemas industriales
Azure IoT	MQTT / AMQP	Alta	Muy alta	Industria 4.0

Fuente: Ray (2018); MathWorks (2022).

En función de las características del sistema desarrollado, el uso del protocolo MQTT junto con la plataforma Ubidots resulta la elección adecuada debido a su bajo consumo de recursos y funcionalidad entre la ESP32 y la plataforma Ubidots, facilitando la integración y capacidad de monitoreo en tiempo real, aspectos clave para aplicaciones IoT en entornos agrícolas.

1.6 Normativas y estándares

Se consideran diferentes normativas y estándares técnicos relacionados con el manejo del cultivo en invernaderos, la automatización de los equipos y la comunicación de datos en sistemas IoT, con el fin de garantizar su correcto funcionamiento y confiabilidad.

1.6.1 FAO – Buenas prácticas en agricultura protegida

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) establece lineamientos técnicos para el manejo agronómico de cultivos en sistemas protegidos como invernaderos. Estas directrices buscan optimizar las condiciones ambientales, el uso del agua y el manejo del suelo para mejorar el crecimiento de las plantas y la eficiencia productiva. En este contexto, las buenas prácticas agrícolas propuestas por la FAO se caracterizan por promover el control adecuado del microclima dentro de los invernaderos, especialmente en variables como temperatura y humedad, así como el manejo eficiente del riego y del balance hídrico del cultivo. Además, incluyen recomendaciones para la ventilación y el control ambiental con el fin de mantener condiciones estables para el desarrollo vegetal, al mismo tiempo que fomentan prácticas agrícolas sostenibles orientadas a mejorar la productividad y reducir el impacto ambiental en los sistemas de producción protegida (FAO, 2011).

1.6.2 ASABE – Normas para ventilación en estructuras agrícolas

La American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) define estándares para el diseño y operación de sistemas de ventilación en instalaciones agrícolas, incluyendo invernaderos. Estas normas permiten dimensionar adecuadamente los sistemas de ventilación para mantener condiciones ambientales estables. En particular, se caracterizan por establecer criterios técnicos para determinar la tasa de renovación de aire dentro de los invernaderos, conocida como Air Changes per Hour (ACH), lo que permite evaluar la capacidad de ventilación del sistema. Asimismo, estas normas consideran el diseño de ventilación natural o mecánica según las condiciones de la estructura agrícola, promoviendo el control de temperatura y humedad mediante la circulación del aire. De igual forma, incluyen lineamientos para el dimensionamiento adecuado de ventiladores y extractores, garantizando una adecuada distribución del aire y contribuyendo al equilibrio térmico del ambiente de cultivo (ASABE, 2003).

1.6.3 IEC 60204-1 – Seguridad eléctrica en sistemas automatizados

La norma IEC 60204-1 establece los requisitos de seguridad para el equipamiento eléctrico utilizado en máquinas y sistemas de control. Su objetivo es proteger a los operadores y garantizar el funcionamiento seguro de los sistemas eléctricos. Esta normativa se caracteriza por definir criterios para el diseño seguro de instalaciones eléctricas en equipos automatizados, incluyendo requisitos relacionados con la protección frente a sobrecargas, fallos eléctricos y riesgos asociados al uso de energía eléctrica. Asimismo, establece normas para la correcta instalación del cableado, los sistemas de control y los dispositivos de protección, permitiendo reducir riesgos operativos y garantizar la confiabilidad de los sistemas automatizados utilizados en aplicaciones industriales y tecnológicas (IEC, 2016).

1.6.4 IEC 60529 – Grados de protección IP

La norma IEC 60529 define los grados de protección que proporcionan los gabinetes o envolventes eléctricas frente a polvo y agua. En sistemas agrícolas automatizados se recomienda el uso de protección IP65 o superior para proteger los dispositivos electrónicos. Esta norma se caracteriza por clasificar el nivel de protección que ofrecen los equipos electrónicos frente a la penetración de partículas sólidas y líquidos, permitiendo identificar el grado de resistencia de los dispositivos frente a condiciones ambientales adversas. Además, establece criterios para la protección de sensores, microcontroladores y módulos electrónicos instalados en ambientes húmedos o con presencia de polvo, como ocurre en los invernaderos. La aplicación de estos grados de protección contribuye a mejorar la confiabilidad y la vida útil de los equipos electrónicos mediante el uso de gabinetes y cajas de control adecuadamente selladas (IEC, 2013).

1.6.5 OASIS MQTT – Protocolo de comunicación IoT

MQTT es un protocolo de comunicación ligero diseñado para sistemas IoT que requieren transmitir datos entre dispositivos y plataformas en la nube. Utiliza un modelo de comunicación basado en publicador–suscriptor. Este protocolo se caracteriza por utilizar un servidor intermediario denominado broker, encargado de gestionar el intercambio de información entre los dispositivos conectados. Además, presenta un bajo consumo de ancho de banda y recursos de procesamiento, lo que lo hace adecuado para dispositivos con capacidad limitada como sensores y microcontroladores. Su arquitectura permite

transmitir datos de forma eficiente y confiable en sistemas de monitoreo remoto, facilitando la comunicación continua entre los dispositivos IoT y las plataformas de visualización o almacenamiento de datos (Banks & Gupta, 2014).

1.6.6 IEEE 802.11 – Comunicación inalámbrica Wi-Fi

El estándar IEEE 802.11 define las especificaciones técnicas de redes inalámbricas Wi-Fi utilizadas para la comunicación entre dispositivos electrónicos y redes de datos. Este estándar se caracteriza por establecer los protocolos de transmisión inalámbrica que permiten la interconexión de dispositivos en redes locales sin necesidad de cableado físico. Asimismo, contempla el funcionamiento en diferentes bandas de frecuencia, principalmente 2.4 GHz y 5 GHz, lo que permite la transmisión de datos a diferentes velocidades según la tecnología utilizada. En sistemas IoT, este estándar facilita la conexión de microcontroladores y sensores a internet, permitiendo la transmisión de información hacia plataformas de monitoreo y análisis de datos en tiempo real (IEEE, 2016).

1.6.7 ECMA-404 – Formato JSON

El estándar ECMA-404 define la sintaxis del formato JSON (JavaScript Object Notation), utilizado para estructurar datos transmitidos entre dispositivos y plataformas digitales. Este formato se caracteriza por ser un mecanismo ligero de intercambio de información basado en una estructura de pares clave-valor, lo que facilita la organización y transmisión de datos en aplicaciones digitales. Además, su simplicidad permite que sea fácilmente interpretado por diferentes lenguajes de programación y plataformas web, lo que lo convierte en una herramienta ampliamente utilizada en sistemas IoT. Debido a su flexibilidad y compatibilidad con servicios web y APIs, JSON es utilizado frecuentemente para enviar datos provenientes de sensores hacia plataformas de monitoreo y análisis en la nube (ECMA International, 2017).

1.6.8 IEEE 1451 – Sensores inteligentes

El estándar IEEE 1451 define la interfaz para sensores inteligentes y sistemas de medición conectados a microcontroladores. Permite integrar sensores con sistemas embebidos de manera estandarizada. Este estándar se caracteriza por proporcionar un marco de comunicación que facilita la interoperabilidad entre sensores y dispositivos de

procesamiento, permitiendo que diferentes sensores puedan integrarse a sistemas de monitoreo sin necesidad de configuraciones complejas. Además, incorpora mecanismos para la identificación automática de sensores y la estandarización de sus parámetros de medición, lo que facilita su uso en sistemas de adquisición de datos y monitoreo ambiental. Estas características favorecen la integración de sensores inteligentes en aplicaciones de automatización y sistemas IoT (IEEE, 2014).

1.6.9 IEC 61508 – Seguridad

La norma IEC 61508 establece requisitos para el diseño seguro de sistemas electrónicos programables, incluyendo sistemas embebidos utilizados en control y automatización. Esta normativa se caracteriza por definir los niveles de integridad de seguridad conocidos como SIL (Safety Integrity Level), los cuales permiten evaluar el grado de confiabilidad requerido en sistemas electrónicos críticos. Asimismo, establece lineamientos para el desarrollo seguro del hardware y del software utilizado en sistemas automatizados, considerando aspectos relacionados con el diseño, verificación y validación de los sistemas. Su aplicación permite garantizar la confiabilidad y seguridad de los sistemas de control utilizados en diferentes aplicaciones industriales y tecnológicas (IEC, 2010).

1.7 Formas estadística del rendimiento del cultivo

Las formas estadísticas del rendimiento del cultivo corresponden al conjunto de métodos estadísticos utilizados para analizar, organizar e interpretar los datos obtenidos del desarrollo de las plantas,

1.7.1 Muestreo probabilístico simple

El muestreo probabilístico simple es una técnica estadística en la cual todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser seleccionados. Este tipo de muestreo es ampliamente utilizado en investigaciones debido a que permite obtener una muestra representativa y realizar inferencias válidas sobre la población total, siempre que se definan correctamente el nivel de confianza y el margen de error (Hernández Sampieri et al., 2014).

La determinación del tamaño de la muestra se realiza mediante la **Ecuación 1**.

$$n = \frac{(N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q)}{[e^2 (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q]}$$

Ecuación 1.

donde:

- n = tamaño de la muestra
- N = tamaño de la población
- Z = valor asociado al nivel de confianza
- e = margen de error
- p = probabilidad de ocurrencia del evento
- q = 1 - p

1.7.2 Variables agronómicas de evaluación

Para la evaluación del rendimiento del cultivo se utilizan variables cuantitativas y cualitativas que reflejan el desarrollo vegetativo y el estado sanitario de las plantas. Entre las variables más empleadas se encuentran la altura de la planta, el diámetro de copa, la incidencia de enfermedades fitosanitarias y la supervivencia al trasplante, debido a que permiten caracterizar la calidad del material vegetal y el efecto del manejo agronómico aplicado (FAO, 2017; Venegas et al., 2018).

1.7.3 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva permite resumir y organizar la información obtenida mediante medidas de tendencia central y dispersión, tales como el promedio, el valor máximo, el valor mínimo y la desviación estándar, facilitando la interpretación inicial de los datos (Walpole et al., 2012). Consecuentemente, la media aritmética permite determinar el valor promedio de un conjunto de datos, tal como se muestra en la **Ecuación 2**, mientras que la desviación estándar permite cuantificar el grado de dispersión de los datos con respecto al promedio, como se presenta en la **Ecuación 3**.

Media aritmética:

$$X = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i$$

Ecuación 2.

Desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 3.

1.7.4 Pruebas de normalidad: Kolmogorov-Smirnov

Antes de aplicar pruebas inferenciales, es necesario verificar si las variables analizadas siguen una distribución normal. Para este fin se emplea la prueba de Kolmogorov-Smirnov, la cual compara la distribución empírica de los datos con una distribución normal teórica (Ghasemi & Zahediasl, 2012).

Variable: corresponde a cada parámetro cuantitativo evaluado, como la altura de la planta y el diámetro de copa.

p-valor: representa la probabilidad de que los datos provengan de una distribución normal. Para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$:

- Si p-valor $> 0,05$, no se rechaza la hipótesis nula (distribución normal).
- Si p-valor $< 0,05$, se rechaza la hipótesis nula (no normalidad).

1.7.5 Prueba t de student

Cuando las variables presentan una distribución normal, se aplica la prueba t de Student para muestras independientes aplicando la **Ecuación 4**, la cual permite comparar los promedios de dos grupos (Montgomery & Runger, 2014).

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Ecuación 4.

donde:

\bar{X}_1, \bar{X}_2 , = promedios de los grupos

S_1, S_2 = desviaciones estándar,

n_1, n_2 = tamaños de muestra.

1.7.6 Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney

Cuando los datos no cumplen el supuesto de normalidad, se emplea la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, la cual compara dos muestras independientes sin asumir una distribución específica de los datos (Conover, 1999). En este análisis se plantean las siguientes hipótesis:

Las hipótesis se definen como:

- **H₀**: No existen diferencias significativas entre los grupos.
- **H₁**: Existen diferencias significativas entre los grupos.

El estadístico U se calcula a partir de las sumas de rangos de cada grupo; para el primer grupo se determina mediante la **Ecuación 5** y para el segundo grupo mediante la **Ecuación 6**. El valor final del estadístico corresponde al menor entre U₁ y U₂. Cuando el tamaño de las muestras es grande, el estadístico puede aproximarse a una distribución normal mediante una transformación a la variable z, tal como se presenta en la **Ecuación 7**.

