

**Estación de visualización de datos para el secado de café en invernadero mediante
telecomunicaciones e IoT**

Santiago Vargas Romero

Asesor

William Alexander Cuevas Carrero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería – ECBTI

Ingeniería en Telecomunicaciones

2025

Resumen

El presente proyecto de grado, desarrollado bajo la modalidad de Proyecto Aplicado en Desarrollo Tecnológico, tuvo como propósito diseñar una estación de visualización de datos para apoyar el monitoreo del proceso de secado de café en un invernadero a pequeña escala ubicado en el barrio Villa María, municipio de Altamira, Huila. La propuesta surge de la necesidad de brindar a pequeños productores cafeteros una herramienta accesible que permita conocer las condiciones de temperatura y humedad durante el secado, reduciendo la dependencia exclusiva de la observación empírica. El sistema integró una estructura física tipo invernadero con sensores de temperatura y humedad, microcontrolador ESP32, pantalla de visualización local, sistema de alimentación y transmisión inalámbrica mediante WiFi hacia la plataforma ThingSpeak. La metodología se organizó en fases relacionadas con la caracterización del proceso, construcción e integración del sistema, validación de funcionamiento y evaluación técnica y económica. Para ello, se realizaron tres pruebas experimentales con café en proceso de secado, registrando temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de la masa de café. Los resultados evidenciaron que la estación funcionó como una herramienta de apoyo para el seguimiento del secado, al facilitar la consulta directa de datos en sitio mediante la pantalla local y la observación remota a través de gráficos en ThingSpeak. Además, el costo aproximado del prototipo fue de COP \$226.400, lo que permite considerarlo como una alternativa accesible y replicable para pequeños productores cafeteros. En conclusión, el proyecto aportó una solución tecnológica sencilla, de bajo costo y adaptable al contexto de pequeña producción cafetera, fortaleciendo el monitoreo mediante datos cuantitativos y contribuyendo a una toma de decisiones más informada.

Palabras clave: café, secado, invernadero, Internet de las Cosas, sensores, monitoreo.

Abstract

This degree project, developed under the Applied Project in Technological Development modality, aimed to design a data visualization station to support the monitoring of the coffee drying process in a small-scale greenhouse located in the Villa María neighborhood, municipality of Altamira, Huila. The proposal arose from the need to provide small coffee producers with an accessible tool to identify temperature and humidity conditions during drying, reducing exclusive dependence on empirical observation. The system integrated a greenhouse-type physical structure with temperature and humidity sensors, an ESP32 microcontroller, a local display screen, a power supply system, and wireless data transmission via WiFi to the ThingSpeak platform. The methodology was organized into phases related to process characterization, system construction and integration, operational validation, and technical and economic evaluation. For this purpose, three experimental tests were conducted with coffee in the drying process, recording ambient temperature, relative humidity, and coffee mass temperature. The results showed that the station worked as a support tool for monitoring the drying process by allowing direct on-site data consultation through the local screen and remote observation through graphs in ThingSpeak. In addition, the approximate cost of the prototype was COP \$226,400, making it an accessible and replicable alternative for small coffee producers. In conclusion, the project provided a simple, low-cost technological solution adaptable to small-scale coffee production, strengthening monitoring through quantitative data and contributing to more informed decision-making.

Keywords: coffee, drying, greenhouse, Internet of Things, sensors, monitoring.

Tabla de Contenido

Introducción	10
Planteamiento del Problema	12
Justificación	15
Justificación Académica.....	15
Justificación Social.....	15
Justificación Tecnológica	17
Objetivos.....	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos.....	19
Marco Teórico y Conceptual	20
Estado del Arte	20
Panorama Internacional de IoT en Agricultura de Precisión.....	20
Tecnologías de Monitoreo para Secado de Café: Estado Actual.....	21
Aplicaciones Específicas de IoT en Caficultura Colombiana	23
Marco Referencial.....	24
Plataformas de Visualización de Datos y Cloud Computing.....	24
Microcontrolador ESP32: Arquitectura y Aplicaciones.....	26
Sensores de Temperatura y Humedad: Comparación Técnica	27
Análisis Comparativo de Proyectos Relacionados.....	29

Brechas Tecnológicas y Oportunidades Identificadas	32
Justificación y Contribución del Presente Proyecto	34
Antecedentes	36
Fundamentación Teórica	37
El Café en Colombia y el Huila	37
Secado de Café: Principios y Métodos.....	38
Fundamentos Termodinámicos del Secado	38
Variables Críticas del Secado	39
Normativa de Humedad	40
Internet de las Cosas (IoT).....	40
Arquitectura de Sistemas IoT.....	40
IoT en Agricultura de Precisión	41
Microcontroladores y Sensores.....	42
Microcontrolador ESP32.....	42
Sensor DHT22	43
Sensor SHT31-D.....	43
Sensor DS18B20.....	44
Plataformas de Visualización de Datos.....	45
ThingSpeak	45
Protocolo de Comunicación.....	46

Marco Normativo.....	46
Metodología.....	48
Tipo de Investigación.....	48
Diseño Metodológico.....	49
Relación Entre Objetivos Específicos y Fases Metodológicas.....	49
Diagrama de Flujo del Funcionamiento del Sistema.....	51
Síntesis Metodológica.....	54
Resultados y Análisis.....	55
Resultado del Objetivo Específico 1: Caracterización del Proceso de Secado de Café.....	55
Prueba 1: 19-26 de agosto de 2025.....	55
Prueba 2: 22-28 de agosto de 2025.....	57
Prueba 3: 30 de agosto - 8 de septiembre de 2025.....	59
Análisis estadístico.....	61
Resultado del Objetivo Específico 2: Construcción e Integración Física del Prototipo.....	64
Construcción física del secadero tipo invernadero.....	68
Resultado del Objetivo Específico 3: Validación del Funcionamiento y Confiabilidad del Sistema.....	80
Resultado del Objetivo Específico 4: Evaluación de la Viabilidad Técnica y Económica del Prototipo.....	89
Discusión.....	91

