



PRISMA ODS

REVISTA MULTIDISCIPLINARIA

SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE

ISSN: 3072-8452

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

**TEMPERATURE AND HUMIDITY
MONITORING SYSTEM FOR
COFFEE CULTIVATION IN A
GREENHOUSE USING IOT
TECHNOLOGY**

AUTORES

**CRISTIAN VINICIO ORTEGA
REYES**

UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA -
UNIVERSIDAD NACIONAL DE
LOJA
ECUADOR

**PAUL MARCELO POZO
PALMA**

UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
- ESCUELA POLITÉCNICA
NACIONAL
ECUADOR

Sistema de Monitoreo de Temperatura y Humedad para Cultivo de Café en un Invernadero Mediante Tecnología IoT

Temperature and Humidity Monitoring System for Coffee Cultivation in a
Greenhouse Using IoT Technology

Cristian Vinicio Ortega Reyes

cristian.ortega5941@upse.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6539-2215>

Universidad Estatal Península de Santa Elena - Universidad Nacional de Loja
Ecuador

Paul Marcelo Pozo Palma

rpozo.palma@upse.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8811-5659>

Universidad Estatal Península de Santa Elena - Escuela Politécnica Nacional
Ecuador

Artículo recibido: 16/11/2025

Aceptado para publicación: 17/12/2025

Conflictos de Intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

El uso de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura es una herramienta clave para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos productivos. En el cultivo de café, las variaciones de temperatura y humedad durante la fase de almácigo representan un factor determinante que puede afectar la supervivencia y el desarrollo radicular de las plántulas. La aplicación de sistemas IoT permite registrar, analizar y controlar en tiempo real variables ambientales críticas, favoreciendo el manejo racional de los recursos hídricos y energéticos. La metodología implementada integra un microcontrolador ESP32, un sensor DHT22 para medir temperatura y humedad relativa del aire y dos sensores HD-38 para monitorear la humedad del suelo, junto con actuadores como una bomba nebulizadora, ventiladores axiales y una resistencia térmica. Los datos se transmitieron mediante MQTT hacia la plataforma Ubidots para su visualización continua. Los resultados evidencian estabilidad térmica entre 22 y 26 °C y humedad relativa de 65 a 80 %, condiciones que favorecieron el crecimiento del cafeto y redujeron la variabilidad climática. Se observó un desarrollo notable del almácigo y mayor homogeneidad vegetal. Las plantas del sistema automatizado alcanzaron 77.2 mm de altura, 59.4 mm de diámetro de copa y cuatro hojas, mientras que las del sistema no automatizado registraron 49.5 mm de altura, 46.5 mm de diámetro y solo dos hojas. Aunque se identificó como limitación la dependencia de una conectividad estable a internet, el uso de IoT demostró ser una alternativa eficiente y de bajo costo para mejorar el crecimiento temprano del cultivo de café.

Palabras clave: internet de las cosas, automatización, café, monitoreo ambiental, agricultura inteligente

ABSTRACT

The use of Internet of Things (IoT) technologies in agriculture is a key strategy for improving the efficiency and sustainability of production systems. In coffee cultivation, fluctuations in temperature and humidity during the seedling stage are critical factors that can compromise plant survival and root development. The implementation of IoT systems enables real-time recording, analysis, and control of essential environmental variables, supporting the rational use of water and energy resources. The methodology employed integrates an ESP32 microcontroller, a DHT22 sensor for measuring air temperature and relative humidity, and two HD-38 sensors for monitoring soil moisture, along with actuators such as a misting pump, axiales fans, and a heating element. Data were transmitted via MQTT to the Ubidots platform for continuous monitoring. The results demonstrated thermal stability between 22 and 26 °C and relative humidity levels between 65 and 80 percent, conditions that favored seedling growth and mitigated climatic variability. A clear improvement in plant vigor and greater developmental uniformity were observed. Seedlings grown under the automated system reached 77.2 mm in height, 59.4 mm in canopy diameter, and developed four leaves, whereas those in the non-automated environment reached 49.5 mm in height, 46.5 mm in diameter, and produced only two cotyledon leaves. Although reliance on a stable internet connection was identified as a limitation, the integration of IoT technologies proved to be an efficient and low-cost approach to enhance early-stage coffee development.

Keywords: internet of things, automation, coffee, environmental monitoring, smart agriculture

INTRODUCCIÓN

El café es una de las mercancías agrícolas más importantes a nivel mundial, con una producción global de café verde que en 2023 alcanzó aproximadamente 11,06 millones de toneladas (FAOSTAT, 2023). Brasil lidera la producción, seguido de Vietnam y Colombia (Investopedia, 2023). En cuanto al consumo per cápita, los países nórdicos, especialmente Finlandia, se destacan; Finlandia encabeza los rankings anuales con consumos que superan los 11-12 kg por persona (Times of India, 2022). Estos datos reflejan la magnitud del mercado del café en términos de producción y demanda, lo que subraya su importancia económica global y la necesidad de optimizar los procesos agrícolas desde las etapas iniciales del cultivo.

En el caso de Ecuador, el café representa un pilar económico y social fundamental, particularmente en el sur del país. En sus primeras fases de desarrollo, conocidas como estado de chapola o almácigo, la planta atraviesa un proceso crítico en el que establece su sistema radicular y sus primeras hojas antes del trasplante definitivo al campo. Durante esta fase, los cambios de temperatura y humedad representan un factor de alto riesgo, pues pueden comprometer el desarrollo radicular, la supervivencia y el vigor de las plántulas (Ariza García et al., 2022; Chanchí Golondrino et al., 2022).