El estadístico U se calcula mediante:

$$U_1 = n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad \text{Ecuación 5.}$$

$$U_2 = n_1 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad \text{Ecuación 6.}$$

El valor de U corresponde al menor entre U₁ y U₂. Para muestras grandes, el estadístico puede transformarse a una distribución normal mediante:

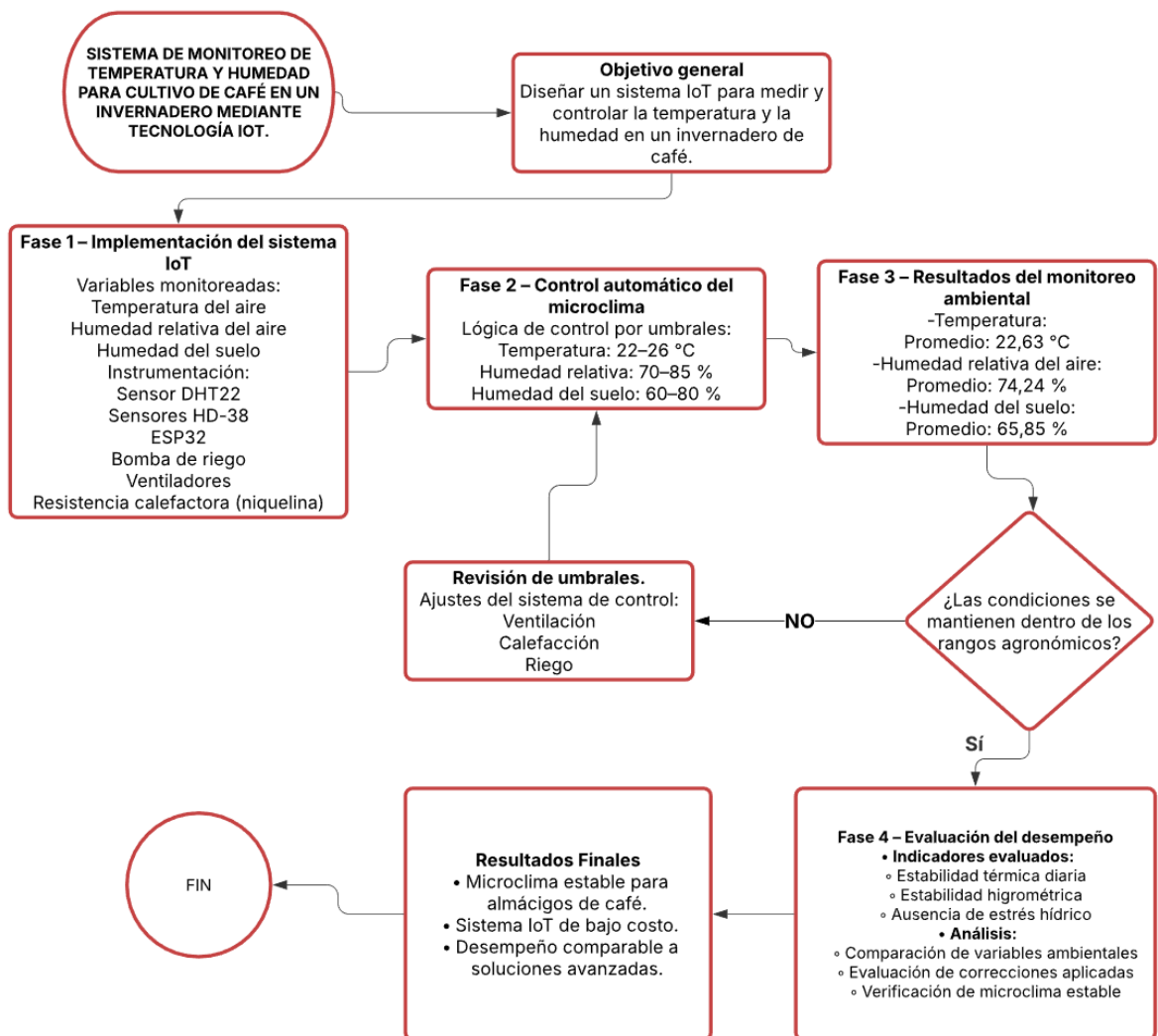
$$z = \frac{U - \frac{n_1 - n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \quad \text{Ecuación 7.}$$

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Diagrama general del proyecto

El diagrama general del proyecto representado en la **Figura 1**, inicia con la definición del objetivo general, continúa con la fase de implementación de sensores, actuadores y microcontrolador, seguido de la etapa de control automático del microclima a partir de umbrales establecidos para temperatura, humedad relativa del aire y humedad del suelo. Posteriormente, se presentan los resultados del monitoreo ambiental, la verificación de si las condiciones se mantienen dentro de los rangos agronómicos, y finalmente la evaluación el desempeño del sistema, permitiendo determinar la estabilidad del microclima y la efectividad de las correcciones aplicadas.

Figura 1. Diagrama de flujo sobre el proceso de funcionamiento del proyecto.



2.2 Contexto de la investigación

La investigación se realizó en el barrio La Argelia, al sur de la ciudad de Loja, en las instalaciones de la Universidad Nacional de Loja, específicamente en la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, como se observa en la **Figura 2**.

Figura 2. Ubicación del área de estudio



Nota: La ubicación es en la ciudad de Loja en la Universidad Nacional de Loja Facultad de Energía

2.3 Diseño y alcance de la investigación

El alcance del estudio es descriptivo y comparativo.

Es descriptivo porque se caracterizan las condiciones microclimáticas y el comportamiento de las chapolas de café en cada sistema de almácigo, a partir de la recolección sistemática de datos. Asimismo, es comparativo, ya que se analizan y contrastan los resultados obtenidos entre el sistema automatizado y el no automatizado, permitiendo identificar diferencias en el desempeño de ambos métodos.

La investigación no busca establecer correlaciones estadísticas complejas entre múltiples variables, sino describir y comparar de manera objetiva el impacto del uso de la automatización en la etapa inicial del cultivo de café.

2.4 Tipo y métodos de investigación

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo y aplicativo, con un tipo de investigación descriptivo–explicativo y un diseño experimental y transversal, implementando y automatizando un prototipo con IoT, bajo condiciones controladas en un invernadero de café.

2.5 Población y muestra

La población perteneció a un almácigo de 150 plántulas de café de la variedad archimor en fundas de vivero de 6×8" (15 x 23 cm), distribuidas sobre un área útil de 1,15 × 0,90m (1,035 m²) dentro del invernadero.

2.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación empleó un enfoque cuantitativo, debido a que el análisis se basa en la medición objetiva y sistemática de variables microclimáticas que influyen en el desarrollo de las chapolas de café. La técnica principal de recolección de datos fue la observación directa estructurada, apoyada en instrumentos de medición.

Como instrumentos de recolección se utilizaron sensores de temperatura y humedad ambiental, así como registros automáticos generados por el sistema de monitoreo, los cuales permitieron obtener datos continuos y comparables durante todo el periodo de evaluación. Estos registros fueron almacenados en bases de datos digitales para su posterior análisis.

2.7 Procesamiento de la evaluación

La validez de los instrumentos de recolección de datos se garantizó mediante la validez de contenido, asegurando que las variables medidas correspondan directamente con los objetivos de la investigación y con los fundamentos teóricos previamente establecidos. Los sensores utilizados fueron seleccionados en función de su rango de operación, precisión y compatibilidad con las condiciones ambientales del área de estudio.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Previamente, el almácigo se preparó con un sustrato compuesto por 65 % de tierra húmifera (humus), 25 % de materia orgánica descompuesta (tamo de café) y 10 % de arena de río, tamizado en cernidor de 1" para remover partículas gruesas y obtener textura franco-arenosa, y se emplearon fundas de vivero de 6"×8" para lograr colinos aptos para el trasplante en aproximadamente seis meses, evitando deformaciones radiculares, como se identifica en la **Figura 3**.

Figura 3. (a) Ubicación del sustrato en las fundas de vivero; (b) Almácigos de café antes de ingresar al invernadero.



(a)

(b)

3.1 Cálculos de ventilación y dimensionamiento térmico.

Para el diseño del sistema de control microclimático del invernadero fue necesario realizar una serie de cálculos relacionados con el volumen del recinto, el caudal de ventilación requerido y el dimensionamiento térmico del sistema de calefacción. Estos cálculos permiten estimar las condiciones operativas necesarias para garantizar una adecuada renovación del aire y mantener condiciones ambientales estables dentro del sistema experimental. Asimismo, el análisis matemático facilita la selección de los dispositivos de ventilación y calefacción adecuados para el prototipo desarrollado. En la **Tabla 3**, se presentan los principales cálculos realizados para el dimensionamiento del

invernadero, incluyendo las ecuaciones utilizadas, los valores considerados y los resultados obtenidos en cada etapa del proceso

Tabla 3. Cálculos realizados para el invernadero.

Cálculo	Ecuación	Valores utilizados	Resultado
Volumen del invernadero	$V = A \times h$	$A = 1,035 \text{ m}^2$; $h = 0,88 \text{ m}$	$0,9108 \text{ m}^3$
Caudal requerido	$Q = V \times N$	$V = 0,9108 \text{ m}^3$; $N = 70/\text{h}$	$63,756 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal corregido	$Q_{\text{corregido}} = Q \times \text{factor}$	Factor aplicado (1,2)	$76,5072 \text{ m}^3/\text{h}$
Número de ventiladores	$N = Q_{\text{total}} / q_{\text{ventilador}}$	$Q_{\text{total}} = 76,5072 \text{ m}^3/\text{h}$; $q_{\text{ventilador}} = 203,88 \text{ m}^3/\text{h}$	0,37 unidades
Dimensionamiento térmico	$Q_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$ $Q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{\infty}^4)$	Potencia estimada = 720 W; Factor seguridad = 1,10	$\approx 800 \text{ W}$

Nota. Los cálculos permiten determinar el volumen del invernadero, el caudal de ventilación necesario y la potencia térmica requerida para mantener condiciones microclimáticas adecuadas dentro del sistema experimental.

3.2 Componentes físicos

La instrumentación inicia con un sensor DHT22 para temperatura (-40 a $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$; precisión $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; resolución $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa del aire (0 – $100 \text{ } \%$; precisión $\pm 2 \text{ } \%$; resolución $0,1 \text{ } \%$), y dos higrómetros HD-38 para humedad del suelo utilizando la salida analógica (tensión proporcional a humedad) y la salida digital (umbral ajustable). Para el funcionamiento lógico del sistema se utilizó una tarjeta ESP32-DEVKITC de 38 pines con convertidores SAR ADC de 12 bits y referencia de $3,3 \text{ V}$ (resolución efectiva $\approx 0,81 \text{ mV}$ por cuenta). La programación se realizó en Arduino IDE, integrando lectura de sensores, lógica de decisión por umbrales y conmutación de actuadores mediante relevadores.

3.2.1 Sensor DHT22

El DHT22 es un sensor digital ampliamente utilizado en sistemas de monitoreo ambiental debido a su adecuada relación entre precisión, estabilidad y costo. Este dispositivo es capaz de medir temperatura en un rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa en un rango de 0 a 100 %, con precisiones aproximadas de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en temperatura y $\pm 2\%$ en humedad relativa, características que lo hacen apropiado para aplicaciones en invernaderos, sistemas de monitoreo climático y prototipos de agricultura inteligente.

Además, su interfaz digital reduce significativamente la susceptibilidad al ruido eléctrico en comparación con sensores analógicos, permitiendo una comunicación más estable con los sistemas de adquisición de datos y las plataformas de IoT. En la **Tabla 4** se presentan las principales características técnicas del sensor DHT22.

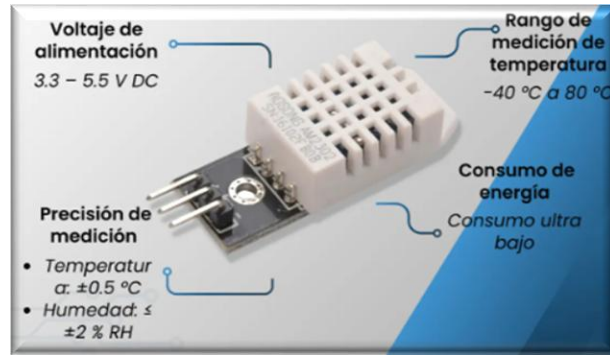
Tabla 4. Características técnicas del sensor DHT22.

Característica	Especificación
Tipo de sensor	Digital de temperatura y humedad
Modelo	DHT22 (AM2302)
Rango de temperatura	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$
Precisión temperatura	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Rango de humedad relativa	0 % a 100 % HR
Precisión humedad	$\pm 2\%$ HR
Protocolo de comunicación	Digital (single-wire)
Voltaje de operación	3,3 V – 6 V
Frecuencia de muestreo	0,5 Hz (una medición cada 2 s)

Fuente: Adaptado de Aosong Electronics (2018).

En la **Figura 4** se muestra el sensor DHT22, donde se observa su encapsulado plástico perforado que permite la correcta exposición del elemento sensible al aire circundante.

Figura 4. Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22



Fuente: Aosong Electronics (2018), AM2302 / DHT22.

Existen otras alternativas comerciales para la medición de temperatura y humedad relativa, como los sensores DHT11, SHT31 y BME280. El DHT11 presenta un rango de medición más limitado y menor precisión, lo que restringe su uso en aplicaciones que requieren mayor exactitud en la medición ambiental. Por otro lado, sensores como el SHT31 o el BME280 ofrecen niveles superiores de precisión y estabilidad, pero su costo y complejidad de integración suelen ser mayores.

En este contexto, el DHT22 representa un equilibrio adecuado entre desempeño técnico y viabilidad económica, especialmente en proyectos de investigación aplicada orientados al monitoreo ambiental en sistemas agrícolas, donde la replicabilidad y la escalabilidad del sistema son aspectos relevantes (González et al., 2020).

3.2.2 Sensor HD-38

El sensor de humedad del suelo HD-38 es un dispositivo resistivo diseñado para estimar el contenido de agua presente en el sustrato mediante la medición de la conductividad eléctrica entre dos electrodos. Este tipo de sensor se utiliza con frecuencia en sistemas de monitoreo agrícola de bajo costo, proyectos de investigación experimental y sistemas de riego automatizados.

El módulo incluye un comparador electrónico que permite ajustar un umbral de humedad mediante un potenciómetro, generando una salida digital cuando el nivel de humedad alcanza el valor establecido. Adicionalmente, la salida analógica permite obtener valores continuos de humedad que pueden ser registrados por microcontroladores como Arduino o ESP32 para su análisis.

En la **Tabla 5**, se presentan las principales características técnicas del sensor de humedad del suelo HD-38, mientras que en la **Figura 5**, se muestra el dispositivo utilizado en sistemas de monitoreo agrícola.

Tabla 5. Sensor de humedad del suelo HD-38

Característica	Especificación
Tipo de sensor	Resistivo
Variable medida	Humedad del suelo
Rango de funcionamiento	0 – 100 % de humedad del suelo
Tipo de salida	Analógica (0–3.3/5 V) y digital
Voltaje de operación	3.3 V – 5 V DC
Método de medición	Conductividad eléctrica del suelo
Ajuste de sensibilidad	Potenciómetro integrado

Fuente: Jones (2004).