Conclusiones	96
Recomendaciones	99
Referencias Bibliográficas.....	103

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Análisis Comparativo de Sistemas IoT para Monitoreo de Procesos Agrícolas.....</i>	30
Tabla 2	<i>Métodos de Secado de Café: Comparación de Características.....</i>	39
Tabla 3	<i>Especificaciones Técnicas del Microcontrolador ESP32</i>	42
Tabla 4	<i>Especificaciones Técnicas del Sensor DHT22</i>	43
Tabla 5.	<i>Especificaciones Técnicas del Sensor SHT31-D.....</i>	43
Tabla 6	<i>Especificaciones Técnicas del Sensor DS18B20.....</i>	44
Tabla 7	<i>Relación entre objetivos específicos, fases metodológicas y actividades principales ...</i>	50
Tabla 8	<i>Resultados Generales Prueba 1</i>	55
Tabla 9	<i>Datos Representativos de Temperatura y Humedad - Prueba 1</i>	56
Tabla 10	<i>Resultados generales Prueba 2</i>	58
Tabla 11	<i>Resultados Generales Prueba 3</i>	59
Tabla 12	<i>Comparación Consolidada de Resultados - Tres Pruebas.....</i>	60
Tabla 13	<i>Comparación técnica de componentes electrónicos</i>	64
Tabla 14	<i>Evaluación de Desempeño del Sistema de Monitoreo</i>	87
Tabla 15	<i>Análisis de Costos y Retorno de Inversión.....</i>	89

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de flujo del funcionamiento de la estación de visualización de datos para el secado de café.</i>	53
Figura 2 <i>Eficiencia en tiempo requerido por arroba de café procesado en las tres pruebas experimentales.</i>	62
Figura 3 <i>Diagrama electrónico del prototipo de monitoreo para secado de café.</i>	67
Figura 4 <i>Medición de la estructura del secadero tipo invernadero.</i>	69
Figura 5 <i>Construcción física del secadero tipo invernadero a pequeña escala.</i>	69
Figura 6 <i>Superficie de soporte y ventilación del secadero.</i>	70
Figura 7 <i>Secadero tipo invernadero durante el proceso de secado del café.</i>	71
Figura 8 <i>Integración interna del prototipo electrónico de monitoreo.</i>	72
Figura 9 <i>Instalación del sistema electrónico durante el secado de café en invernadero.</i>	72
Figura 10 <i>Pantalla LCD 20x4 del microcontrolador ESP32 mostrando lecturas en tiempo real de temperatura y humedad durante la operación del sistema de monitoreo</i>	83
Figura 11 <i>Sistema de monitoreo ESP32 instalado en el secadero junto al café pergamino durante el proceso de secado en invernadero</i>	84
Figura 12 <i>Visualización en tiempo real de variables de temperatura y humedad en la aplicación móvil de ThingSpeak durante el monitoreo del proceso de secado</i>	85
Figura 13 <i>Evidencia física de los ensayos experimentales de secado de café en invernadero</i> ..	86

Introducción

El café constituye uno de los productos agrícolas de mayor relevancia económica a nivel mundial, representando para Colombia el segundo producto de exportación después del petróleo y una fuente de ingreso esencial para aproximadamente 550,000 familias productoras distribuidas en 23 departamentos del territorio nacional. En el departamento del Huila, reconocido internacionalmente por la producción de cafés especiales de alta calidad, el cultivo cafetero representa el eje central de la economía rural, generando empleo directo e indirecto para miles de habitantes.

El proceso de beneficio del café, que transforma la cereza recién cosechada en café pergamino seco apto para comercialización, comprende varias etapas críticas, siendo el secado la fase determinante para la calidad final del grano. Durante esta etapa, el contenido de humedad debe reducirse desde aproximadamente 55% en el café recién lavado hasta un rango óptimo entre 10% y 12%, establecido como norma vigente por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia para garantizar la estabilidad del grano durante el almacenamiento y conservar sus características organolépticas (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2020).

El método tradicional de secado solar, ampliamente utilizado por pequeños productores debido a su bajo costo operativo, presenta vulnerabilidades significativas asociadas a la variabilidad climática. Factores como precipitaciones inesperadas, alta humedad relativa ambiental y fluctuaciones bruscas de temperatura pueden prolongar excesivamente el tiempo de secado, generando condiciones propicias para el desarrollo de mohos, fermentaciones indeseadas y defectos físicos en el grano que afectan directamente su valor comercial (Food and Agriculture Organization, 2011; International Coffee Organization, 2020).

En este contexto, la integración de tecnologías de telecomunicaciones e Internet de las Cosas (IoT) emerge como una solución viable para optimizar el proceso de secado mediante monitoreo continuo y en tiempo real de las variables ambientales críticas. El presente proyecto de grado desarrolla e implementa una estación electrónica de visualización de datos basada en el microcontrolador ESP32, sensores de temperatura y humedad DHT22, SHT31-D y DS18B20, y la plataforma cloud ThingSpeak, aplicada al secado de café en un invernadero a pequeña escala ubicado en el barrio Villa María, municipio de Altamira, Huila.

La investigación adopta un enfoque cuantitativo experimental, realizando tres ciclos de pruebas con una arroba de café por ensayo, registrando sistemáticamente datos de temperatura ambiente, humedad relativa, temperatura interna del café y humedad del grano en tres horarios diarios (6:00, 12:00 y 18:00 horas). Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del sistema para mantener condiciones controladas de secado, alcanzando humedades finales entre 10.8% y 11.5%, dentro del rango normativo establecido.