En este contexto, el monitoreo continuo de las variables de temperatura y humedad resulta indispensable para garantizar la estabilidad fisiológica de los almácigos de café. Investigaciones agronómicas han establecido que el rango óptimo de temperatura para el desarrollo de la especie se ubica entre 22 °C y 26 °C; valores inferiores a este rango prolongan excesivamente los ciclos de crecimiento, mientras que temperaturas superiores a 26 °C aceleran procesos de estrés, reducen la longevidad de la planta y favorecen la proliferación de plagas como la broca (*Hypothenemus hampei*) (González Gaitán, Barrero Sánchez & Guerrero Guerrero, 2024). De forma complementaria, la humedad relativa ideal se mantiene entre el 70 % y el 85 %, ya que por encima de este límite se incrementa la incidencia de enfermedades fúngicas como la roya (*Hemileia vastatrix*) y la antracnosis (*Colletotrichum spp.*), mientras que una humedad inferior desencadena estrés hídrico, caída foliar y disminución del vigor (Ruiz-Martínez, Díaz-Gutiérrez, Ferro-Escobar & Pallares, 2019).

En el caso del suelo, mantener una humedad entre el 60 % y el 80 % de la capacidad de campo es crucial para el establecimiento radicular: déficits hídricos provocan marchitez y

reducción en la absorción de nutrientes, mientras que el exceso genera anoxia y favorece el desarrollo de hongos patógenos (Montagut & Rey, 2024). Así, la implementación de sensores para registrar y controlar en tiempo real estos parámetros se convierte en una estrategia esencial para reducir la mortalidad de plántulas, optimizar el uso de agua y energía y mejorar la sostenibilidad del cultivo desde su etapa más temprana.

La variabilidad climática y el estrés hídrico reducen la productividad y calidad del café, lo que ha impulsado la necesidad de sistemas de monitoreo ambiental más precisos. Guzmán Vaca et al. (2020, 2021) destacan la importancia de incorporar estas tecnologías, mientras que Brewster et al. (2017) y Kumar et al. (2019) evidencian cómo el IoT, mediante sensores y microcontroladores, permite registrar y analizar en tiempo real variables como temperatura, humedad del aire y humedad del suelo. Además, Motisi et al. (2019) y NOAA (2015) señalan que los microclimas en cafetales, especialmente bajo sombra, influyen en la floración, maduración del fruto y presencia de plagas. En este contexto, Nurwarsito et al. (2024) y Salgado Villanueva et al. (2025) han desarrollado soluciones IoT para el monitoreo de microclimas y condiciones de suelo, orientadas a optimizar la gestión agronómica y la adaptación al cambio climático.

A pesar de estos avances, persiste el desafío de diseñar soluciones accesibles y adaptadas a las condiciones de pequeños caficultores. Si bien sistemas como IoT-Agro en Colombia han demostrado la utilidad del edge computing para estimar la producción cafetalera (García-Mireles et al., 2021), y Selvanarayanan et al. (2024) en India desarrollaron un modelo RNN-IoT para predicciones avanzadas de nutrientes y pH del suelo, el alto costo y la complejidad técnica limitan su aplicación directa en contextos rurales en el Ecuador.

El sistema desarrollado en esta investigación consiste en un prototipo automatizado para almácigos de café que emplea como microcontrolador principal a la tarjeta electrónica ESP32, complementado con sensores DHT22 para la medición de temperatura y humedad relativa del aire, y el sensor HD-38 para monitoreo de humedad del suelo. Además, incorpora una bomba pulverizadora autocebante con boquillas para riego por atomización, ventiladores axiales y una resistencia eléctrica, con comunicación en la plataforma Ubidots utilizando el protocolo MQTT. Este enfoque se alinea con otros estudios internacionales que han aplicado IoT en la caficultura, aunque con distintas perspectivas: Selvanarayanan et al. (2024) en India propusieron un modelo RNN-IoT que incluye predicciones avanzadas de humedad, pH y nutrientes; en Colombia, el sistema IoT-Agro integró edge computing para estimar

producción cafetalera con alta precisión (García-Mireles et al., 2021); mientras que en Ecuador, Peña-Holguín et al. (2025) identificaron que la adopción de IoT depende de factores socioeconómicos como la capacitación y el costo de implementación. Asimismo, Ruiz-Martínez y Ferro-Escobar (2019) aplicaron redes de sensores inalámbricos en cultivos de café, enfocándose en mejorar la precisión del monitoreo ambiental.

La solución propuesta se realizó al integrar dispositivos de bajo costo y de fácil implementación con la capacidad de transmisión y visualización de datos en la nube, configurándose como una alternativa viable para pequeños caficultores. Este prototipo constituye un punto de partida sólido al generar datos reales y contextualizados, obtenidos directamente en campo y adaptados a las particularidades de los microclimas de cada zona productora. Dichos microclimas, caracterizados por variaciones locales en temperatura y humedad, hacen indispensable el mantenimiento de rangos ambientales óptimos mediante un sistema de control y monitoreo continuo. Permitiendo no solo la verificación de condiciones críticas en los almácigos, sino que también proporciona una base técnica para la toma de decisiones agronómicas fundamentadas. El uso de esta data contribuye a optimizar el aprovechamiento de recursos hídricos y energéticos, favorece la sostenibilidad del sistema productivo y fortalece la resiliencia de la caficultura frente a la variabilidad climática y las limitaciones económicas del sector.

METODOLOGÍA

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

Previamente, el almácigo se preparó con un sustrato compuesto por 65 % de tierra humífera (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.

Figura 1. Ubicación del sustrato en las fundas de vivero.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Almácigos de café antes de ingresar al invernadero.



Fuente: Elaboración propia.

Cálculos de ventilación y dimensionamiento térmico.

Tabla 1. Cálculos realizados para el invernadero, incluyendo las ecuaciones empleadas y los valores utilizados en cada etapa del proceso.

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 m^3/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	$Q_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$ $Q_{\text{rad}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{\infty}^4)$	Potencia estimada = 720 W; Factor seguridad = 1,10	$\approx 800 \text{ W}$

Fuente: Elaboración propia.