Figura 5. Sensor de humedad del suelo HD-38



Fuente: Jones (2004).

Las otras tecnologías más avanzadas como sensores capacitivos de humedad del suelo o sondas TDR (Time Domain Reflectometry), las cuales presentan mayor precisión y estabilidad a largo plazo. Sin embargo, estas soluciones implican costos elevados y mayor complejidad de implementación, lo que limita su adopción en sistemas de bajo costo o proyectos piloto. En contraste, el HD-38, pese a su sensibilidad al deterioro por corrosión,

resulta adecuado para estudios experimentales de corto y mediano plazo, siempre que se acompañe de una correcta calibración y análisis estadístico de los datos (Jones, 2004).

3.2.3 Placa ESP32-DEVKITC

La placa ESP32-DEVKITC es una plataforma de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32, diseñado para aplicaciones embebidas y sistemas de monitoreo conectados a internet. Este dispositivo se caracteriza por integrar un procesador de 32 bits, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, múltiples interfaces de comunicación y convertidores analógico–digitales (ADC) que permiten la adquisición de señales provenientes de sensores ambientales.

El microcontrolador incorpora convertidores ADC de 12 bits tipo SAR (Successive Approximation Register), los cuales permiten digitalizar señales analógicas con una resolución aproximada de 0,81 mV por cuenta, lo que resulta adecuado para la adquisición de datos provenientes de sensores de humedad del suelo y otras variables ambientales utilizadas en sistemas de monitoreo agrícola. Estas características permiten realizar un procesamiento eficiente de la información y transmitir los datos hacia plataformas de supervisión remota mediante protocolos de comunicación inalámbrica (Espressif Systems, 2021).

En la **Tabla 6**, se presentan las principales características técnicas de la placa ESP32-DEVKITC, mientras que en la **Figura 6**, se muestra la plataforma utilizada como unidad de procesamiento dentro del sistema de monitoreo desarrollado.

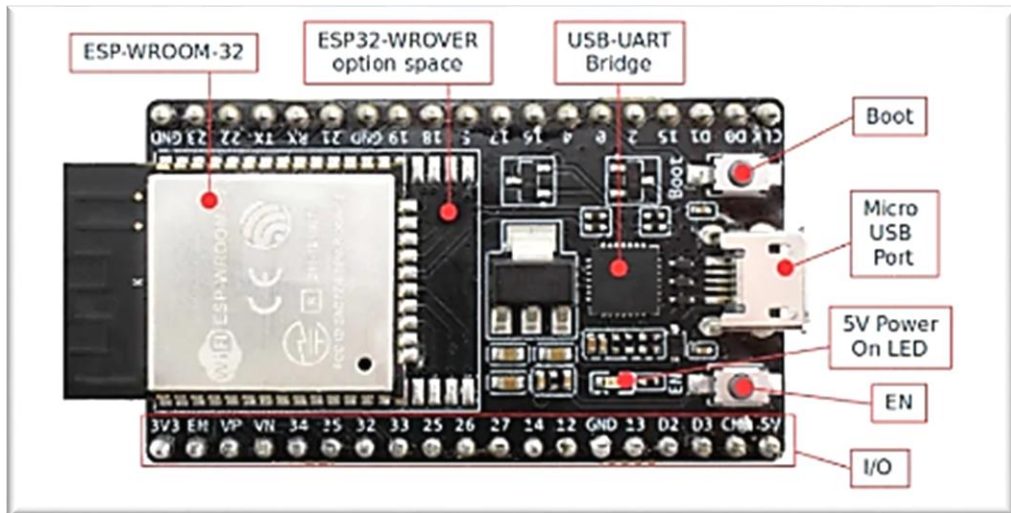
Tabla 6. Características técnicas de la placa ESP32-DEVKITC

Característica	Especificación
Tipo de dispositivo	Microcontrolador
Modelo	ESP32-DEVKITC
Arquitectura	32 bits
Frecuencia de reloj	Hasta 240 MHz
Memoria RAM	520 KB
Conectividad	Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth
Resolución ADC	12 bits
Voltaje de operación	3.3 V
Interfaces de comunicación	UART, SPI, I2C, PWM

Característica	Especificación
Aplicaciones	IoT, monitoreo ambiental, automatización

Fuente: Espressif Systems (2021).

Figura 6. Placa de desarrollo ESP32-DEVKITC



Fuente: Espressif Systems (2021).

La placa ESP32-DEVKITC se caracteriza por incorporar convertidores analógico–digitales de 12 bits tipo SAR, con una resolución efectiva cercana a 0,81 mV por cuenta, lo que permite una adecuada digitalización de las señales provenientes de los sensores de humedad del suelo. Además, su arquitectura de 32 bits y su conectividad Wi-Fi integrada la convierten en una solución idónea para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) en entornos agrícolas (Brewster et al., 2017).

En comparación con plataformas como Arduino Uno, Arduino Mega o ESP8266, la ESP32 ofrece mayor capacidad de procesamiento, mayor resolución ADC y conectividad integrada, integrando la conectividad en la misma tarjeta. Esto mejora la eficiencia energética y la confiabilidad del sistema, aspectos clave en aplicaciones de monitoreo continuo.

La programación en Arduino IDE permite una implementación flexible de la lógica de control por umbrales, así como la integración de protocolos de comunicación como MQTT. La transmisión periódica de datos a plataformas IoT como Ubidots facilita el

almacenamiento, visualización y análisis estadístico de la información, fortaleciendo el enfoque científico del estudio al permitir la trazabilidad y replicabilidad de los resultados.

3.2.4 Módulo relé de 1–2 canales

En el sistema implementado, los módulos de relé se utilizan para conmutar el ventilador axial, la bomba de riego y la resistencia calefactora, actuando como interfaz entre las salidas GPIO del ESP32 y los dispositivos de potencia. La bobina del relé opera normalmente a 5 V, mientras que los contactos permiten controlar circuitos de mayor tensión y corriente.

Las principales características del módulo de relé utilizado en el sistema se presentan en la **Tabla 7** y en la **Figura 7**, se observa la imagen del módulo relé de uno a dos canales

Tabla 7. Características del módulo de relé utilizado para el control de actuadores

Característica	Especificación
Tipo de módulo	Relé electromecánico
Número de canales	1 – 2
Voltaje de activación	5 V
Tipo de señal de control	Digital (GPIO ESP32)
Capacidad de conmutación	10 A / 250 VAC
Aplicación	Control de actuadores

Fuente: Omron (2021).

Figura 7. Módulo relé de 1–2 canales utilizado para el control de actuadores



Fuente: Omron (2021).

3.2.5 Bomba de diafragma y boquillas de atomización del sistema de riego

El sistema implementado está compuesto por cuatro boquillas de atomización distribuidas uniformemente y una bomba de diafragma capaz de generar una presión aproximada de 5,86 bar.

La lógica de control se basa en la lectura periódica de la humedad del suelo. Cuando el valor medido es inferior al umbral establecido, el sistema activa la bomba durante un minuto, permitiendo restablecer el nivel de humedad del sustrato.

El funcionamiento del sistema de riego por atomización y la disposición de sus componentes se muestran en la **Figura 8**, mientras que las características principales del sistema de riego se presentan en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Características del sistema de riego por atomización

Característica	Especificación
Tipo de sistema	Atomización
Número de boquillas	4
Tipo de bomba	Diafragma
Presión de trabajo	~5,86 bar
Control	Automático por humedad del suelo
Tiempo de riego	1 minuto

Fuente: FAO (2011).

Figura 8. Bomba de diafragma y boquillas de atomización del sistema de riego



(a) Bomba

Fuente: Comet (2020).

3.2.6 Ventilación

El sistema de ventilación está compuesto por un ventilador axial IP55 instalado en la pared lateral, alineado con la dirección predominante de los vientos, y dos extractores superiores encargados de evacuar el aire caliente acumulado en la parte superior del recinto.

El sistema fue diseñado para alcanzar aproximadamente 60–70 renovaciones de aire por hora (ACH), favoreciendo el control térmico y la estabilidad del microclima.

Las características del sistema de ventilación se presentan en la **Tabla 9** y La disposición del ventilador axial y los extractores instalados en el sistema se muestra en la **Figura 9**.

Tabla 9. Características del sistema de ventilación

Característica	Especificación
Tipo de ventilador	Axial
Protección	IP55
Ubicación	Pared lateral
Extractores	2 superiores
Renovación de aire	60 – 70 ACH
Aplicación	Control microclimático

Fuente: ASABE (2003).

Figura 9. Ventilador axial y extractores del sistema de ventilación



Fuente: ASABE (2003)

3.2.7 Resistencia.

El sistema utiliza una resistencia tubular helicoidal de niquelina (NiCr) con una potencia de 800 W y un voltaje de operación de 110–120 VAC. La estructura en espiral mejora la transferencia de calor, mientras que el aislamiento interno de óxido de magnesio (MgO) garantiza seguridad eléctrica y eficiencia térmica, y los terminales cerámicos proporcionan resistencia al calor en los puntos de conexión; las características técnicas del elemento calefactor se presentan en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Resistencia calefactora en espiral de 800 W

Característica	Especificación
Tipo	Resistencia tubular
Material resistivo	Niquelina (NiCr)
Potencia	800 W
Voltaje	110–120 VAC
Aislamiento	Óxido de magnesio (MgO)
Terminales	Cerámicos

Fuente: Watlow (2024).

Para complementar esta descripción, en la **Figura 10**, se presenta la resistencia calefactora en espiral de 800 W utilizada en el sistema.

Figura 10. Resistencia calefactora en espiral de 800 W



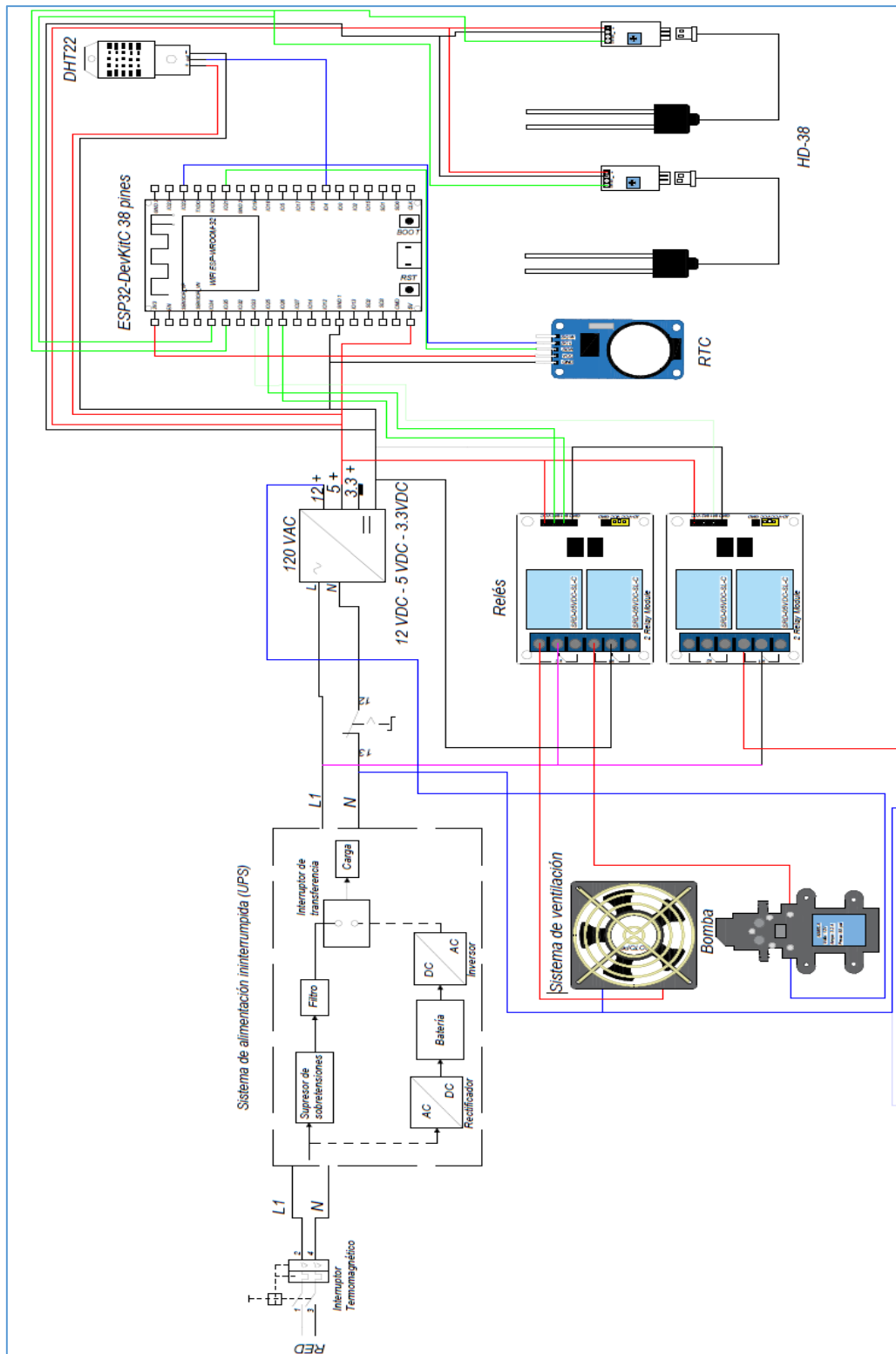
Fuente: Watlow (2024).

El sistema utilizó un UPS de 120 VAC y una fuente de alimentación que proporciona salidas de 12 V, 5 V y 3,3 V para los diferentes componentes del sistema. Estas tensiones permiten alimentar adecuadamente tanto los dispositivos electrónicos de control como los sensores y módulos auxiliares empleados en el prototipo. Los sensores se conectaron al microcontrolador ESP32 de acuerdo con el tipo de señal de salida de cada dispositivo, garantizando la correcta adquisición de las variables ambientales y del estado del sustrato. Por su parte, los actuadores fueron controlados mediante módulos de relé de 5 V, lo que permite la conmutación segura de los dispositivos de potencia, asegurando el aislamiento eléctrico entre la etapa de control y la etapa de potencia del sistema.