Este documento presenta de manera organizada el desarrollo del proyecto, comenzando con el planteamiento del problema y la justificación desde los ámbitos académico, social y tecnológico. Luego se describen los objetivos y el marco teórico que sustenta la propuesta, seguido de la metodología utilizada para el diseño y la construcción del sistema. Finalmente, se exponen los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas. En conjunto, el proyecto busca aportar al fortalecimiento de la agricultura de precisión en la caficultura colombiana, mediante una solución tecnológica accesible y de bajo costo que permita a los pequeños productores mejorar sus procesos de secado y aumentar la calidad y competitividad de su café.

Planteamiento del Problema

La caficultura colombiana enfrenta múltiples desafíos técnicos, económicos y climáticos que impactan directamente la calidad final del producto y, consecuentemente, el ingreso de los pequeños productores. Entre las etapas del beneficio del café, el secado constituye el proceso más crítico y vulnerable, determinando en gran medida las características organolépticas, físicas y comerciales del grano.

En la región cafetera del Huila, específicamente en el municipio de Altamira, los productores de pequeña escala dependen predominantemente del método de secado solar tradicional, que consiste en exponer el café lavado sobre superficies planas (patios de cemento, mallas elevadas o lonas) a la radiación solar directa durante un período que varía entre 5 y 15 días, dependiendo de las condiciones climáticas. Este método, si bien es económico por no requerir combustibles ni energía eléctrica, presenta limitaciones técnicas significativas que comprometen la uniformidad y calidad del secado.

Las principales problemáticas identificadas en el proceso de secado tradicional incluyen:

Variabilidad climática impredecible: La región presenta períodos de alta humedad relativa (superior al 70%) y precipitaciones irregulares, especialmente durante los meses de cosecha principal (abril-mayo y octubre-noviembre), que obligan a suspender el secado y cubrir el café, generando ciclos de humedad-secado que deterioran la calidad del grano.

Falta de control de variables críticas: Los productores carecen de instrumentos de medición precisos para monitorear en tiempo real la temperatura y humedad del ambiente

y del grano, tomando decisiones empíricas basadas en observación visual y experiencia personal, lo que incrementa el riesgo de sobre-secado (humedad inferior al 10%) o sub-secado (humedad superior al 12%).

Tiempo de secado prolongado e ineficiente: El secado solar convencional requiere entre 7 y 15 días para alcanzar la humedad objetivo, período durante el cual el café permanece expuesto a condiciones ambientales fluctuantes que favorecen el desarrollo de hongos, fermentaciones secundarias y defectos organolépticos.

Exposición a contaminación y pérdidas económicas: Durante el secado al aire libre, el café está expuesto a polvo, insectos, animales y otros contaminantes que reducen su calidad física. Adicionalmente, las lluvias inesperadas pueden ocasionar pérdidas totales de lotes completos si no se protegen a tiempo.

Impacto Negativo en la Calidad Sensorial: El secado desigual o excesivamente lento puede generar defectos en taza, como sabores vinagres, fermentados, terrosos o mohosos, los cuales descalifican el café para mercados de especialidad y disminuyen significativamente su valor comercial, pudiendo reducir su precio de venta entre un 30% y 40% (Specialty Coffee Association, 2018; International Coffee Organization, 2020).

Para el caso específico del barrio Villa María en Altamira, Huila, donde se desarrolla este proyecto, los productores cafeteros procesan volúmenes pequeños (entre 1 y 5 arrobas por ciclo de cosecha), carecen de infraestructura tecnificada de secado y no cuentan con sistemas de monitoreo que les permitan tomar decisiones informadas durante el proceso. Esta situación limita su capacidad para acceder a mercados de cafés especiales que exigen estándares estrictos de calidad y trazabilidad del proceso productivo.

Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles, de bajo costo y fácil operación que permitan a los pequeños productores monitorear en tiempo real las condiciones ambientales durante el secado, optimizar el uso de recursos, reducir pérdidas por defectos de calidad y mejorar la competitividad comercial de su café.

Con base en esta problemática identificada, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo puede una estación de monitoreo en tiempo real, basada en tecnologías de telecomunicaciones e Internet de las Cosas (IoT), optimizar el proceso de secado de café en invernadero a pequeña escala, mejorando la calidad del grano mediante el control cuantitativo de variables ambientales críticas?

La respuesta a esta pregunta constituye el objetivo central del presente proyecto aplicado de desarrollo tecnológico, orientado a diseñar, implementar y validar experimentalmente un sistema electrónico de monitoreo que integre sensores, microcontrolador, conectividad inalámbrica y plataforma de visualización Cloud para el secado controlado de café.

Justificación

Justificación Académica

Esta modalidad promueve el diseño y ejecución de proyectos orientados a la transferencia social del conocimiento mediante la aplicación innovadora de tecnologías para la solución de problemas reales en contextos específicos.

El desarrollo de una estación de monitoreo para el secado de café integra de manera transversal múltiples competencias propias de la formación en Ingeniería de Telecomunicaciones, incluyendo:

Sistemas embebidos: Programación y configuración del microcontrolador ESP32, manejo de protocolos de comunicación I2C y OneWire para integración de sensores.

Redes de datos y conectividad inalámbrica: Implementación de conectividad WiFi para transmisión de datos en tiempo real hacia plataforma cloud.

Internet de las Cosas (IoT): Diseño de arquitectura IoT completa incluyendo capa de sensores, capa de procesamiento, capa de comunicación y capa de aplicación.

Análisis de datos: Procesamiento, visualización e interpretación de datos cuantitativos obtenidos de variables ambientales.

Gestión de proyectos tecnológicos: Planificación, ejecución y documentación de un proyecto completo desde la fase de diseño hasta la validación experimental.

Adicionalmente, el proyecto contribuye al fortalecimiento de líneas de investigación institucionales relacionadas con tecnologías aplicadas al desarrollo rural, agricultura de precisión y soluciones tecnológicas para comunidades vulnerables, alineándose con los objetivos de proyección social de la UNAD.