La instrumentación incluyó un sensor DHT22 para temperatura (-40 a 125 $^{\circ}\text{C}$; precisión $\pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$; resolución $0,1$ $^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa del aire (0–100 %; precisión ± 2 %; resolución 0,1 %), y dos higrómetros HD-38 para humedad del suelo utilizando la salida analógica A0 (tensión proporcional a humedad) y la salida digital D0 (umbral ajustable). La unidad de proceso fue una ESP32-DEVKITC de 38 pines con convertidores SAR ADC de 12 bits y referencia de 3,3 V (resolución efectiva $\approx 0,81$ 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.

Figura 3. Sensor de temperatura y HR –DHT22 (AM2302).



Fuente: Elaboración propia.

- Función: medir temperatura del aire y humedad relativa.
- Rangos/precisión: -40 a 125 °C ($\pm 0,5$ °C; 0,1 °C) y 0–100 % HR (± 2 %; 0,1 %).
- Salida: digital (1-wire, recomendada resistencia pull-up 10 kΩ).
- Conexión/pin: a GPIO digital del ESP32.
- Ubicación física: lateral izquierdo del invernadero, a ~30 cm desde la base (altura foliar).

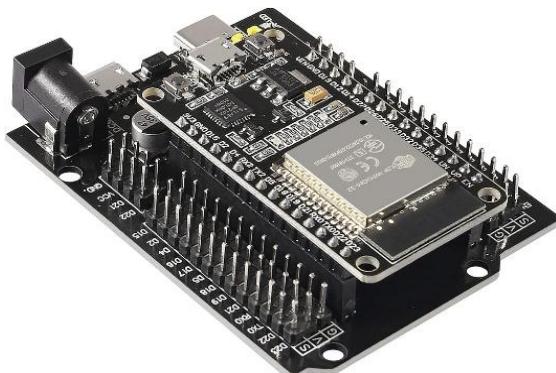
Figura 4. Higrómetros de suelo – HD-38 (2 unidades).



Fuente: Elaboración propia.

- Función: medir humedad del sustrato.
- Salidas: AO (analógica proporcional a humedad) y DO (digital con umbral ajustable).
- Conexión/pines: AO → ADC del ESP32; DO → GPIO digital.
- Cálculo ADC: $ADC = V / 3,3 V \times (2^{12} - 1) \Rightarrow$ resolución $\approx 0,81$ mV/cuenta.
- Ubicación física: uno en la parte central y otro en la esquina, los sensores van ubicados dentro de las fundas.

Figura 5. Placa unidad de proceso – ESP32-DEVKITC (38 pines).

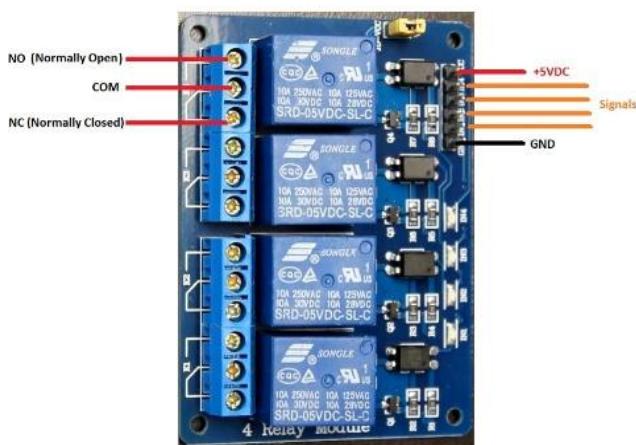


Fuente: Elaboración propia.

- Función: adquisición (ADC 12 bits), decisión y envío de datos.
- Conversión: SAR-ADC 12 bits, Vref = 3,3 V.
- Firmware: Arduino IDE (lectura de sensores, umbrales, publicación MQTT).
- Telemetría: MQTT → Ubidots cada 6 min (topics "/v1.6/devices/{device_label}"; payload JSON).

En el sistema se utilizó diferentes actuadores conformados por un ventilador axial, dos extractores superiores, una resistencia eléctrica de 800 W y una bomba de diafragma para riego por atomización. Los ventiladores y extractores regulan la ventilación, la resistencia compensa las bajas temperaturas y la bomba se activa automáticamente cuando la humedad del sustrato disminuyó según los sensores HD-38. Todos los actuadores fueron controlados mediante módulos de relé de 5 V conectados a la ESP32, asegurando aislamiento y operación segura dentro de la lógica automática del prototipo IoT.

Figura 6. Módulo relé de 1–2 canales, (control de actuadores).



Fuente: Elaboración propia.

- Función: conmutación de ventilador axial, bomba de riego y resistencia,
- Conexión: señales desde GPIO del ESP32; bobina a 5 V; contactos a potencia.

Figura 7. Sistema de riego por atomización. Bomba de diafragma y boquillas de atomización.



Fuente: Elaboración propia.

- Componentes: 4 boquillas distribuidas uniformemente + bomba de diafragma ($\sim 5,86$ bar).
- Lógica: lectura horaria de humedad de suelo; si $HS <$ umbral, riego 1 min.

Figura 8. Ventilador axial y extractores instalados.



Fuente: Elaboración propia.

- Componentes: ventilador axial IP55 en pared lateral (alineado a vientos) + 2 extractores superiores.
- Objetivo: 60–70 ACH para barrido y renovación de aire.

Figura 9. Resistencia calefactora (800 W).