La Figura 11, muestra el diagrama general de cableado y la distribución de las fuentes de alimentación utilizadas en el sistema, donde se observa la interconexión entre los sensores, la ESP32, los módulos de relé y los dispositivos de actuación del prototipo IoT.

Se recomienda que los dispositivos electrónicos utilizados en sistemas de monitoreo y control en entornos agrícolas cuenten con gabinetes de protección con grado IP65 señalada en la norma IEC 60529, con el fin de proteger los componentes frente a la presencia de polvo, humedad y salpicaduras de agua. En ambientes como invernaderos o sistemas de riego, donde existen condiciones de alta humedad relativa y posible exposición a partículas, el uso de envolventes con este nivel de protección ayuda a preservar el correcto funcionamiento de sensores, microcontroladores y módulos de control. De esta manera, la implementación de protección IP65 contribuye a prolongar la vida útil de los dispositivos, mejorar la confiabilidad del sistema y reducir el riesgo de fallos eléctricos durante la operación continua del prototipo.

Figura 11. Diagrama de cableado y fuente de alimentación.



Nota. Esquema de conexión eléctrica y distribución de voltajes del sistema de monitoreo y control basado en ESP32.

3.3 Componentes lógicos

Los componentes lógicos del sistema permitieron la programación, comunicación y visualización de los datos generados por el prototipo IoT. Estos incluyen herramientas de desarrollo, librerías y protocolos que facilitan la conexión del microcontrolador ESP32 a internet, el envío de datos hacia la plataforma Ubidots y su monitoreo en tiempo real.

3.3.1 Ubidots

Es una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) en la nube que permite recibir, almacenar y visualizar datos provenientes de dispositivos conectados. Ofrece dashboards con gráficos, indicadores y mapas para monitorear variables en tiempo real y realizar análisis de datos remotos (Ubidots, 2024).

3.3.2 Arduino IDE

Es un entorno de desarrollo integrado que permite escribir, compilar y cargar programas en microcontroladores como el ESP32. Utiliza un lenguaje basado en C/C++ y facilita la interacción con sensores, actuadores y módulos de comunicación mediante librerías específicas (Arduino, 2023).

3.3.3 Librería WiFi.h

Es una librería utilizada en el entorno Arduino para microcontroladores como el ESP32, que permite establecer la conexión a redes WiFi, gestionar la autenticación y habilitar la transmisión de datos entre el dispositivo y servidores externos a través de internet (Espressif Systems, 2023).

3.3.4 Librería PubSubClient.h

Es una librería que implementa el protocolo MQTT en dispositivos embebidos, permitiendo enviar y recibir mensajes mediante el modelo publicador–suscriptor. Se utiliza ampliamente en aplicaciones IoT por su bajo consumo de recursos y eficiencia en redes de comunicación (Banks & Gupta, 2014).

3.3.5 Protocolo MQTT

Es un protocolo de mensajería ligero diseñado para la comunicación entre dispositivos en sistemas IoT. Funciona bajo un modelo de publicación y suscripción a través de un

broker, permitiendo el envío eficiente de datos en redes con ancho de banda limitado (Banks & Gupta, 2014).

3.3.6 Formato JSON

Es un formato ligero de intercambio de datos utilizado para estructurar y transmitir información entre dispositivos y servidores. En aplicaciones IoT se emplea para enviar variables como temperatura, humedad o estado de sensores hacia plataformas en la nube (ECMA International, 2017).

3.4 Programación

La programación del sistema IoT se realizó utilizando las librerías WiFi.h y PubSubClient.h, lo que permitió la conexión del ESP32 a la red WiFi y el establecimiento de comunicación con el broker MQTT de Ubidots mediante autenticación por token. El firmware incorpora un mecanismo de reconexión automática para garantizar la continuidad de la comunicación ante posibles pérdidas de enlace. Durante la operación normal del sistema, las mediciones se realizan cada 6 minutos, enviando los datos en formato JSON al servidor MQTT de Ubidots para el monitoreo remoto de las variables. **La Figura 12**, muestra el flujo de operación del sistema IoT basado en ESP32, incluyendo la inicialización de sensores (DHT22, RTC e higrómetros), la configuración de la red y la transmisión de datos hacia la nube, mientras que el código completo del sistema se indica en el **Anexo 1**.

Figura 12. Pseudocódigo del sistema de monitoreo y control IoT

<pre> INICIO // 1. Configuración de credenciales y comunicación MQTT Definir mqtt_broker ← "industrial.api.ubidots.com" Definir mqtt_username ← "BBUS- URT9g918HVjQZKFdxAW0hrc551RrZ" Definir mqtt_password ← NULL Definir mqtt_port ← 1883 Definir clientID ← "ESP32-DEV1" Definir topic_dev_pub ← "/v1.6/devices/dev_esp32_iot" Definir topic_sw_sub ← "/v1.6/devices/dev_esp32_iot/switch/lv" // 2. Inicialización de objetos y variables </pre>	<pre> Cada 30 segundos: Leer temperatura y humedad del DHT22. Leer humedad de suelo de dos higrómetros. Calcular humedad promedio del suelo. Leer setpoint entre 22 °C y 26 °C. Si temperatura es menor a 22 °C: Encender niquelina. Apagar ventilador y bomba. Si temperatura está entre 22.5°C y 25°C: Mantener ventilador, bomba y niquelina apagados. Si temperatura está entre 25.5°C y 28°C: Encender ventilador. Apagar bomba y niquelina. </pre>
---	--

<pre> Inicializar sensores DHT22 e higrómetros. Inicializar RTC. Inicializar conexión WiFi. Inicializar cliente MQTT con WiFiClient. Configurar broker, puerto y credenciales MQTT. Configurar topic de publicación y suscripción. Inicializar pines de salida: ventilador, bomba y niquelina. Mantener apagados ventilador, bomba y niquelina al inicio. // 3. Bucle principal REPETIR continuamente: Leer hora actual del RTC. Verificar conexión WiFi y MQTT. </pre>	<pre> Si temperatura supera 28 °C: Encender ventilador. Apagar niquelina. Activar bomba cada media hora. Si la bomba fue activada: Apagarla después de 90 segundos. Si la humedad ambiente es menor a 65 %: Activar bomba cada media hora. Si la humedad ambiente supera 85 % y la temperatura es mayor o igual a 24 °C: Encender ventilador. Cada 6 minutos: Crear mensaje JSON con temperatura, humedad ambiente, humedad de suelo y setpoint. Enviar datos al servidor MQTT. FIN </pre>
--	--

La visualización de datos se realizó en un dashboard de Ubidots, donde se mostraron temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, fecha, ubicación y la imagen del prototipo, actualizados cada 6 minutos y ajustados a la zona horaria local.

El sistema de control se estructuró en tres lógicas: temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, activando calefacción, ventilación o riego según umbrales agronómicos establecidos para almacigos de café. La temperatura se controló en el rango óptimo de 22–26 °C para evitar estrés térmico; la humedad relativa se mantuvo entre 70–85 % para prevenir enfermedades fúngicas y el estrés hídrico; y la humedad del suelo entre 60–80 % para evitar tanto el déficit hídrico como el exceso que favorece la anoxia y la proliferación de patógenos. Todos los eventos fueron enviados a Ubidots mediante MQTT, permitiendo el registro y análisis de los datos en tiempo real. Se realizaron registros y calibraciones para asegurar la calidad de los datos utilizando componentes de bajo costo compatibles con ESP32. El estudio se desarrolló en un solo invernadero y depende de la conectividad a internet, lo que puede limitar su aplicación en zonas rurales.

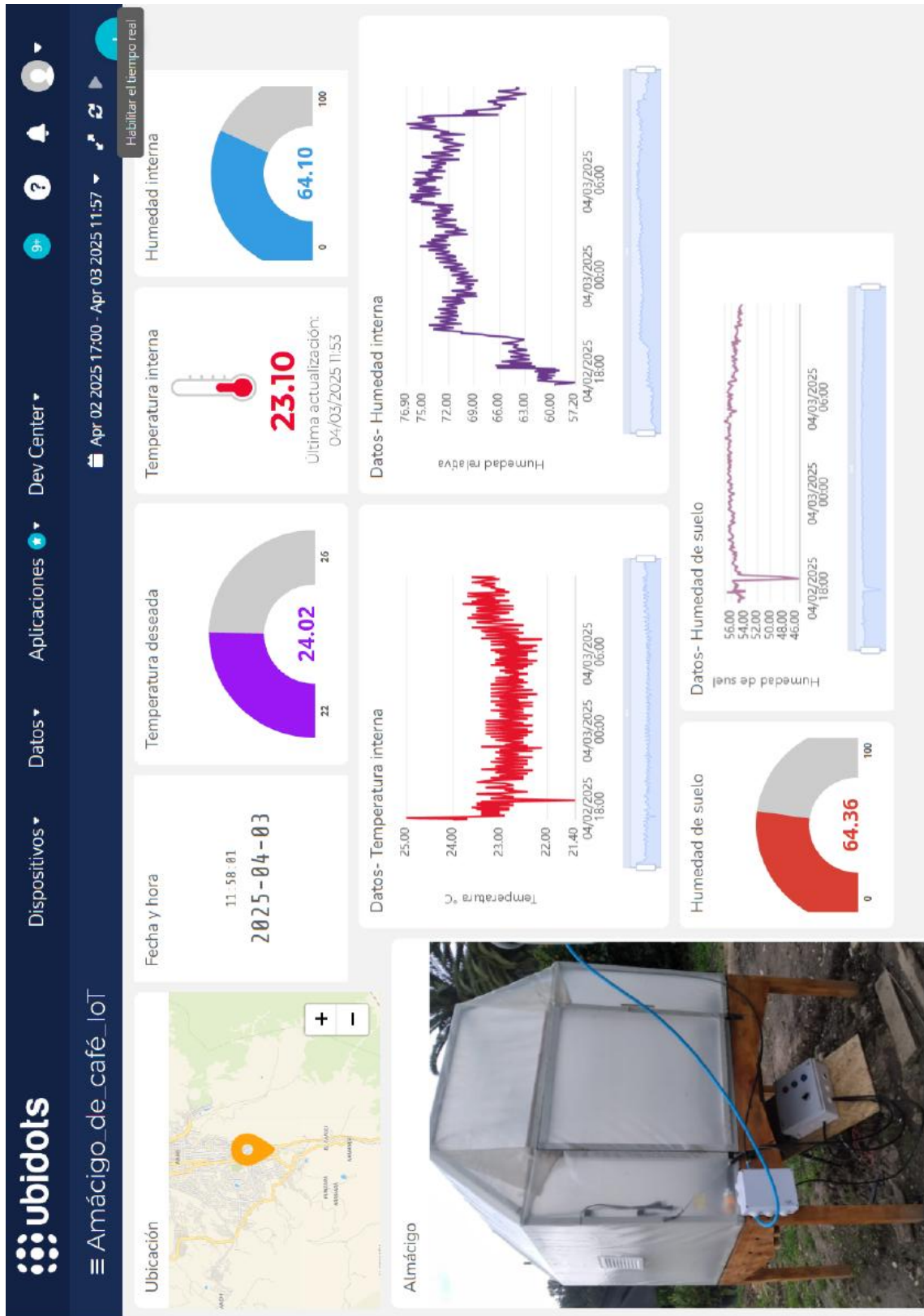
3.5 Dashboard

La **Figura 13**, muestra el dashboard desarrollado en la plataforma de Ubidots para el monitoreo en tiempo real del sistema de almacigo automatizado. El panel integra widgets que visualizan la ubicación, fecha y hora de registro, temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo, además de gráficos históricos y una imagen del prototipo. Esta interfaz permite la supervisión remota y el análisis del microclima dentro del invernadero.

Widgets del dashboard

1. Ubicación: mapa que muestra la localización del sistema IoT.
2. Fecha y hora: indicador del momento en que se registran los datos.
3. Temperatura deseada: valor de referencia para el control térmico.
4. Temperatura interna: medición de temperatura dentro del invernadero.
5. Humedad interna: medición de humedad relativa del aire.
6. Gráfico de temperatura interna: evolución de la temperatura en el tiempo.
7. Gráfico de humedad interna: comportamiento de la humedad relativa en el tiempo.
8. Imagen del prototipo: fotografía del sistema implementado.
9. Humedad del suelo: valor actual de humedad del sustrato.
10. Gráfico de humedad del suelo: variación temporal de la humedad del suelo.

Figura 13. Dashboard en Ubidots.