Justificación Social

Colombia es el tercer productor mundial de café arábica y el país cuenta con aproximadamente 550,000 familias cafeteras, de las cuales más del 95% son pequeños productores con menos de 5 hectáreas cultivadas. En el departamento del Huila, reconocido por obtener la Denominación de Origen Protegida (DOP) “Café del Huila” en 2013, el café constituye la principal actividad económica de 37 municipios, generando empleo directo e indirecto para más de 80,000 familias (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2022; Organización Internacional del Café, 2021).

Sin embargo, los pequeños productores enfrentan barreras significativas para acceder a tecnologías que mejoren sus procesos productivos, limitando su capacidad para competir en mercados de cafés especiales que ofrecen precios diferenciados basados en calidad. El presente proyecto genera impacto social positivo en múltiples dimensiones:

Mejora de ingresos económicos: Al optimizar el proceso de secado y reducir defectos de calidad, los productores pueden acceder a mejores precios de venta, incrementando sus ingresos entre 15% y 30% según la calidad lograda.

Empoderamiento mediante alfabetización digital: La capacitación en el uso del sistema de monitoreo mediante aplicación móvil promueve el desarrollo de competencias digitales en población rural, reduciendo la brecha tecnológica.

Sostenibilidad ambiental: El uso de secaderos tipo invernadero con monitoreo automatizado reduce la necesidad de combustibles fósiles empleados en secaderos mecánicos convencionales, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental del proceso productivo.

Replicabilidad en otras regiones cafeteras: El diseño modular y documentado del sistema facilita su replicación en otras zonas cafeteras de Colombia y países productores de café en Latinoamérica, multiplicando el impacto social del proyecto.

Justificación Tecnológica

El desarrollo de la agricultura de precisión, fundamentada en el uso de sensores, sistemas de monitoreo en tiempo real y análisis de datos, representa una de las principales tendencias tecnológicas para la optimización de procesos agrícolas en el siglo

XXI. La integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en contextos agrícolas permite la toma de decisiones basada en datos cuantitativos, mejorando la eficiencia productiva y la calidad de los productos.

El presente proyecto aporta innovación tecnológica en los siguientes aspectos:

El sistema propuesto requiere la integración de sensores orientados al monitoreo de variables críticas del proceso de secado, principalmente la temperatura y la humedad relativa del ambiente interno y externo del secadero, así como el seguimiento térmico de la masa de café durante el proceso. Esta medición permite obtener información cuantitativa sobre las condiciones reales del invernadero, disminuyendo la dependencia de la observación empírica y favoreciendo una toma de decisiones más precisa por parte del productor.

Asimismo, el proyecto contempla el uso de conectividad inalámbrica para transmitir los datos registrados desde el secadero hacia una plataforma de visualización remota. Esta característica permite consultar la información sin necesidad de estar permanentemente junto al prototipo, facilita el seguimiento del proceso y reduce la dependencia de conexiones físicas extensas dentro del área de secado.

La visualización de datos en una plataforma digital constituye otro aporte tecnológico relevante, ya que permite organizar, almacenar y consultar la información generada durante el secado. De esta manera, el productor puede observar el comportamiento de las variables

ambientales, identificar cambios en el proceso y tomar decisiones oportunas para evitar condiciones que puedan afectar la calidad final del grano.

Otro aspecto importante es la posibilidad de escalabilidad del sistema, debido a que su estructura puede adaptarse a futuras mejoras, como la incorporación de nuevas variables de monitoreo, la ampliación a otros secaderos o la integración de herramientas adicionales de análisis. Esto permite que el proyecto no se limite únicamente al prototipo inicial, sino que pueda proyectarse como una solución adaptable a diferentes necesidades productivas.

Finalmente, el proyecto se fundamenta en el uso de tecnologías accesibles, de bajo costo y fácil mantenimiento, lo cual favorece su posible adopción por pequeños productores cafeteros. La combinación de monitoreo de variables, transmisión inalámbrica y visualización remota genera una alternativa tecnológica pertinente para mejorar el control del secado de café, reducir riesgos asociados a la variabilidad climática y contribuir al cierre de la brecha tecnológica en contextos rurales.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una estación de monitoreo en tiempo real de las señales físicas de temperatura y humedad para el proceso de secado de café en invernadero a pequeña escala, la cual cuente con instrumentación electrónica para la visualización local y remota de las condiciones ambientales.

Objetivos Específicos

Caracterizar el proceso de secado solar de café en pequeña escala, a partir del registro sistemático de variables ambientales durante tres ciclos experimentales consecutivos, con el propósito de establecer las condiciones de operación y los requerimientos básicos del sistema de monitoreo.

Construir el prototipo de la estación de visualización de datos mediante la integración física de sensores, microcontrolador ESP32, pantalla de visualización local, sistema de alimentación y plataforma cloud, con el fin de evidenciar el proceso de montaje, conexión y funcionamiento del sistema aplicado al secado de café en invernadero.

Validar el funcionamiento y la confiabilidad del sistema mediante la implementación del prototipo, el registro de datos en tiempo real y el análisis comparativo de la información recopilada durante las tres pruebas experimentales bajo un protocolo de pruebas.

Evaluar la viabilidad técnica y económica del prototipo mediante la cuantificación de costos totales, el análisis de los componentes utilizados y la pertinencia de su implementación en pequeños productores cafeteros.

Marco Teórico y Conceptual

Estado del Arte

Panorama Internacional de IoT en Agricultura de Precisión

La implementación de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura de precisión ha experimentado un crecimiento exponencial durante la última década, transformándose en un componente fundamental para la modernización del sector agrícola global. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023), la adopción de sistemas IoT en agricultura ha alcanzado una penetración del 12.8% a nivel mundial en 2023, con proyecciones de crecimiento hasta el 23% para 2030, impulsada principalmente por la necesidad de optimizar recursos hídricos, incrementar la productividad y reducir el impacto ambiental de las prácticas agrícolas convencionales.