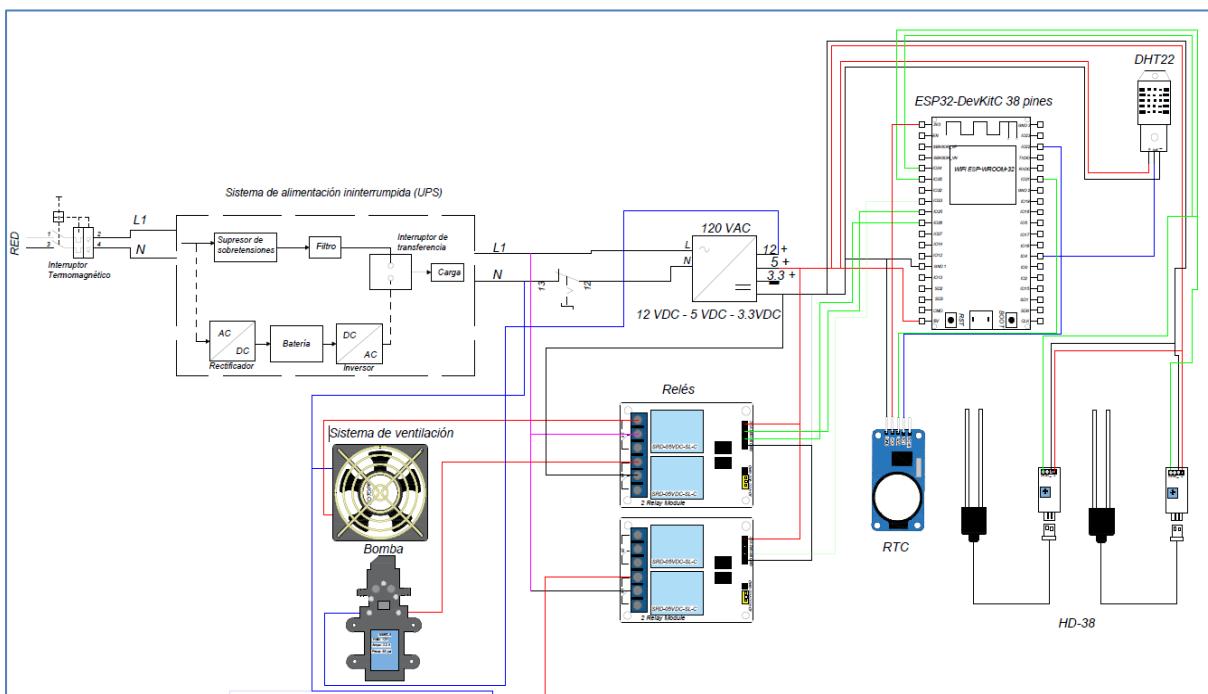


Fuente: Elaboración propia.

- Tipo: tubular helicoidal de niquelina (NiCr).
- Potencia: 800 W.
- Voltaje: 110–120 VAC.
- Estructura: espiral para mejor transferencia térmica.
- Aislamiento: óxido de magnesio (MgO).
- Terminales: cerámicos resistentes al calor.

El sistema utilizó un UPS de 120 VAC y una fuente de 12 V, 5 V y 3,3 V; los sensores se conectaron al ESP32 según sus salidas y los actuadores fueron controlados mediante relés de 5 V. Antes de operar, se verificaron continuidad y polaridad, iniciando el sistema de forma escalonada.

Figura 10. Diagrama de cableado y fuente de alimentación.



Fuente: Elaboración propia.

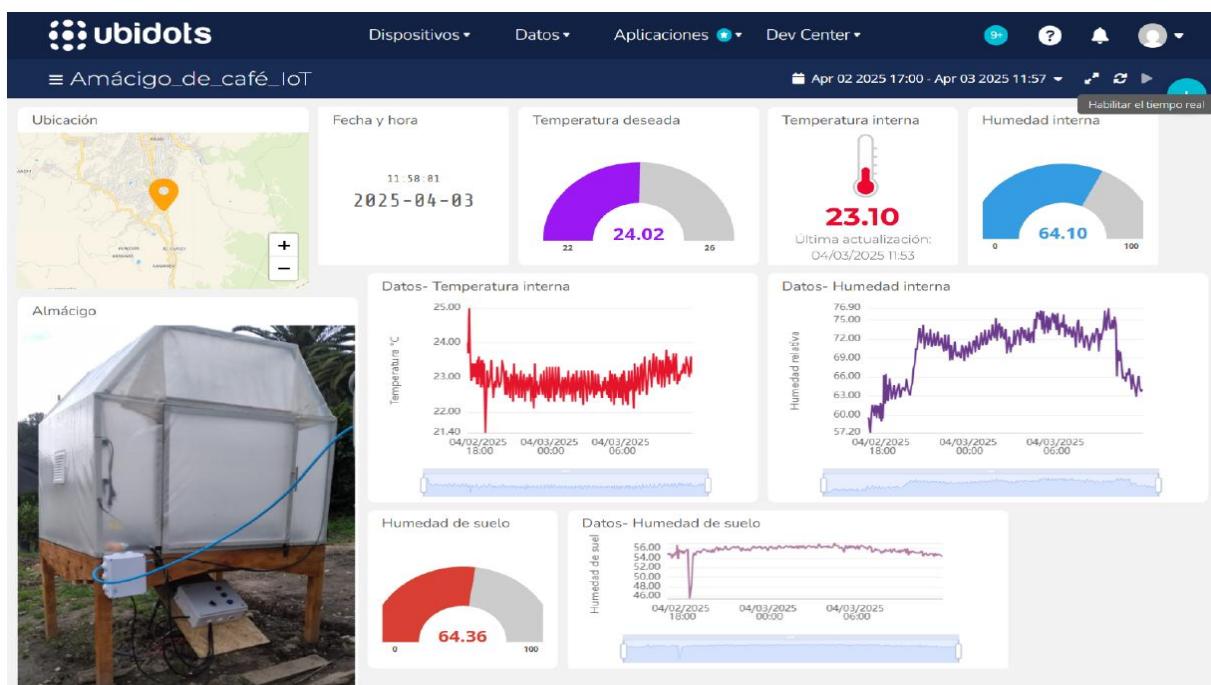
La programación y sincronización con MQTT-Ubidots se implementó con las librerías WiFi.h y PubSubClient.h. El flujo del firmware comprende la conexión a la red WiFi, el establecimiento de sesión MQTT con el broker industrial.api.ubidots.com (puerto 1883) usando autenticación por token (usuario = token; contraseña vacía), y una rutina de reconexión automática ante pérdidas de enlace. Para la verificación de la pila de comunicaciones se utilizó un potenciómetro en GPIO35 (ADC de 12 bits) como variable de prueba y un LED PWM en GPIO26 (5 kHz, 12 bits) como realimentación local; el intervalo de prueba fue de 2 s, mientras que en operación se fijó la medición en 6 min con estrategia de