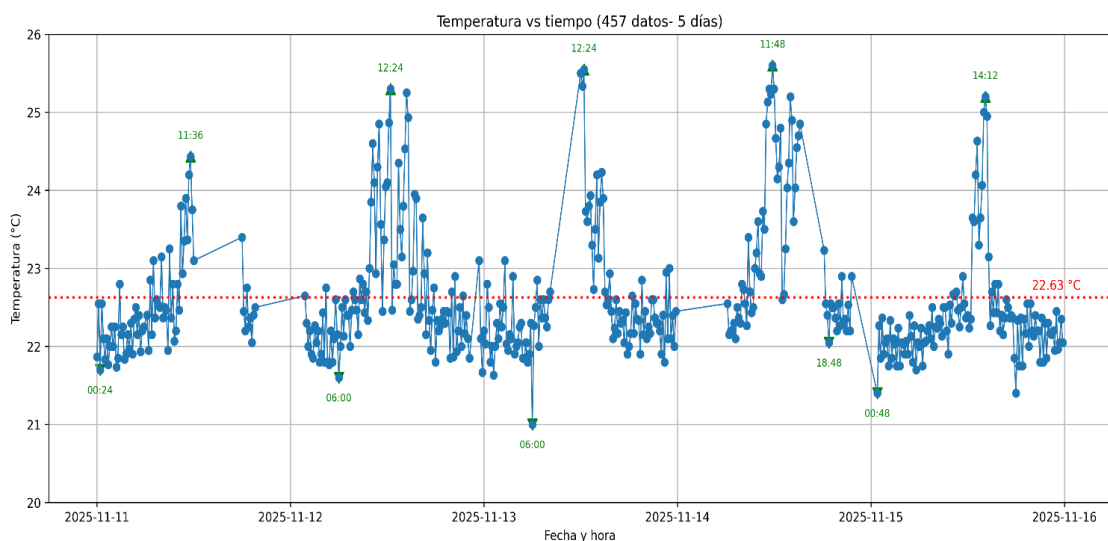


3.5.1 Variación temporal de la temperatura dentro del invernadero

Durante los cinco días de monitoreo continuo, comprendidos entre el 11 y el 15 de noviembre de 2025, la temperatura del invernadero presentó un comportamiento cíclico asociado a la radiación solar diaria. Los valores registrados se mantuvieron dentro del rango óptimo para almácigos de café (22–26 °C), con un mínimo de 21,0 °C en horas de la madrugada y un máximo de 25,6 °C al mediodía. El promedio general de temperatura fue de 22,63 °C, evidenciando condiciones térmicas estables durante el periodo analizado.

Los picos térmicos se presentaron de manera repetitiva entre las 11:30 y 12:50 horas, coincidiendo con las horas de mayor carga térmica. Cuando la temperatura superó los 26 °C, el sistema activó de manera inmediata el ventilador axial y los extractores superiores, logrando que la temperatura retornara a los valores de confort en lapsos aproximados de 8 a 12 minutos, sin sobre correcciones ni oscilaciones; por el otro extremo de temperatura mínima se observa que durante las primeras horas de la madrugada se registraron las temperaturas más bajas del periodo, cercanas al límite inferior del rango óptimo. Cada vez que la temperatura descendió por debajo de 22 °C, el sistema activó automáticamente la niquelina, generando un aporte térmico constante hasta restablecer las condiciones adecuadas. En la **Figura 14**, se observa el tiempo promedio de corrección fue de aproximadamente 10 a 15 minutos, la calefacción logró estabilizar el microclima para que no baje la temperatura y mantener a zona de confort térmico establecida.

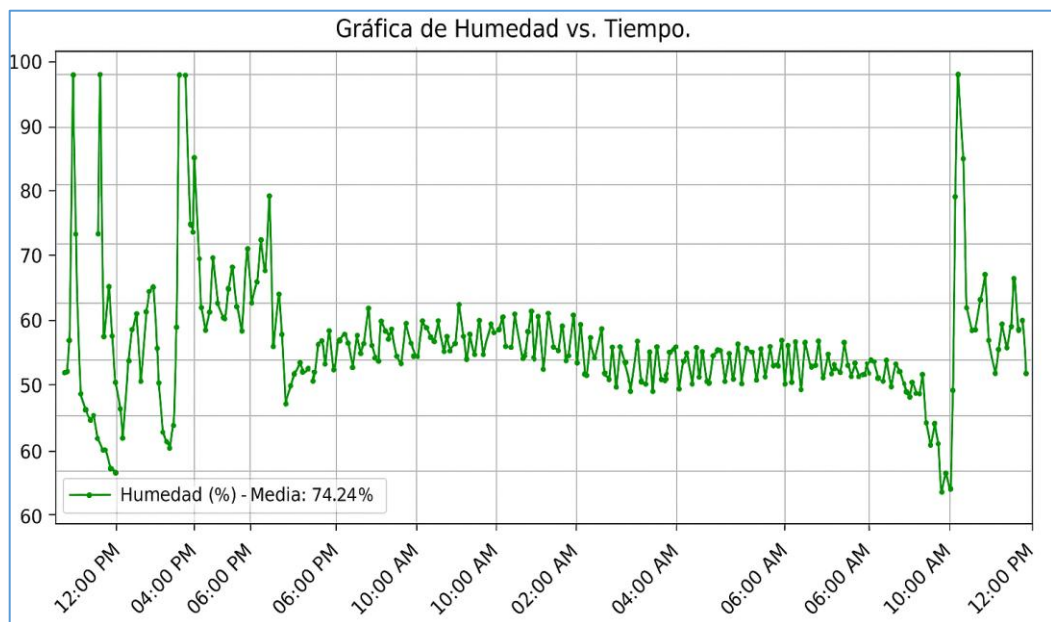
Figura 14. Temperatura interna del almácigo.



3.5.2 Comportamiento de la humedad relativa del aire

En el caso de la humedad se va a tomar el periodo de un día, la humedad relativa del aire presentó fluctuaciones comprendidas aproximadamente entre 60 % y 100 %, con una media de 74,24 %, ubicándose mayoritariamente dentro del intervalo fisiológico recomendado para el cultivo de café, que oscila entre 70 y 85 %. En las primeras horas de la tarde y al final de la mañana se observaron picos cercanos al 100 %, asociados a procesos de condensación interna y a la disminución del gradiente térmico entre el interior y el exterior del invernadero. Ante estos valores altos, el sistema activó la lógica de deshumidificación mediante los extractores superiores, logrando reducir la humedad hacia niveles seguros sin alterar de manera abrupta el microclima. A lo largo de la noche y hasta el amanecer, la humedad se mantuvo estable, cercana a 74–76 %, lo que evidencia que el invernadero conserva naturalmente condiciones húmedas. Los eventos por debajo del 65 % fueron escasos y de corta duración, probablemente vinculados a variaciones de ventilación natural o ingresos de aire más seco; en esos casos, el sistema evitó descensos bruscos mediante ventilación mínima programada. En la **Figura 15** se observa el conjunto, y el comportamiento de la HR, lo cual confirma que el prototipo es capaz de conservar el equilibrio hídrico del microclima durante un ciclo completo de 24 horas, garantizando condiciones adecuadas para el desarrollo temprano de las plántulas.

Figura 15. Humedad relativa del almácigo.



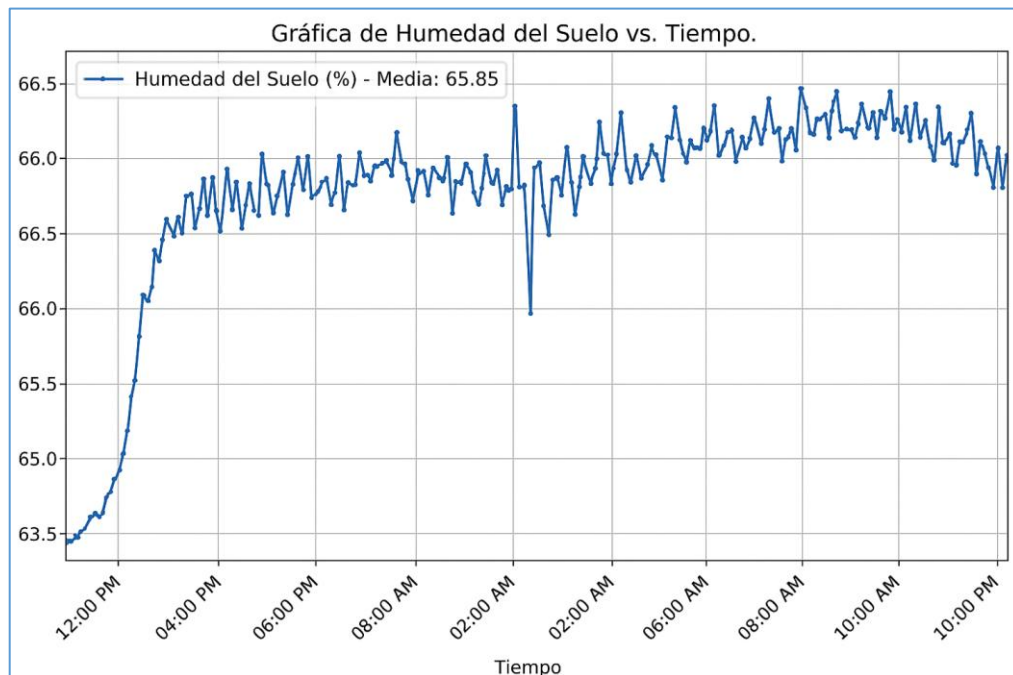
El comportamiento de la humedad relativa presentada en un día mostró una dinámica coherente con los patrones reportados en microclimas agrícolas controlados. Los valores fluctuaron entre 60 % y 100 %, manteniéndose un promedio de 74,24 % recomendado para almácigos de café, encontrándose en el rango adecuado de 70 % y 85 % según Ruíz-Martínez et al. (2019). Los picos cercanos al 100 %, registrados en horas de transición térmica, son consistentes con los procesos de condensación descritos por Motisi et al. (2019), quienes señalan que las variaciones bruscas entre la radiación incidente y la temperatura interna del invernadero generan acumulación de humedad en forma de saturación del aire. En estos eventos, la activación automática de los extractores permitió reducir la humedad hacia valores seguros, lo que concuerda con los hallazgos de Brewster et al. (2017) y Kumar et al. (2019), quienes demostraron que los sistemas IoT con ventilación controlada pueden corregir eficientemente las condiciones de sobrehumedad y prevenir la aparición de enfermedades fúngicas.

3.5.3 Humedad del suelo

La humedad del suelo presentó un comportamiento estable durante el periodo de observación diario, con valores que oscilaron entre 63,0 % y 66,8 %, y una media de 65,85 %, ubicándose dentro del rango agronómico recomendado para almácigos de café, el cual es entre 60 % y 80 % de humedad, La curva de la Figura13, evidencia un incremento progresivo durante las primeras horas, seguido de una fase de estabilización durante la tarde, noche y madrugada, lo que indica que el sustrato mantuvo una buena capacidad de retención hídrica y no mostró signos de desecación crítica. No se registraron eventos por debajo del umbral de riego < 60 %, por lo que el sistema no activó la bomba durante este ciclo diario, lo cual confirma que el sustrato y las condiciones ambientales mantuvieron niveles adecuados sin necesidad de intervención hidráulica.

Para visualizar el comportamiento temporal de esta variable durante el periodo de observación, en la **Figura 16** se presenta la gráfica de la humedad del suelo en función del tiempo, donde se aprecia la estabilidad del sustrato dentro del rango óptimo para el desarrollo de los almácigos de café.

Figura 16. Gráfica de Humedad del Suelo vs Tiempo.



El comportamiento de la humedad del suelo observado se encuentra dentro de los parámetros favorables para el establecimiento de almácigos de café, tal como plantean Montagut y Rey (2024), quienes indican que valores entre 60 % y 80 % permiten una adecuada oxigenación y disponibilidad hídrica en sustratos franco-arenosos. La media registrada de 65,85 % confirma que el sistema mantuvo condiciones óptimas para la absorción radicular, coincidiendo con lo descrito por Ruiz-Martínez et al. (2019), quienes señalan que humedades inferiores al 60 % generan estrés hídrico y afectan el vigor inicial, mientras que excesos por encima del 80 % favorecen procesos de anoxia y proliferación de hongos del suelo. En este estudio, no se observaron eventos que alcanzaran dichos umbrales críticos, lo que sugiere que el sistema de riego por atomización, combinado con la capacidad de retención del sustrato, proporcionó una humedad estable y fisiológicamente adecuada.

3.5.4 Caracterización y comparación de los colinos de café

Para la caracterización y comparación de los colinos de café en ambos almácigos se aplicó un muestreo probabilístico simple, considerando una población total de 150 plantas por sistema. El tamaño de la muestra (n), se determinó en función de un nivel de confianza del 95%, un margen de error del 10 % y un valor de k de 1,96, lo que permitió seleccionar una muestra representativa con la **Ecuación 1**, este procedimiento aseguró que los datos

obtenidos sean confiables y permitan realizar inferencias válidas sobre el comportamiento de toda la población evaluada.

$$n = \frac{150 * 1,96^2 * 50 * 50}{10^2 * (150 - 1) + 1,96^2 * 50 * 50} = 59,79 \approx 60$$

- Nivel de confianza del 95%
- Margen de error del 10%
- Población 150
- Valor de k para un nivel de confianza del 95% es 1,96

Con el tamaño de la muestra definido, se procedió a la selección de las unidades muestrales dentro del conjunto de plantas disponibles. Para ello, cada planta fue numerada del 1 al 150 con el fin de facilitar la identificación y el proceso de selección. En la **Figura 17**, se muestra la distribución de las plantas enumeradas, donde los números en color negro representan la totalidad de las plantas consideradas en el área de estudio, mientras que los números resaltados en color rojo corresponden a las plantas seleccionadas como parte de la muestra para el análisis experimental. Este procedimiento permitió identificar de manera clara y organizada las unidades muestrales utilizadas durante el desarrollo del estudio y en el **Anexo 2**, se puede observar de forma detallada la toma de muestras para la comparación.

Figura 17. Plantas de café enumeradas para escoger la muestra

1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141
2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112	122	132	142
3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103	113	123	133	143
4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144
5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145
6	16	26	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126	136	146
7	17	27	37	47	57	67	77	87	97	107	117	127	137	147
8	18	28	38	48	58	68	78	88	98	108	118	128	138	148
9	19	29	39	49	59	69	79	89	99	109	119	129	139	149
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150

Nota. Los números negros representan todas las plantas del área de estudio y los números rojos las plantas seleccionadas para la muestra.

3.5.5 Variables evaluadas en las plántulas de café

Para evaluar el desarrollo de las plántulas de café se consideraron tres variables principales: **altura de la planta, diámetro de copa y presencia de enfermedades fitosanitarias**. La altura de la planta se midió en milímetros desde la base del tallo hasta el ápice, permitiendo determinar el crecimiento vertical de cada plántula. Por su parte, el diámetro de copa se utilizó como indicador del desarrollo foliar y del vigor de la planta, midiendo la expansión lateral de la estructura foliar. Asimismo, se realizó un registro cualitativo de la presencia o ausencia de síntomas visibles de enfermedades fitosanitarias en cada individuo. En la **Figura 18** se muestra la comparación del diámetro de copa, mientras que en la **Figura 19** se presenta la comparación de la altura de la planta.