En el contexto asiático, particularmente en Japón y Corea del Sur, la integración de sistemas IoT para monitoreo de cultivos de arroz ha demostrado incrementos significativos en productividad del orden del 18-25% mediante la optimización automatizada de sistemas de riego y fertilización basados en datos en tiempo real (Kim et al., 2024). Estos sistemas emplean redes de sensores inalámbricos distribuidos estratégicamente en los campos de cultivo, capaces de medir variables como humedad del suelo, temperatura ambiente, pH, conductividad eléctrica y niveles de nutrientes, transmitiendo esta información hacia plataformas cloud que ejecutan algoritmos de análisis predictivo para la toma de decisiones automatizadas.

En América Latina, Brasil lidera la adopción tecnológica con más de 15,000 explotaciones agrícolas equipadas con sensores inteligentes para monitoreo de cultivos estratégicos como soja, maíz y caña de azúcar (da Silva & Oliveira, 2023). El Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Brasil (EMBRAPA) ha documentado reducciones de hasta

40% en el consumo de agua y 35% en el uso de agroquímicos mediante la implementación de sistemas de riego inteligente controlado por IoT. México, por su parte, ha desarrollado redes de sensores para cultivos de aguacate en la región de Michoacán, logrando reducir pérdidas post-cosecha en 30% mediante el control preciso de las condiciones de almacenamiento (Hernández-López et al., 2024).

MOKOSmart (2024) identifica siete aplicaciones críticas de IoT en la cadena de suministro del café, destacando que el monitoreo de variables ambientales durante el proceso de secado constituye uno de los eslabones más vulnerables y con mayor impacto directo sobre la calidad final del producto. El estudio señala que la variabilidad climática no controlada durante el secado puede generar pérdidas de calidad cuantificables en reducciones de hasta 30% en el precio de comercialización del grano.

Tecnologías de Monitoreo para Secado de Café: Estado Actual

Sistemas Basados en Microcontroladores Arduino. Radhy (2024) desarrolló un sistema de monitoreo y control para secado de café basado en Arduino Uno R4 WiFi, empleando sensores DHT22 para temperatura y humedad ambiental, sensor infrarrojo MLX90614 para temperatura sin contacto del grano, y un sistema de bomba de calor tipo Peltier para control térmico. El sistema integra comunicación con la plataforma ThingBoard Cloud para visualización en tiempo real. La investigación reporta que el secado por bomba de calor a temperaturas controladas entre 40-50°C permite mantener las características organolépticas del café, evitando el daño térmico que ocurre por encima de 60°C. Sin embargo, el estudio no proporciona datos cuantitativos sobre la eficiencia energética del sistema ni análisis económico de viabilidad para pequeños productores.

Una limitación crítica identificada en este sistema es el costo elevado del módulo Peltier y el driver de potencia VNH2SP30, que incrementa significativamente la inversión inicial requerida, estimada en aproximadamente USD \$350-400 para un prototipo funcional, lo cual puede resultar prohibitivo para productores de subsistencia en regiones rurales de países en desarrollo.

Sistemas de Monitoreo con Comunicación LoRaWAN. Radhy (2021) implementó un sistema de control de secado natural en agricultura post-cosecha utilizando el protocolo de comunicación LoRaWAN y el kit de desarrollo Helium. El sistema monitorea temperatura y humedad dentro y fuera de la casa de secado, transmitiendo datos mediante tecnología de largo alcance (hasta 15 km en terreno abierto) hacia la plataforma cloud The Things Network. El estudio destaca que LoRaWAN ofrece ventajas significativas en zonas rurales con limitada cobertura WiFi o celular, presentando un consumo energético ultra bajo (menos de 5 mA en operación) que permite autonomía extendida con baterías de respaldo.

No obstante, el protocolo LoRaWAN presenta limitaciones en cuanto a velocidad de transmisión de datos (máximo 50 kbps) y frecuencia de actualización permitida (típicamente una transmisión cada 5-10 minutos para evitar saturación de la red), lo cual puede resultar insuficiente para aplicaciones que requieren monitoreo de alta frecuencia o control en tiempo real estricto.

Prototipos de Control Automático de Temperatura. Bravo Montenegro et al. (2022) desarrollaron un prototipo para control de temperatura y monitoreo de humedad en secado mecánico de café en la Institución Educativa Agropecuaria La Capilla, Cajibío, Cauca. El sistema emplea instrumentación electrónica y diseño asistido por computador, implementando un equipo mecánico tipo silo con capacidad de 5 kg de carga. Los resultados experimentales

demonstraron una reducción significativa en el tiempo de secado comparado con métodos manuales tradicionales, manteniendo la temperatura de operación por debajo del umbral crítico de 60°C para evitar degradación organoléptica.

El sistema diseñado no incluye capacidades de almacenamiento de datos históricos ni conectividad IoT, limitando su funcionalidad a operación local sin posibilidad de monitoreo remoto o análisis de tendencias temporales, aspectos cada vez más valorados en agricultura de precisión moderna.

Aplicaciones Específicas de IoT en Caficultura Colombiana

Redes Inalámbricas de Sensores en Cultivos. El proyecto de Red Inalámbrica de Sensores para Monitoreo de Cultivo de Café desarrollado por la Universidad de los Andes (2023) implementó una arquitectura de sensores distribuidos basada en Arduino Due y Raspberry Pi 4 para monitoreo de variables agroambientales en plantaciones de café del Eje Cafetero. El sistema registra temperatura ambiente, humedad relativa, humedad del suelo, pH y contenido de nutrientes, transmitiendo datos mediante protocolo IEEE 1451.5 hacia una estación central de procesamiento.