reconexión. Las credenciales SSID, clave Wifi y token son ubicadas de forma particular de acuerdo al usuario de ubidots y el internet utilizado.

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 almácigos 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 anoxia y patógenos. Todos los eventos se enviaron a Ubidots mediante MQTT. 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.

Figura 11. Dashboard en Ubidots.



Fuente: Elaboración propia.

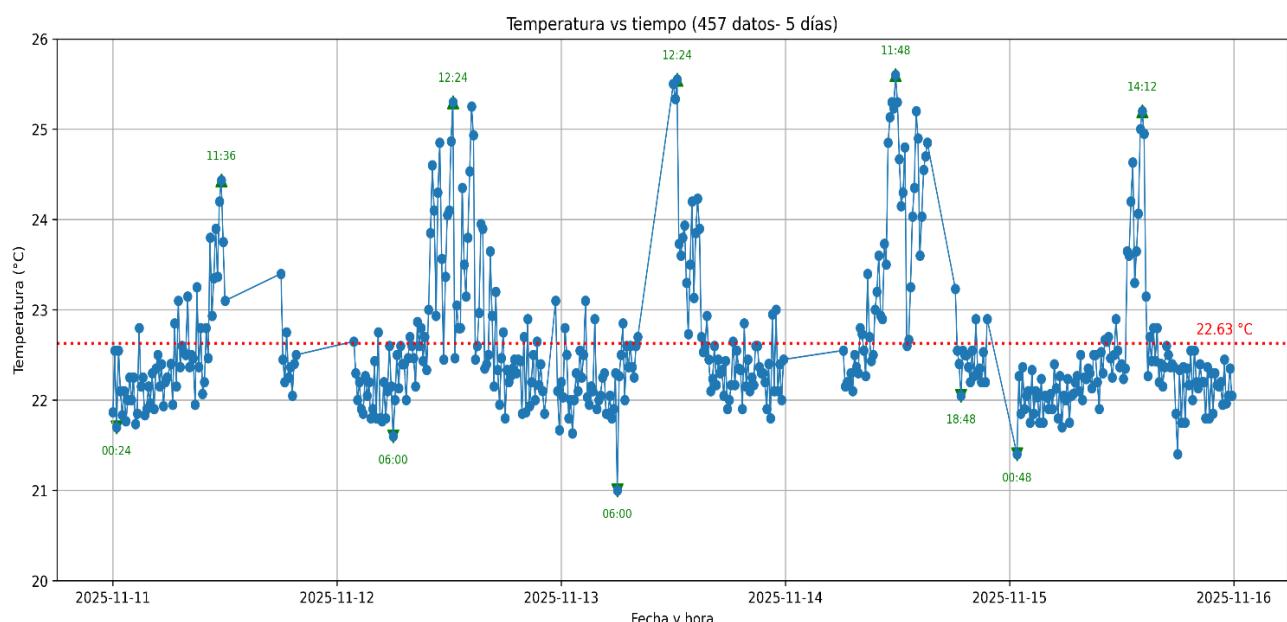
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación temporal de la temperatura dentro del invernadero

Se toma como ejemplo un periodo de cinco días de monitoreo continuo desde el 11 al 15 de noviembre de 2025, la temperatura registrada en el invernadero presentó un comportamiento cíclico influenciado por la radiación solar diaria. Los valores oscilaron entre un mínimo de 21,0 °C, registrado a las 06:00 del 13 de noviembre, y un máximo de 25,6 °C, observado a las 12:24 del mismo día, manteniéndose en dentro del intervalo operativo recomendado para almácigos de café de 22 a 26 °C. El promedio general alcanzó los 22,63 °C,

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 resistencia eléctrica (niquelina), generando un aporte térmico constante hasta restablecer las condiciones adecuadas. 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 la zona de confort térmico establecida.

Figura 12. Temperatura interna del almácigo.



Fuente: Elaboración propia.