Figura 18. Comparación del diámetro de copa

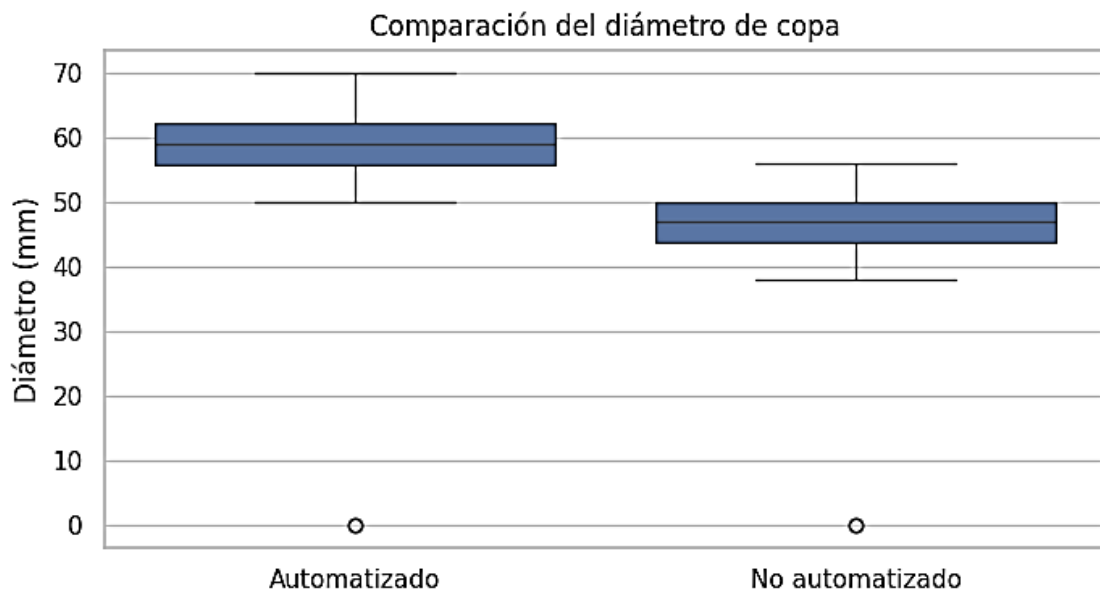
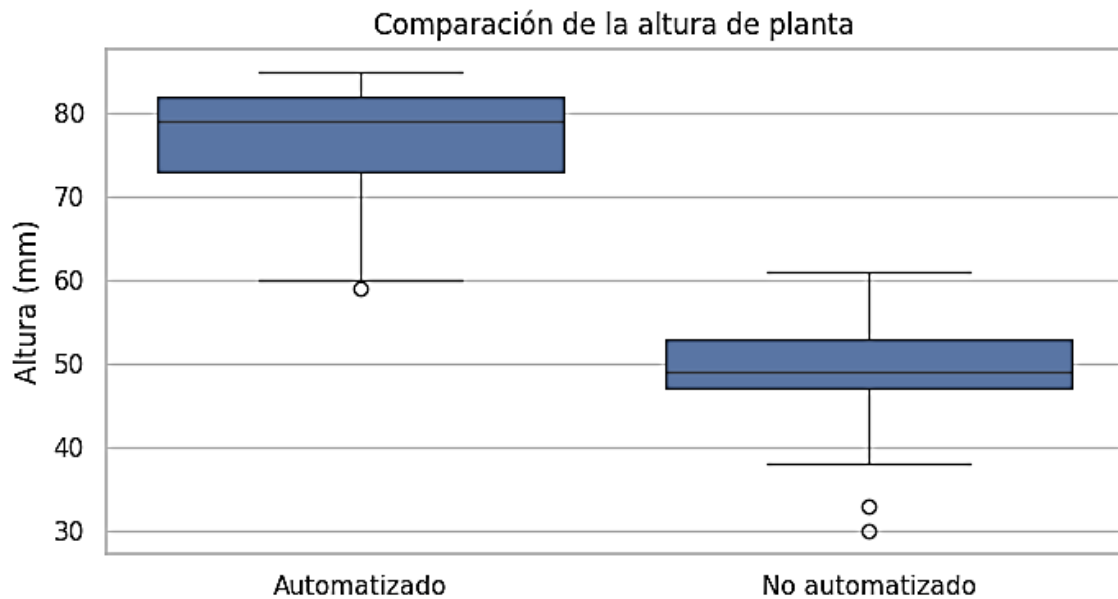


Figura 19. Comparación de la altura de la planta



Los datos de altura y diámetro de copa de la planta siguen una distribución normal, se ha realizado la prueba de Kolmogorov-Smirnov. En base a ello se plantea la **Tabla 11**.

Tabla 11. Datos de altura y diámetro evaluados.

Prototipo	Variable	p-valor (K-S)	Conclusión
Automatizado	Diámetro de copa de la planta	0,8624	La distribución de los datos es normal ($p > 0,05$); no se rechaza la hipótesis nula (H_0).
Automatizado	Altura de planta	0,02066	La distribución de los datos no es normal ($p < 0,05$); se rechaza la hipótesis nula (H_0).
No automatizado	Diámetro de copa de la planta	0,7694	La distribución de los datos es normal ($p > 0,05$); no se rechaza la hipótesis nula (H_0).
No automatizado	Altura de planta	0,3379	La distribución de los datos es normal ($p > 0,05$); no se rechaza la hipótesis nula (H_0).

A partir de los resultados de la prueba de normalidad presentados en la **Tabla 11**, se observa que la variable **altura de la planta en el sistema automatizado** no cumple con el supuesto de normalidad ($p < 0,05$). Debido a esta condición, se aplicó la **prueba no paramétrica U de Mann-Whitney** para comparar las diferencias entre los grupos de estudio (almácigo automatizado y no automatizado). Esta prueba permite evaluar si existen diferencias estadísticamente significativas entre dos muestras independientes sin

asumir una distribución normal de los datos. Para ello, se calcularon los estadísticos mediante las **Ecuación 5** y **Ecuación 6**, respectivamente, a partir de las sumas de rangos de cada grupo.

Se analizó el comportamiento estadístico de las variables de crecimiento evaluadas, se realizó el estudio de la distribución normal de los datos correspondientes al diámetro de copa y a la altura de las plántulas de café, tanto en el sistema automatizado como en el sistema no automatizado. Este análisis permite observar la dispersión y la tendencia de los valores registrados dentro de la población y de la muestra estudiada. En las **Figuras 20** y **21** se presenta la distribución normal correspondiente al diámetro de copa de la planta para los sistemas automatizado y no automatizado, respectivamente. De igual manera, en las **Figuras 22** y **23** se muestra la distribución normal de la altura de la planta, considerando tanto la población como la muestra en ambos sistemas de cultivo.

Figura 20. Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de planta (Automatizado).

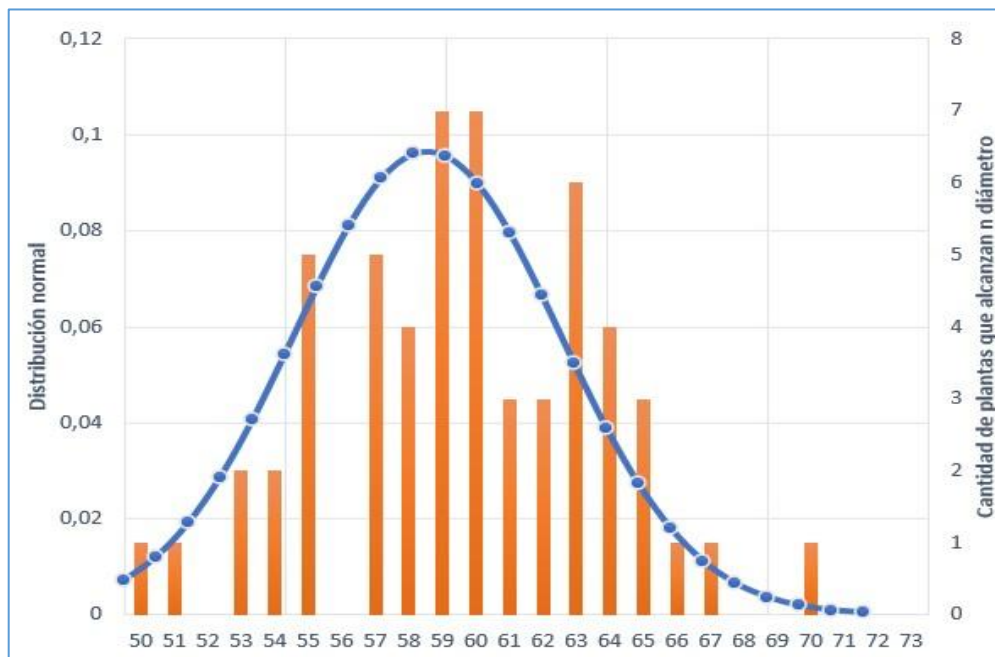


Figura 21. Distribución normal de la muestra para el diámetro de copa de la planta (No Automatizado).

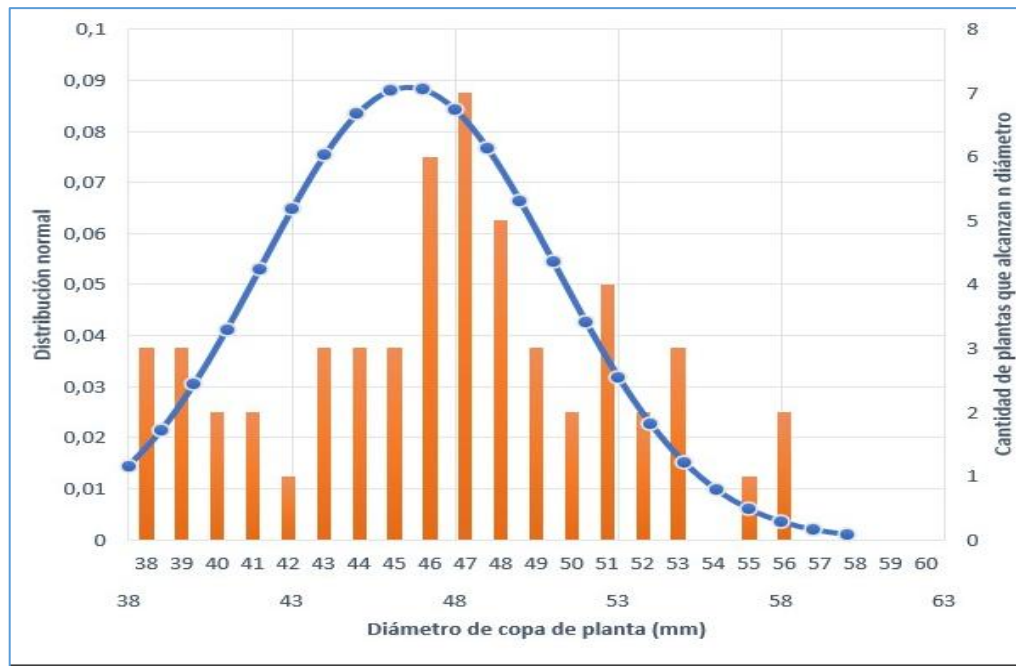


Figura 22. Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta (Automatizado).

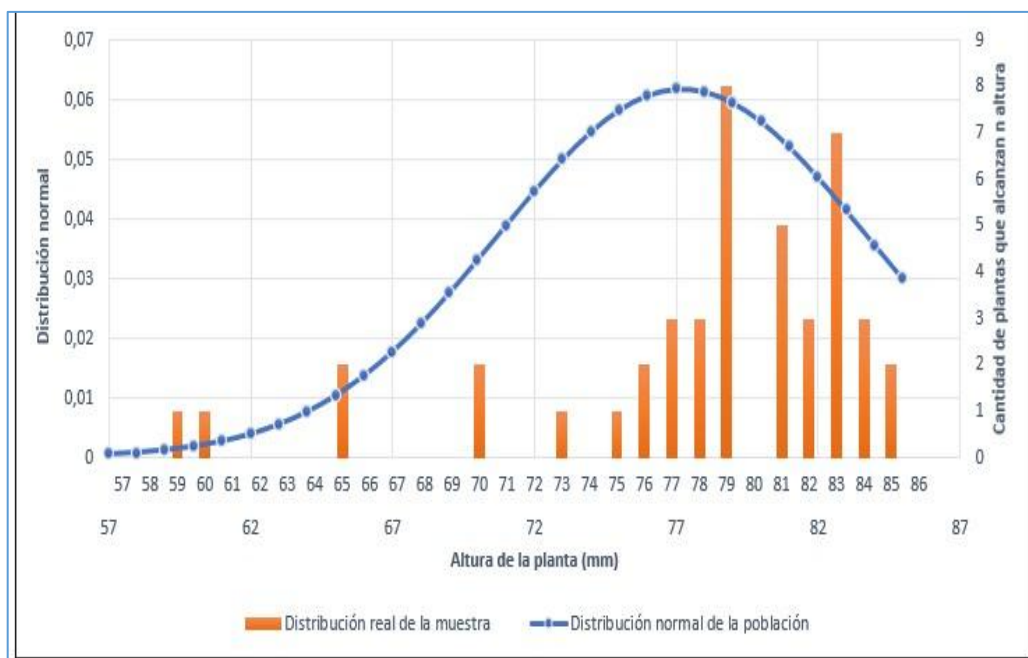
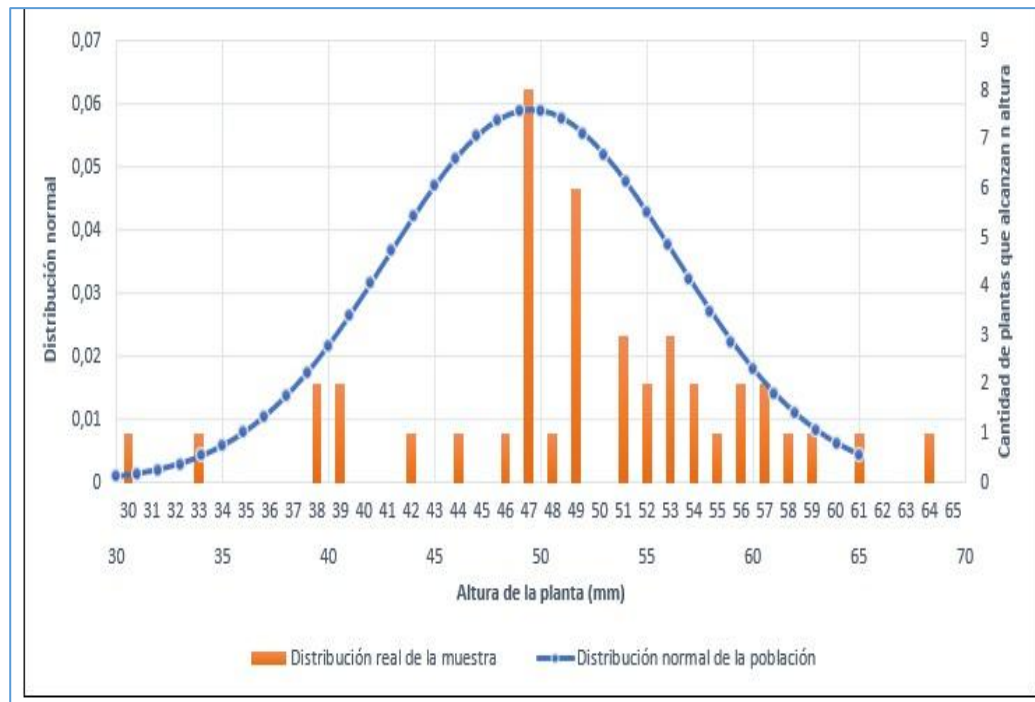