Los resultados de las pruebas experimentales demostraron correlación significativa entre variables de humedad ambiental y condiciones del suelo, permitiendo detectar patrones de estrés hídrico en las plantas con 72 horas de anticipación. Sin embargo, el sistema presenta limitaciones en cuanto a escalabilidad, ya que requiere conexión cableada para alimentación eléctrica de cada nodo sensor, restringiendo su implementación a áreas con infraestructura eléctrica disponible.

Sistemas de Riego Inteligente. López-García et al. (2023) diseñaron un sistema de agricultura de precisión para riego inteligente de cultivos de café utilizando tecnologías IoT en la región del Cauca. El sistema emplea sensores capacitivos de humedad del suelo conectados a

microcontroladores Arduino, con algoritmos de control proporcional-integral-derivativo (PID) para activación automatizada de electroválvulas de riego. Los resultados experimentales reportan reducción de 40% en consumo de agua y mejora de 18% en uniformidad de crecimiento de las plantas comparado con sistemas de riego manual tradicional.

Una limitación identificada es la ausencia de integración con datos meteorológicos externos y predicciones climáticas, lo cual podría optimizar aún más la programación de riego anticipando eventos de precipitación o cambios significativos en las condiciones atmosféricas.

Proyectos Piloto de Identidad IoT. Sánchez (2018), CEO de Identidad IoT, reportó la implementación de un proyecto piloto en una finca cafetera colombiana para evaluación de sistemas de monitoreo en dos lotes de 3.5 hectáreas cada uno. El sistema instaló 10 sensores para medición de humedad relativa, temperatura y precipitaciones, con el objetivo de determinar la incidencia de variaciones climáticas en la proliferación de plagas y daños en cosechas. El estudio identificó que la principal barrera para adopción tecnológica en el sector rural no es técnica sino cultural, derivada de la percepción errada de que implementar IoT requiere inversiones prohibitivamente costosas solo accesibles para grandes multinacionales.

Los resultados preliminares demostraron que modelos de prestación de servicios (SaaS - Software as a Service) permiten a pequeños productores acceder a tecnología IoT sin inversiones iniciales elevadas en infraestructura, pagando únicamente por el servicio de monitoreo recibido.

Marco Referencial

Plataformas de Visualización de Datos y Cloud Computing

ThingSpeak como Plataforma IoT. ThingSpeak, desarrollado por MathWorks, constituye una de las plataformas SaaS IoT más ampliamente adoptadas para proyectos de monitoreo ambiental debido a su arquitectura cloud robusta, integración nativa con MATLAB para análisis

avanzado de datos, y modelo freemium que permite hasta 8 campos de datos con actualizaciones cada 15 segundos en cuentas gratuitas. Singh et al. (2024) implementaron un sistema de automatización de invernadero utilizando ESP32, sensor AM2301 y la plataforma ThingSpeak, logrando control automático de temperatura, humedad y luminosidad mediante módulos actuadores relay. El sistema demostró confiabilidad de 99.2% en transmisión de datos durante pruebas continuas de 60 días.

Consuegra-Fontalvo et al. (2022) destacan que ThingSpeak ofrece ventajas significativas en términos de facilidad de integración mediante API REST, visualización nativa de gráficos de series temporales, y capacidad de ejecutar scripts MATLAB directamente en la nube para procesamiento avanzado de datos. Sin embargo, identifican limitaciones en la versión gratuita relacionadas con frecuencia de actualización restringida (máximo 4 actualizaciones por minuto por canal) y almacenamiento limitado de datos históricos.

Plataformas Alternativas: Blynk, Ubidots y AWS IoT. Alternativamente, plataformas como Blynk ofrecen interfaces de usuario más amigables con aplicaciones móviles nativas para iOS y Android, permitiendo visualización de datos y control de actuadores mediante widgets configurables. Ubidots proporciona capacidades empresariales avanzadas incluyendo alertas programables, dashboards personalizables y análisis predictivo mediante machine learning. Amazon Web Services (AWS) IoT Core ofrece escalabilidad masiva y seguridad de nivel empresarial, aunque con curva de aprendizaje más pronunciada y costos variables según volumen de datos procesados.

La selección de la plataforma óptima depende críticamente del contexto específico de aplicación, considerando factores como presupuesto disponible, capacidades técnicas del usuario final, requisitos de escalabilidad futura, y necesidades de integración con sistemas existentes.

Microcontrolador ESP32: Arquitectura y Aplicaciones

Características Técnicas del ESP32. El microcontrolador ESP32, desarrollado por Espressif Systems y lanzado comercialmente en septiembre de 2016, representa una evolución significativa respecto a su predecesor ESP8266, incorporando procesador dual-core Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits con frecuencia ajustable entre 80-240 MHz, conectividad WiFi

802.11 b/g/n (2.4 GHz) con potencia de salida de +19.5 dBm, soporte para Bluetooth clásico y Bluetooth Low Energy (BLE), 34 pines GPIO programables, 18 canales ADC de 12 bits, 2 canales DAC de 8 bits, interfaces SPI, I2C, I2S, UART, y memoria Flash integrada de hasta 16 MB dependiendo del módulo específico (DroneBot Workshop, 2024).

La familia ESP32 ha experimentado expansión significativa desde su lanzamiento inicial, conformándose actualmente por cuatro líneas de producto principales: ESP32 (serie original), ESP32-S (optimizada para eficiencia energética), ESP32-C (basada en arquitectura RISC-V), y ESP32-H (orientada a aplicaciones de hogar inteligente con soporte para Thread y Zigbee). Esta diversificación permite seleccionar el dispositivo óptimo según requisitos específicos de cada aplicación en términos de procesamiento, consumo energético, protocolos de comunicación y costo.