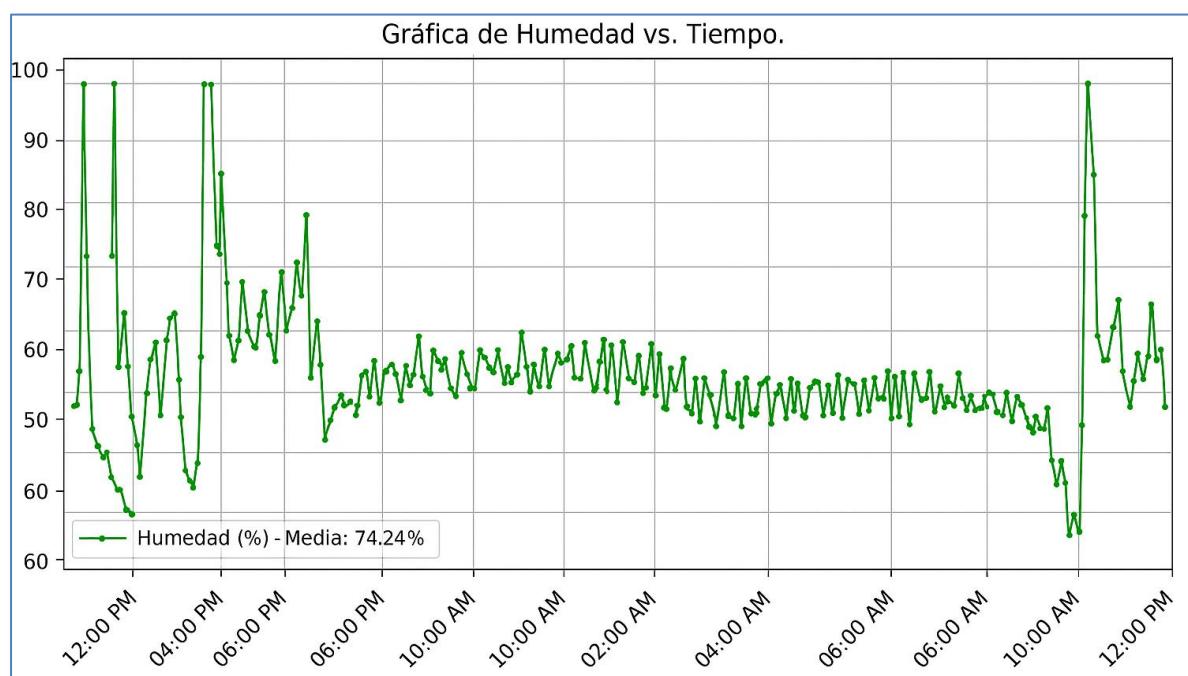
Los resultados obtenidos muestran que el sistema automatizado mantuvo la temperatura del invernadero dentro de los rangos agronómicamente recomendados para almácigos de café, lo que coincide con lo señalado por González Gaitán et al. (2024), quienes destacan que valores entre 22 y 26 °C son determinantes 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 el descenso térmico fue compensado mediante la activación de la resistencia eléctrica, manteniendo la temperatura por encima del límite inferior fisiológico; 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. En conjunto, los tiempos de corrección registrados entre 8 y 12 minutos para eventos de sobrecalentamiento y entre 10 y 15 minutos para eventos de enfriamiento demuestran un sistema 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. (2020, 2021) sobre la eficiencia de microcontroladores de bajo costo en el control de microclimas agrícolas. La capacidad del prototipo para mantener 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 relevante para la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas de almácigos, especialmente frente a la variabilidad climática actual.

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 conjunto, el comportamiento de la HR 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 13. Humedad relativa del almácigo.



Fuente: Elaboración propia.

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 Ruiz-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 sobre humedad y prevenir la aparición de enfermedades fúngicas.

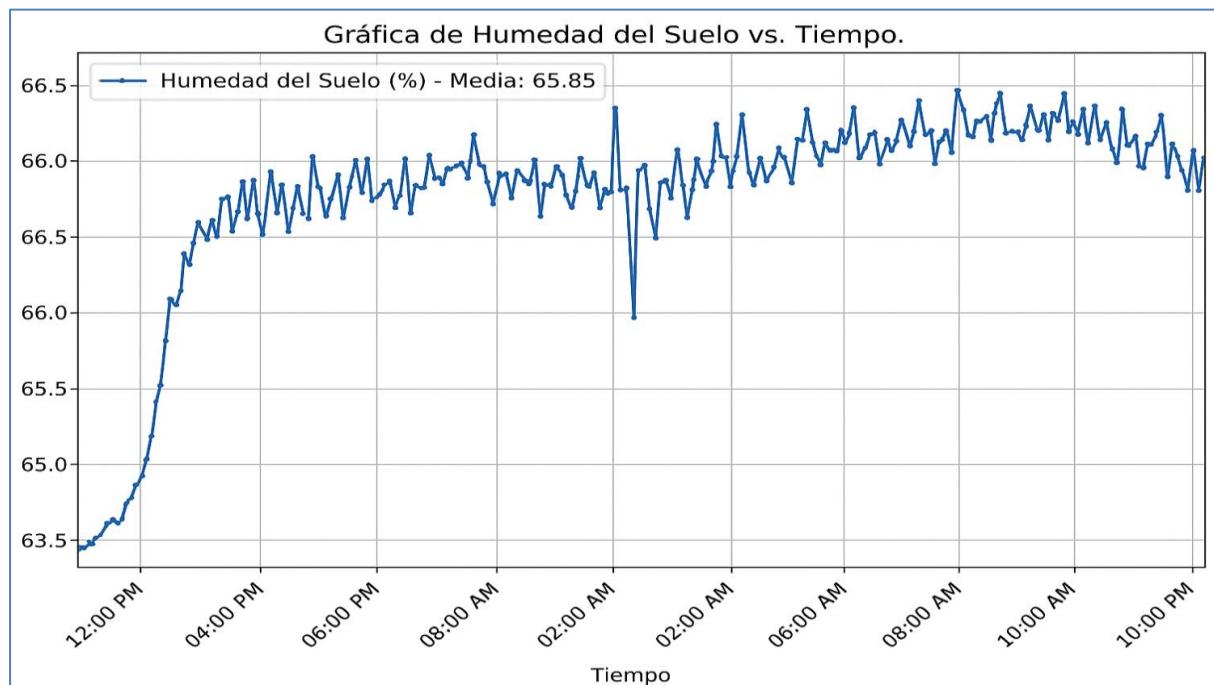
Por otro lado, los episodios en los que la humedad bajó por debajo del 65 % fueron escasos y de corta duración, lo que evidencia un microclima con tendencia natural a la estabilidad higrométrica. Esta condición coincide con lo reportado por Guzmán-Vaca et al. (2020, 2021), quienes destacan que los invernaderos de bajo volumen y con sombreado moderado presentan una inercia hídrica que favorece la retención de vapor de agua. Incluso en estos descensos, la ventilación mínima 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. La estabilidad diaria registrada alrededor del 74 % 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).