Figura 23. Distribución normal de la población y de la muestra para altura de la planta
(No Automatizado)



3.5.6 Diferencias en el desarrollo de plántulas

Como resultado final, se compararon las plántulas desarrolladas dentro del prototipo automatizado con aquellas cultivadas sin control ambiental. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 12**, donde se evidencian las diferencias en los parámetros de crecimiento evaluados.

Como resultado final se compara las plántulas con otras que no estaban en el prototipo obteniendo:

Tabla 12. Comparación de las plántulas en prototipo controlado y sin control.

Variable	Almácigo automatizado	Almácigo no automatizado
Diámetro de copa	59,4 mm ± 4	46,5 mm ± 4
Altura de la planta	77,2 mm ± 6	49,5 mm ± 7
Número de hojas	4 hojas (2 cotiledonares + 2 verdaderas)	2 hojas cotiledonares

Variable	Almácigo automatizado	Almácigo no automatizado
Condiciones ambientales	Controladas (22–26 °C, 70–85 % HR, suelo 60–70 %)	Alta variabilidad térmica y de humedad
Crecimiento general	Mayor vigor, mayor uniformidad	Desarrollo más lento
Tiempo de monitoreo	30 días después del trasplante	30 días después del trasplante

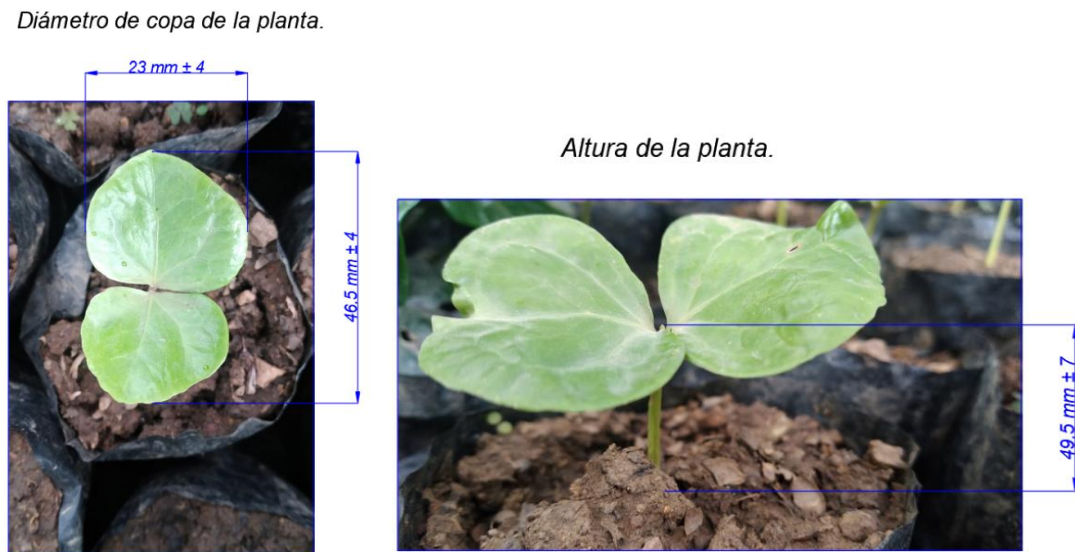
Nota: Los valores se presentan como promedio \pm desviación estándar y corresponden a mediciones realizadas 30 días después del trasplante, comparando plántulas en almácigo automatizado y no automatizado.

En la **Figura 24**, se observan las plántulas cultivadas en el prototipo con control automatizado de las variables ambientales, mientras que en la **Figura 25**, se muestran las plántulas desarrolladas en el almácigo sin control, donde se aprecia un menor crecimiento y uniformidad en comparación con el sistema automatizado

Figura 24. Plántulas del prototipo controlado



Figura 25. Plántulas del prototipo no controlado.



3.6 Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos muestran que el sistema automatizado mantuvo la temperatura del invernadero dentro de los rangos agrónomicamente recomendados para almácigos de café, lo que coincide con lo señalado por González Gaitán et al. (2024), quienes destacan que valores entre 22 y 26 °C son determinantes para preservar la estabilidad fisiológica en etapas tempranas del cultivo. La recurrencia diaria de picos térmicos alrededor del mediodía refleja la dinámica típica de microclimas descrita por Motisi et al. (2019) y NOAA (2015), y la rápida acción del sistema a través del ventilador axial y los extractores que permitió corregir estas variaciones en tiempos cortos, comportamiento similar a lo descrito por Nurwarsito et al. (2024) en invernaderos inteligentes para cultivos tropicales. Asimismo, en las primeras horas de la madrugada inicia la baja temperatura la cual fue compensado mediante la activación de la resistencia eléctrica, manteniendo la temperatura en los rangos establecidos; esta respuesta concuerda con los planteamientos de Montagut y Rey (2024), quienes destacan la importancia de evitar temperaturas subóptimas para garantizar el desarrollo radicular en almácigos. El tiempo de corrección registrado va entre 8 y 12 minutos para eventos de sobrecalentamiento y entre 10 y 15 minutos para eventos de enfriamiento, demostrando que el sistema se mantiene estable, comparable con soluciones IoT de mayor costo reportadas por Brewster et al. (2017) y Kumar et al. (2019), y alineado con la evidencia de Guzmán Vaca et al. (2021) sobre la

eficiencia de microcontroladores de bajo costo en el control de microclimas agrícolas. En el prototipo se mantiene un promedio general de 22,63 °C confirma su efectividad y coincide con investigaciones como la de García-Mireles et al. (2021), quienes destacan que sistemas con monitoreo distribuido y comunicación MQTT permiten una regulación ambiental más precisa. Además, la simplicidad y bajo costo tecnológico del sistema responden a las recomendaciones de Peña-Holguín et al. (2025) sobre la adopción de IoT en el sector cafetalero y favorecen su potencial implementación en contextos rurales con recursos limitados. Por ello, los resultados no solo evidencian un adecuado desempeño técnico del prototipo, sino que también representan un aporte notable para la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas de almácigos, fundamentalmente frente a la variabilidad climática actual.

También los eventos de disminución de la humedad menores al 65 % fueron escasos y de corta duración, lo que evidencia un microclima con tendencia natural a la estabilidad higrométrica. Esta condición coincide con lo reportado por Guzmán-Vaca et al. (2021), quienes destacan que los invernaderos de bajo volumen y con sombreado moderado presentan una inercia hídrica que favorece la retención de vapor de agua. Incluso en estas caídas de humedad, la ventilación programada evitó fluctuaciones abruptas, alineándose con los resultados de Nurwarsito et al. (2024), quienes señalaron que la combinación de sensores DHT22 y lógica de umbrales mantiene cambios graduales que favorecen la fisiología de plántulas sensibles. El promedio de humedad relativa del aire registrada el 74,24 % es coherente con los valores propuestos por NOAA (2015) para microclimas sombreados y con la necesidad de mantener una humedad constante para evitar estrés hídrico e interrupciones en la transpiración, como señalan Montagut y Rey (2024). El comportamiento de la humedad relativa confirma que el sistema automatizado gestionó los eventos de saturación como los de baja humedad, demostrando un desempeño comparable con las soluciones IoT avanzadas aplicadas en caficultura reportadas por García-Mireles et al. (2021) y respaldando su potencial como herramienta accesible para pequeños productores, tal como recomiendan Peña-Holguín et al. (2025).

La ausencia de activaciones de la bomba durante el periodo analizado respalda la eficiencia del diseño del sustrato y su capacidad de retención hídrica, en concordancia con las observaciones de Guzmán Vaca et al. (2021), quienes destacan que los sistemas

IoT permiten identificar ciclos naturales de humedad en sustratos bien estructurados sin necesidad de riego excesivo. Además, la estabilidad nocturna y el patrón ascendente inicial coinciden con los modelos de microclima de Motisi et al. (2019), que describen una menor evapotranspiración en horas de baja radiación y una distribución homogénea de humedad bajo condiciones sombreadas. La baja variabilidad registrada y la forma de la curva sugieren que el sensor HD-38 entregó valores promedio de 65,85 %, lo que coincide con su uso efectivo en estudios similares en cultivos tropicales (Nurwarsito et al., 2024). Estos resultados respaldan que la humedad del suelo fue regulada de manera efectiva por el sistema pasivo del sustrato y por el diseño de control IoT, manteniéndose dentro de condiciones favorables sin intervención activa.

CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo de temperatura y humedad para cultivo de café en un invernadero mediante tecnología IoT, conservó condiciones térmicas estables para el almácigo de café durante todo el periodo de evaluación, con temperaturas entre 22 y 26 °C y un promedio de 22,63 °C. Las variaciones térmicas fueron corregidas de forma automática, el tiempo de corrección va entre 8 y 12 minutos para eventos de sobrecalentamiento y entre 10 y 15 minutos para eventos de enfriamiento que va por debajo de 22°C.

La humedad relativa mantuvo un promedio de 74,24 %. Los picos cercanos al 100 % fueron controlados mediante la activación automática de los extractores superiores, mientras que las caídas por debajo del 65 % fueron poco frecuentes y estabilizados mediante ventilación mínima y la activación de la bomba.

La humedad del suelo se conservó con una media de 65,85 %, dentro del rango a controlar del 60 al 80% HR, su control fue a través de la bomba con el sistema de riego mediante las boquillas de nebulización en caso de caída de la humedad del suelo y si pasaba el límite superior se activaban los ventiladores.

Estadísticamente se tomó una muestra de 60 plantas de la población de 150 plantas aplicando 95 % de confianza, 10 % de error, $k=1,96$; obteniendo que el sistema automatizado generó plántulas con mayor desarrollo: diámetro de copa promedio de $59,4 \pm 4$ mm frente a $46,5 \pm 4$ mm y altura de $77,2 \pm 6$ mm frente a $49,5 \pm 7$ mm en 30 días, además de 4 hojas contra 2 hojas cotiledonares.

Con las condiciones climáticas controladas (22–26 °C, 70–85 % HR y 60–70 % humedad de suelo) se obtuvo un crecimiento más vigoroso y uniforme, confirmando que la regulación automática del microclima mejora significativamente la calidad inicial de las plantas respecto al sistema sin habitual.

RECOMENDACIONES

Para mejorar el sistema se pueden aplicar tecnologías como visión artificial mediante cámaras para medir automáticamente altura, diámetro de copa y coloración foliar, reduciendo errores de medición manual y permitiendo una comparación objetiva entre almácigos.

En la implementación y operación se sugiere integrar sensores de radiación, CO₂ y tensiómetros de humedad del sustrato para controlar de forma más completa el microclima.

Para la evaluación se sugiere realizar monitoreo y registro de datos en otras etapas del desarrollo de la planta de café e incorporar medición de consumo energético y registro independiente de datos, con el fin de relacionar crecimiento, eficiencia y costo operativo, permitiendo optimizar los parámetros de control.

REFERENCIAS

- Amazon Web Services. (2022). *AWS IoT Core developer guide*. <https://aws.amazon.com/iot/>
- Aosong Electronics. (2018). *AM2302 / DHT22 digital temperature and humidity sensor datasheet*. Guangzhou Aosong Electronics Co.
- ASABE. (2003). *Heating, ventilating and cooling greenhouses*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K., & Ellis, K. (2017). IoT in agriculture: Designing a Europe-wide large-scale pilot. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 26–33.
- Chanchí Golondrino, J., Rodríguez, L., & López, M. (2022). Environmental conditions and seedling development in coffee nurseries. *Agricultural Sciences Journal*, 13(2), 155–167.
- Comet. (2020). *Diaphragm pumps for spraying and agricultural applications*. <https://www.comet-spa.com>
- Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Espressif Systems. (2021). *ESP32-DEVKITC technical reference manual*. Espressif Systems.
- FAO. (2011). *Greenhouse vegetable production in protected environments*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2017). *Coffee production and crop management guidelines*. Food and Agriculture Organization.
- FAOSTAT. (2023). *FAOSTAT statistical database on global coffee production*. <https://www.fao.org/faostat/>
- García-Mireles, G., Morales, R., & Sánchez, J. (2021). Edge computing for smart agriculture: A review. *Sensors*, 21(5), 1720.
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489.
- González, P., Ramírez, L., & Pérez, J. (2020). Low-cost environmental monitoring systems using IoT technologies. *Journal of Agricultural Informatics*, 11(3), 1–10.