Aplicaciones del ESP32 en Agricultura de Precisión. La versatilidad del ESP32 lo ha posicionado como microcontrolador de elección para numerosos proyectos de agricultura de precisión. Singh et al. (2024) implementaron un sistema de automatización de invernadero controlando temperatura, humedad y luminosidad mediante ESP32 y plataforma ThingSpeak. Sushmitha et al. (2022) desarrollaron un sistema de control y monitoreo de invernadero utilizando ESP32, demostrando capacidad de respuesta en tiempo real para ajuste de condiciones ambientales.

FritzenLab (2024) documentó la implementación de un sensor de humedad de suelo capacitivo conectado a ESP32-S2 Franzininho, transmitiendo datos hacia ThingSpeak junto con mediciones de temperatura y presión atmosférica mediante sensor BMP280. El sistema demostró consumo energético menor a 50 mA durante operación activa con WiFi habilitado, permitiendo autonomía de varios días con batería de ion-litio de 2000 mAh.

Un estudio particularmente relevante es el desarrollado para análisis autónomo de suelo mediante rover robótico equipado con ESP32, sensores de NPK, pH, temperatura, humedad y módulo GPS NEO-6M, transmitiendo datos georeferenciados hacia ThingSpeak para generación de mapas de fertilidad del suelo en tiempo real (International Research Journal of Modernization in Engineering, 2024). Este tipo de aplicaciones evidencia el potencial del ESP32 para sistemas de monitoreo móvil y distribuido.

Sensores de Temperatura y Humedad: Comparación Técnica

Sensor DHT22 (AM2302). El sensor DHT22 constituye una de las opciones más económicas y ampliamente adoptadas para medición de temperatura y humedad relativa en proyectos IoT. Especificaciones técnicas incluyen rango de medición de humedad de 0-100% RH con precisión de $\pm 2\%$, rango de temperatura de -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$ con precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, tiempo de respuesta de 2 segundos, y consumo de corriente en operación de 2.5 mA máximo. El sensor emplea protocolo de comunicación propietario de un solo cable, requiriendo temporización precisa para lectura correcta de datos (TodoMaker, 2022).

Ventajas identificadas incluyen bajo costo (típicamente USD \$3-5 por unidad), amplia disponibilidad comercial, y bibliotecas de software maduras para múltiples plataformas (Arduino, ESP32, Raspberry Pi). Limitaciones documentadas comprenden susceptibilidad a interferencia electromagnética, deriva de calibración en ambientes de alta humedad prolongada

(>90% RH por más de 48 horas), y tiempo de muestreo relativamente lento (máximo una lectura cada 2 segundos).

Sensor SHT31-D. El sensor SHT31-D, manufacturado por Sensirion, representa tecnología de segunda generación con desempeño mejorado. Especificaciones técnicas incluyen rango de humedad de 0-100% RH con precisión de $\pm 2\%$, rango de temperatura de -40°C a $+125^{\circ}\text{C}$ con precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, tiempo de respuesta menor a 8 segundos, interfaz digital I2C, y consumo de corriente de $1.5\ \mu\text{A}$ en modo de bajo consumo. El sensor incorpora calibración individual de fábrica grabada en memoria EEPROM interna, garantizando precisión a largo plazo.

Ventajas competitivas incluyen mayor precisión y estabilidad temporal, capacidad de operación en temperaturas extremas, bajo consumo energético optimizado para aplicaciones alimentadas por batería, y protocolo de comunicación I2C estándar que facilita integración con múltiples sensores en el mismo bus. El costo es aproximadamente 2-3 veces superior al DHT22 (USD \$7-12 por unidad), justificado por mejoras sustanciales en confiabilidad y precisión.

Sensor DS18B20 para Temperatura del Grano. El sensor de temperatura DS18B20, fabricado por Maxim Integrated (ahora Analog Devices), emplea tecnología de sensor de silicio de alta precisión con rango de operación de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ entre -10°C y $+85^{\circ}\text{C}$, resolución programable de 9 a 12 bits (0.5°C a 0.0625°C), y protocolo de comunicación 1-Wire que permite conectar múltiples sensores en paralelo utilizando un solo pin GPIO. El sensor puede operar en modo parásito sin alimentación externa, extrayendo energía de la línea de datos.

Esta característica de conexión en bus resulta particularmente ventajosa para aplicaciones de monitoreo multi-punto, permitiendo implementar sistemas de medición de gradientes térmicos

en diferentes profundidades de la cama de secado utilizando múltiples sensores DS18B20 direccionables mediante identificadores únicos de 64 bits asignados en fábrica.

Análisis Comparativo de Proyectos Relacionados

La Tabla 1 presenta un análisis comparativo sistemático de proyectos similares de monitoreo IoT para procesos de secado y agricultura de precisión, identificando tecnologías empleadas, variables monitoreadas, plataformas de visualización, costos estimados, y principales limitaciones documentadas. Este análisis permite identificar brechas tecnológicas y oportunidades de mejora que justifican la contribución del presente proyecto.

Tabla 1*Análisis Comparativo de Sistemas IoT para Monitoreo de Procesos Agrícolas*

Investigación	Año	Tecnología	VARIABLES	Plataforma	Costo (USD)	Principales limitaciones	Ventajas del presente proyecto
Radhy (2024), Indonesia	2024	Arduino R4 WiFi, DHT22, MLX90614, sistema Peltier	Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del objeto	ThingBoard Cloud	\$350 - \$400	Costo elevado, secado mecánico, sin análisis económico	Costo 85% menor, enfoque en secado solar y viabilidad para pequeños productores
Radhy (2021), Indonesia	2021	Helium Kit, LoRaWAN, sensores básicos	Temperatura y humedad interior/externo	The Things Network	\$180 - \$220	Actualización lenta de datos cada 5 a 10 minutos, requiere gateway LoRa y no incluye monitoreo del producto	Actualización cada 15 segundos, triple medición y uso de WiFi accesible
Bravo et al. (2022), Cajibío, Colombia	2022	Sistema embebido sin conectividad	Temperatura y humedad	Local	\$280 - \$320	Sin IoT cloud, sin datos históricos y capacidad limitada a 5 kg	Conectividad en tiempo real, almacenamiento en la nube y análisis de tendencias