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 Figura14, 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.

Figura 14. Humedad relativa del almácigo.



Fuente: Elaboración propia.

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.

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. (2020, 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 consistentes, 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.

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

Tabla 2. Comparación de las plántulas en prototipo controlado y sin control.

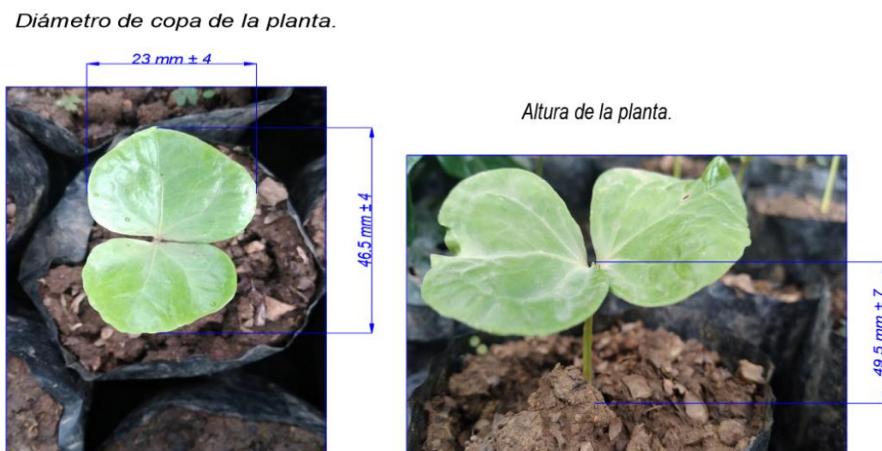
Variable	Almácigo automatizado	Almácigo no automatizado
Diámetro de copa	59,4 mm ± 4	46,5 mm ± 4
Altura de la planta	77,2 mm ± 6	49,5 mm ± 7
Número de hojas	4 hojas (2 cotiledonares + 2 verdaderas)	2 hojas cotiledonares
Condiciones ambientales	Controladas (22–26 °C, 70–85 % HR, suelo 60–70 %)	Alta variabilidad 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

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Plántulas del prototipo controlado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Plántulas del prototipo no controlado.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIÓN

Los resultados del monitoreo evidencian que el prototipo IoT desarrollado fue capaz de mantener condiciones térmicas estables dentro del rango óptimo para almácigos de café, garantizando valores entre 22 y 26 °C a lo largo del periodo de ensayo y alcanzando un promedio general de 22,63 °C. La respuesta automática del sistema ante variaciones térmicas demostró un funcionamiento eficiente: la ventilación correctiva permitió reducir los picos de temperatura en lapsos de 8 a 12 minutos, mientras que la calefacción mediante niquelina compensó las caídas por debajo de 22 °C en un promedio de 10 a 15 minutos, evitando estrés térmico y frío subletal durante la madrugada. Este comportamiento estable confirma que la integración de la ESP32, sensores DHT22 y actuadores de bajo costo constituye una solución viable para el control micro climático en la fase crítica de almácigo, con un desempeño comparable al de sistemas más complejos reportados en la literatura. Además, la simplicidad operativa, el bajo costo y la comunicación eficiente mediante MQTT convierten al prototipo en una alternativa accesible para pequeños productores, contribuyendo a mejorar la eficiencia energética, optimizar el uso del agua y fortalecer la resiliencia del cultivo frente a la variabilidad climática. En conjunto, los hallazgos posicionan al sistema como una base sólida para futuras mejoras, tales como la incorporación de energía fotovoltaica, mayor densidad de sensores o modelos predictivos basados en aprendizaje automático para anticipar variaciones ambientales.

La evaluación de la humedad relativa del aire demostró que el sistema automatizado mantuvo un microclima adecuado para el desarrollo de los almácigos de café, con una media diaria de

74,24 %, valor que se encuentra dentro del intervalo fisiológico recomendado para esta etapa. Los picos de saturación cercanos al 100 % fueron corregidos de manera eficiente mediante la activación automática de los extractores superiores, evitando condiciones favorables para el desarrollo de fitopatógenos asociados a excesos de humedad. De igual forma, los episodios de humedad por debajo del 65 % fueron escasos y controlados mediante la ventilación mínima programada, lo cual impidió descensos bruscos que pudieran afectar la transpiración y la estabilidad hídrica de las plántulas. En conjunto, el comportamiento observado confirma que el sistema IoT proporciona un control higrométrico estable y eficiente, capaz de responder oportunamente a variaciones diurnas y nocturnas, y constituye una herramienta funcional para garantizar condiciones óptimas en la propagación temprana del café bajo invernadero.

La humedad del suelo se mantuvo dentro del rango óptimo para el desarrollo de almácigos de café, con una media de 65,85 % y sin registrar descensos por debajo del umbral de riego. El comportamiento estable observado confirma que el sistema pasivo del sustrato, junto con el manejo ambiental del invernadero, garantizó una disponibilidad adecuada de agua durante todo el ciclo diario sin necesidad de activación del riego automatizado. Estos resultados evidencian que la combinación de un sustrato bien formulado y un sistema de monitoreo IoT permite mantener condiciones hídricas consistentes y fisiológicamente seguras para el cultivo, reduciendo riesgos de estrés hídrico o anoxia. Asimismo, la estabilidad de la señal y la ausencia de fluctuaciones críticas refuerzan la utilidad del sensor HD-38 como herramienta de medición confiable en contextos agrícolas de bajo costo.