- González Gaitán, A., Rodríguez, P., & Salazar, D. (2024). Thermal stress effects on coffee plant development and pest incidence. *Agronomy Journal*, 116(2), 412–425.
- Google. (2023). *Firestore real-time database documentation*. <https://firebase.google.com/>
- Guzmán Vaca, C., Andrade, D., & Torres, J. (2021). Aplicación del Internet de las Cosas en sistemas agrícolas inteligentes. *Revista Iberoamericana de Tecnología Agrícola*, 8(1), 45–56.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). McGraw-Hill.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436.
- Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement. *Journal of Big Data*, 6(1), 111.
- MathWorks. (2022). *ThingSpeak IoT analytics platform*. <https://thingspeak.com/>
- Microsoft. (2022). *Azure IoT Hub documentation*. <https://azure.microsoft.com/>
- Montagut, C., & Rey, A. (2024). Soil moisture dynamics and root development in coffee seedlings. *Soil and Plant Science*, 74(1), 33–44.
- Motisi, N., Doré, T., & Lucas, P. (2019). Crop microclimate and plant disease interactions. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(3), 32.
- NOAA. (2015). *Microclimate and environmental monitoring systems*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Nurwarsito, H., Prasetyo, E., & Wibowo, A. (2024). Smart greenhouse monitoring system using IoT. *IEEE Access*, 12, 55231–55240.
- Omron. (2021). *Electromechanical relays technical guide*. Omron Corporation.
- Peña-Holguín, D., Cabrera, F., & Maldonado, J. (2025). Adoption of IoT technologies in small coffee farms in Ecuador. *Journal of Rural Development*, 44(1), 77–92.
- Ray, P. P. (2018). A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 30(3), 291–319.
- Ruíz-Martínez, I., Vargas, M., & Hernández, L. (2019). Environmental management in coffee nurseries. *Agricultural Research Journal*, 56(4), 601–609.
- Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2014). *The constrained application protocol (CoAP)*. IETF.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.

Ubidots. (2023). *Ubidots IoT application development guide*. <https://ubidots.com>

Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probability and statistics for engineers and scientists* (9th ed.). Pearson.

Watlow. (2024). *Electric heating elements technical handbook*. Watlow Electric Manufacturing Company.

ANEXOS

Anexo 1. Código desarrollado en plataforma Arduino.

```
#include <SPI.h>
#include "RTCLib.h"
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <DHT.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
//

// Pinout Sensor DHT22
#define DHT_PIN 17
#define DHT_TYPE DHT22
DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE);

// Pines de los higrómetros
#define SOIL_MOISTURE_PIN1 34
#define SOIL_MOISTURE_PIN2 35

// Pin del relé
#define RELAY_PIN 32

// Pin del potenciómetro
#define POT_PIN 39

// Credenciales de red WiFi
#define WIFI_SSID "Internet_UNL"
#define WIFI_PSWD "UNL1859WiFi"

// Credenciales de Broker MQTT
const char *mqtt_broker = "industrial.api.ubidots.com";
const char *mqtt_username = "BBUS-URT9g918HVjQZKFdxwAW0hrc551RrZ";
const char *mqtt_password = NULL;
const int mqtt_port = 1883;

// ID de cliente MQTT para ESP32
const char *clientID = "ESP32-DEV1";

// Topics de publicación y suscripción MQTT
const char *topic_dev_pub = "/v1.6/devices/dev_esp32_iot";
const char *topic_sw_sub = "/v1.6/devices/dev_esp32_iot/switch/lv";

// Objetos de conexión
WiFiClient espClient;
```

```

PubSubClient clientMQTT(espClient);

// Variables de aplicación
float tempC;
float hmd;
float soilMoisture1;
float soilMoisture2;
float soilMoistureAvg;
float setpoint;
char str_json[200];

unsigned long lastMsg = 0;
unsigned long lastControl = 0;
const long dataInterval = 300000; // 5 minutos, no manipular para no sobrecargar datos
const long controllInterval = 30000; // 30 segundos

// Pines de conexión módulo de relé- salidas
int ventilador = 25;
int bomba = 26;
int niquelina = 27; //RESISTENCIA

RTC_DS1307 rtc;
byte second, minute, hour;

// Control por tiempo
unsigned long lastSprayTime = 0;
unsigned long lastSoilCheck = 0;
const unsigned long oneHour = 1800000; //media hora
bool bombaActivada = false;

void WiFi_Connect();
void MQTT_Connect();

//INICIO DE CÓDIGO
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(POT_PIN, INPUT);
  // Inicializar sensores y módulos
  dht.begin();
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi_Connect();
  rtc.begin();
  // Configurar pines
  pinMode(ventilador, OUTPUT);
  pinMode(bomba, OUTPUT);
  pinMode(niquelina, OUTPUT);
  // Inicio apagados.
  digitalWrite(ventilador, HIGH);
  digitalWrite(bomba, HIGH);
  digitalWrite(niquelina, HIGH); //RESISTENCIA VERIFICAR // Resistencia OFF

```

```

}
void loop() {
  DateTime now = rtc.now();
  now = now + TimeSpan(0, 0, 16, 0); // Ajustar hora sumando 16 minutos

  hour = now.hour();
  minute = now.minute();
  second = now.second();

  unsigned long currentMillis = millis();

  // Reconectar WiFi y MQTT si es necesario
  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    WiFi_Connect();
  }
  if (!clientMQTT.connected()) {
    MQTT_Connect();
  } else {
    clientMQTT.loop();
  }

  // Control de dispositivos
  if (currentMillis - lastControl > controlInterval) {
    lastControl = currentMillis;

    // Leer sensores
    hmd = dht.readHumidity();
    tempC = dht.readTemperature();
    soilMoisture1 = (analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN1) / 4095.0) * 100.0;
    soilMoisture2 = (analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN2) / 4095.0) * 100.0;
    soilMoistureAvg = (soilMoisture1 + soilMoisture2) / 2.0;
    // Leer potenciómetro y calcular setpoint
    float potValue = analogRead(POT_PIN);
    setpoint = 22.0 + ((potValue / 4095.0) * 4.0);
    setpoint = constrain(setpoint, 22.0, 26.0);
    Serial.printf("Setpoint ajustado: %.2f°C\n", setpoint);
    Serial.printf("Temperatura: %.2f°C\n", tempC);
    Serial.printf("Humedad ubidots: %.2f°C\n", hmd);
    Serial.printf("Humedad h1: %.2f°C\n", soilMoisture1);
    Serial.printf("Humedad h2: %.2f°C\n", soilMoisture2);
    Serial.printf("Humedad promedio: %.2f°C\n", soilMoistureAvg);
    // --- CONTROL TEMPERATURA ---
    if (tempC < 22.0) {
      digitalWrite(ventilador, HIGH);
      digitalWrite(niquelina, LOW); // Resistencia ON
      digitalWrite(bomba, HIGH);
    } else if (tempC > 22.5 && tempC <= 25) {
      digitalWrite(ventilador, HIGH);
      digitalWrite(niquelina, HIGH); // Resistencia OFF
      digitalWrite(bomba, HIGH);
    } else if (tempC > 25.5 && tempC <= 28.0) { //

```

```

    digitalWrite(ventilador, LOW);
    digitalWrite(niquelina, HIGH); // Resistencia OFF
    digitalWrite(bomba, HIGH);
} else if (tempC > 28.0) {
    digitalWrite(ventilador, LOW);
    digitalWrite(niquelina, HIGH); // Resistencia OFF
    if (currentMillis - lastSprayTime >= oneHour) {
        digitalWrite(bomba, LOW); // Encender bomba por 1 minuto
        bombaActivada = true;
        lastSprayTime = currentMillis;
    }
} else {
    digitalWrite(ventilador, HIGH);
    digitalWrite(niquelina, HIGH); // Resistencia OFF
    digitalWrite(bomba, HIGH);
}

// Apagar bomba luego de 1 minuto y medio si fue activada
if (bombaActivada && (currentMillis - lastSprayTime >= 90000)) {
    digitalWrite(bomba, HIGH);
    bombaActivada = false;
}
// --- CONTROL HUMEDAD AMBIENTE ---
if (hmd < 65.0) {
    if (currentMillis - lastSprayTime >= oneHour) {
        digitalWrite(bomba, LOW);
        bombaActivada = true;
        lastSprayTime = currentMillis;
    }
    //tal vez especificar entre 65 y 85
} else if (hmd > 85.0 && tempC >= 24.0) { //para evitar que el ventilador se encienda en la
noche
    digitalWrite(ventilador, LOW);
}
// --- CONTROL HUMEDAD DE SUELO --- es
/* if (currentMillis - lastSoilCheck >= oneHour) {
    lastSoilCheck = currentMillis;

    if (soilMoistureAvg < 60.0) { //se realiza el cambio a 50 de humedad promedio
        digitalWrite(bomba, LOW);
        bombaActivada = true;
        lastSprayTime = currentMillis;
    } else if (soilMoistureAvg > 70.0) {
        digitalWrite(ventilador, LOW); // puede mantenerse encendido
    }
}
*/
}
// Envío de datos MQTT
if (currentMillis - lastMsg > dataInterval) {
    lastMsg = currentMillis;
}

```

```

    if (clientMQTT.connected()) {
        sprintf(str_json,
        "{\"temp_c\":%.2f,\"humedad\":%.2f,\"soil_moisture1\":%.2f,\"soil_moisture2\":%.2f,\"setpoint
        \":%.2f}\", tempC, hmd, soilMoisture1, soilMoisture2, setpoint);
        clientMQTT.publish(topic_dev_pub, str_json);
        Serial.println("Datos enviados a MQTT");
    } else {
        Serial.println("Error: Cliente MQTT no conectado.");
    }
}
}

void MQTT_Connect() {
    clientMQTT.setServer(mqtt_broker, mqtt_port);
    if (!clientMQTT.connected()) {
        if (clientMQTT.connect(clientID, mqtt_username, mqtt_password)) {
            Serial.println("MQTT conectado.");
            clientMQTT.subscribe(topic_sw_sub);
        } else {
            Serial.print("Error MQTT: ");
            Serial.println(clientMQTT.state());
        }
    }
}

void WiFi_Connect() {
    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PSWD);
    Serial.printf("Conectando a WiFi: %s", WIFI_SSID);
    unsigned long startAttemptTime = millis();
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - startAttemptTime < 10000) {
        Serial.print(".");
        delay(1000);
    }
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        Serial.println("\nWiFi conectado.");
        Serial.print("IP: ");
        Serial.println(WiFi.localIP());
    } else {
        Serial.println("\nError: No se pudo conectar a WiFi.");
    }
}
}

```

Anexo 2. Toma de muestra para la comparación.

Número aleatorio para muestra de comparación	Almácigo automatizado				Almácigo no automatizado (forma tradicional)			
	Diámetro de copa de la planta mm	Altura de la planta mm	Enfermedades fitosanitarias		Diámetro de copa de la planta mm	Altura de la planta mm	Enfermedades fitosanitarias	
			Si	No			Si	No
30	56	70	x		52	50	x	
132	62	68		x	53	55		x
71	54	73		x	50	53		x
81	55	70		x	46	43		x
73	54	70		x	45	42		x
26	53	60		x	45	44		x
43	57	70		x	40	30		x
96	51	65		x	40	33		x
146	54	68		x	38	47		x
123	53	73		x	48	38	x	
101	55	73		x	45	52	x	
72	55	80		x	44	53		x
65	61	85		x	50	45		x
94	55	70		x	41	47		x
48	55	59		x	42	44	x	
61	58	65		x	51	46		x
31	70	73		x	43	53		x
105	50	80		x	39	48		x
36	65	70		x	52	53		x
23	60	80		x	47	49		x
100	60	80		x	46	64	x	
8	60	80		x	45	55		x
57	62	85		x	50	47	x	
144	60	65		x	49	61		x
112	57	85		x	47	49		x
89	60	75		x	49	47		x
76	57	83		x	46	52		x
24	60	82		x	52	62		x
35	62	77		x	53	47	x	
137	55	79		x	45	57		x
113	60	81		x	51	46		x
110	63	83		x	51	51		x
50	57	84		x	48	54	x	
99	59	81		x	41	53		x
28	63	79		x	47	51		x
128	64	78		x	44	56		x
13	57	76		x	46	48	x	
40	59	83		x	48	47		x
68	62	79		x	38	57	x	
39	65	81		x	39	49		x
130	58	79		x	46	49		x
149	63	78		x	43	54		x
143	64	83		x	47	38	x	
142	66	79		x	56	55		x
93	57	84		x	49	47		x
67	61	83		x	46	53		x
140	58	85		x	47	47		x
136	61	81		x	51	61		x
59	59	79		x	39	49	x	
12	67	83		x	53	59		x
79	65	79		x	44	58		x
32	63	76		x	48	52	x	
49	59	82		x	47	53		x
111	58	77		x	38	47		x
121	64	84		x	43	47	x	
145	63	81		x	48	39		x
45	59	83		x	47	42		x
87	63	79		x	55	51		x
56	64	78		x	53	39	x	
104	59	82		x	48	56		x
Promedio	59,43	77,22	Porcentaje		46,57	49,57	Porcentaje	
Desviación estándar	4,13	6,45	0%	100%	4,50	6,76	23,3%	76,7%
Máximo	70,00	85,00			56,00	64,00		
Mínimo	50,00	59,00			38,00	30,00		