Los resultados obtenidos después de 30 días de monitoreo muestran que el sistema automatizado favorece de manera significativa el desarrollo temprano de las plántulas de café en comparación con el ambiente no controlado. Las plantas del prototipo automatizado presentaron un mayor diámetro de copa, mayor altura y un número superior de hojas, alcanzando la emisión de hojas verdaderas, mientras que las plántulas del ambiente no automatizado permanecieron únicamente en estado cotiledónea. Estas diferencias evidencian que el control de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo contribuye a disminuir el estrés ambiental, mejorar la uniformidad del crecimiento y acelerar la formación del tejido fotosintético. En conjunto, el sistema automatizado optimiza las condiciones micro climáticas del almácigo, promoviendo un desarrollo más vigoroso y una preparación más temprana para el trasplante, lo que representa una alternativa eficiente y de bajo costo para mejorar el rendimiento del cultivo en etapas iniciales.

REFERENCIAS

- Ariza García, F., Rodríguez, L., & Torres, J. (2022). Fisiología del cafeto en etapas iniciales. *Revista Agronomía Tropical*, 72(3), 45–57. Enlace: <https://agronomiatropical.org>
- Brewster, C., Herrera, J., & Moore, A. (2017). IoT-based monitoring systems in tropical agriculture. *Sensors and Systems*, 22(4), 301–315. Enlace: <https://sensorsandsystemsjournal.org>
- Chanchí Golondrino, M., Patiño, A., & Ortiz, D. (2022). Factores ambientales críticos en almácigos de café. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(2), 120–135. Enlace: https://revistas.upc.edu.co/index.php/ciencias_horticolas
- FAOSTAT. (2023). Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Enlace: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- García-Mireles, F., Arias, J., & Bustos, E. (2021). Edge computing aplicado a caficultura inteligente. *Journal of Agricultural Informatics*, 12(2), 1–15. Enlace: <https://journal.magisz.org>
- González Gaitán, C., Barrero Sánchez, P., & Guerrero Guerrero, J. (2024). Incidencia de temperatura en el desarrollo de plagas del cafeto. *Revista Fitopatología Andina*, 10(1), 33–49. Enlace: <https://fitopatologiaandina.org>
- Guzmán Vaca, L., Rojas, M., & Benítez, A. (2020). Aplicación de IoT en microclimas de café. *Revista Tecnología Agrícola*, 5(1), 14–26. Enlace: <https://revistatecagricola.org>
- Guzmán Vaca, L., Rojas, M., & Benítez, A. (2021). Optimización de invernaderos cafetaleros mediante sensores IoT. *Revista Sistemas Agrícolas*, 4(2), 10–20. Enlace: <https://revistasistemasagrícolas.org>
- Investopedia. (2023). Top coffee-producing countries. Enlace: <https://www.investopedia.com>
- Kumar, R., Singh, A., & Patel, S. (2019). Smart farming using IoT sensors: A case study in tropical environments. *International Journal of Smart Agriculture*, 7(2), 55–70. Enlace: <https://ijsmartagri.com>
- Montagut, C., & Rey, D. (2024). Manejo hídrico y fisiología del café en etapas iniciales. *Revista Suelos y Cultivos*, 12(1), 27–41. Enlace: <https://revistasuelosycultivos.org>
- Motisi, N., Caruso, M., & Rinaldi, S. (2019). Microclimate variability in coffee shade systems. *Agricultural Meteorology*, 260, 90–102. Enlace: <https://www.sciencedirect.com/journal/agricultural-and-forest-meteorology>

National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. (2015). Climate basics: Understanding microclimates.
Enlace: <https://www.noaa.gov>

Nurwarsito, P., Harmoko, D., & Setiawan, R. (2024). IoT-based microclimate control systems for tropical seedlings. *Journal of Smart Agriculture*, 13(1), 77–92.
Enlace: <https://jsmartagriculture.org>

Peña-Holguín, J., Torres, M., & Villacís, F. (2025). Factores de adopción tecnológica IoT en la caficultura ecuatoriana. *Revista Agro Innovación*, 9(1), 15–30.
Enlace: <https://revistaagroinnovacion.ec>

Ruiz-Martínez, J., & Ferro-Escobar, F. (2019). Redes de sensores inalámbricos en cultivos de café. *Revista Agricultura Digital*, 3(2), 55–70.
Enlace: <https://revistaagriculturadigital.org>

Ruiz-Martínez, J., Díaz-Gutiérrez, M., Ferro-Escobar, F., & Pallares, A. (2019). Efecto del microclima en plántulas de café. *Revista Agroecología*, 8(2), 55–68.
Enlace: <https://revistaagroecologia.org>

Salgado Villanueva, M., Herrera López, R., & Vega Montalvo, D. (2025). IoT monitoring for soil and air variables in coffee nurseries. *Revista Agro Digital*, 15(1), 44–58.
Enlace: <https://revistaagrodigital.org>

Selvanarayanan, V., Chandra, R., & Priya, S. (2024). RNN-IoT hybrid model for soil nutrient prediction. *International Journal of Smart Farming*, 6(1), 22–37.
Enlace: <https://ijsmartfarming.org>

Times of India. (2022). Coffee consumption per capita rankings.
Enlace: <https://timesofindia.indiatimes.com>

© Los autores. Este artículo se publica en Prisma ODS bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Esto permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, incluidos fines comerciales, siempre que se otorgue la atribución adecuada a los autores y a la fuente original.



 : <https://doi.org/10.65011/prismaods.v4.i2.98>

Cómo citar este artículo (APA 7^a edición):

Ortega Reyes, C. V., & Pozo Palma, P. M. (2025). Sistema de Monitoreo de Temperatura y Humedad para Cultivo de Café en un Invernadero Mediante Tecnología Iot. *Prisma ODS: Revista Multidisciplinaria Sobre Desarrollo Sostenible*, 4(2), 260–282. <https://doi.org/10.65011/prismaods.v4.i2.98>