Universidad de los Andes (2023), Colombia	2023	Arduino + Raspberry Pi 4, red cableada	Múltiples variables del cultivo	Raspberry Pi	\$420 - \$480	Alimentación cableada, enfoque en cultivo y alta complejidad	Sistema inalámbrico, específico para secado e implementación simple
Singh et al. (2024), India	2024	ESP32, DHT22	Temperatura, humedad y luminosidad	ThingSpeak	\$85 - \$120	Enfocado en invernadero de cultivo, sin medición de temperatura del producto y no específico para café	Secado de café específico, medición de temperatura del grano y tres ciclos validados
Presente proyecto, Altamira, Huila	2025	ESP32, DHT22, SHT31-D y DS18B20	Temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del grano	ThingSpeak	\$ 58	Requiere conexión WiFi	Menor costo para el sector, capacidad de 1 arroba, triple sensor de verificación, validación en 3 ciclos completos, medición de calidad final y aplicación en contexto productor real

Nota. Elaboración propia basada en la revisión de literatura y proyectos relacionados con sistemas IoT para el monitoreo de procesos agrícolas y secado de café, correspondiente al periodo 2024-2025.

Brechas Tecnológicas y Oportunidades Identificadas

El análisis sistemático del estado del arte revela las siguientes brechas significativas en la literatura científica y desarrollos tecnológicos existentes:

Ausencia de Sistemas Específicos para Pequeños Productores. La mayoría de sistemas IoT documentados en la literatura están orientados hacia agricultura comercial de mediana y gran escala, con costos de implementación que oscilan entre USD \$150-500, excluyendo efectivamente a pequeños productores de subsistencia que constituyen el 85% de los caficultores colombianos según estadísticas de la Federación Nacional de Cafeteros (2024). Existe una necesidad crítica no atendida de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles económicamente, técnicamente simples de operar y mantener, y culturalmente apropiadas para contextos rurales con limitaciones de conectividad y capacitación técnica.

Falta de Validación en Condiciones Reales de Producción. Numerosos estudios reportan resultados de prototipos funcionales evaluados en ambientes controlados de laboratorio o simulaciones, pero carecen de validación extendida en condiciones reales de producción agrícola con todas las variables ambientales, logísticas y operacionales que enfrentan productores rurales cotidianamente. Esta brecha limita severamente la aplicabilidad práctica de los desarrollos tecnológicos y genera escepticismo justificado en la comunidad productora respecto a la efectividad real de las soluciones propuestas.

El presente proyecto aborda esta limitación mediante la realización de tres ciclos completos de secado en condiciones operacionales reales de una finca cafetera familiar, registrando no solamente parámetros técnicos sino también aspectos logísticos, económicos y sociales relevantes para adopción tecnológica.

Ausencia de Medición de Calidad Final del Producto. Un vacío crítico identificado en prácticamente todos los estudios revisados es la ausencia de medición objetiva de la calidad final del producto agrícola procesado. Los sistemas de monitoreo se limitan a registrar variables ambientales durante el proceso, pero no verifican si las condiciones monitoreadas efectivamente resultaron en un producto de calidad superior, estable y comercializable. Esta desconexión entre datos de proceso y calidad de producto representa una limitación metodológica fundamental que el presente proyecto supera mediante la medición sistemática de humedad final del grano y verificación de cumplimiento con estándares de comercialización establecidos por normativa colombiana.

Limitada Documentación de Viabilidad Económica. La literatura técnica existente se enfoca predominantemente en aspectos tecnológicos (hardware, software, comunicaciones), descuidando análisis económicos rigurosos de viabilidad, retorno de inversión, y modelos de negocio sostenibles para implementación a escala. Esta omisión resulta especialmente problemática en contextos de agricultura familiar donde decisiones de inversión tecnológica están fuertemente condicionadas por recursos financieros extremadamente limitados y necesidad de recuperación rápida de capital invertido.

El presente proyecto incorpora análisis económico detallado del costo de implementación del sistema, comparación con métodos tradicionales, y estimación de beneficios tangibles e intangibles para el productor, contribuyendo elementos críticos para toma de decisiones de adopción tecnológica.

Ausencia de Triple Verificación de Mediciones. Una práctica poco común en los sistemas revisados es la implementación de redundancia de sensores para verificación cruzada de mediciones críticas. La mayoría

de sistemas emplean un único sensor para cada variable, introduciendo riesgo de error no detectado por mal funcionamiento o descalibración del sensor. El presente proyecto innova incorporando triple medición mediante sensores de diferentes tecnologías (DHT22 capacitivo, SHT31-D capacitivo mejorado, DS18B20 digital) que permiten identificar lecturas anómalas mediante análisis de consistencia entre dispositivos, incrementando significativamente la confiabilidad del sistema.

Justificación y Contribución del Presente Proyecto

Con base en las brechas identificadas en el estado del conocimiento actual, el presente proyecto de investigación realiza las siguientes contribuciones originales y significativas:

Desarrollo de Sistema de Muy Bajo Costo: Con inversión total de COP \$226,400 (aproximadamente USD \$58), el sistema representa el costo más bajo documentado en la literatura para monitoreo IoT de procesos agrícolas, reduciendo en 45-75% la inversión requerida comparado con alternativas existentes. Esta reducción de costo es alcanzada mediante selección estratégica de componentes comerciales de consumo masivo, diseño optimizado que elimina elementos no esenciales, y aprovechamiento de plataformas cloud gratuitas, sin comprometer funcionalidad ni confiabilidad.

Triple Verificación de Mediciones Críticas: La implementación de tres sensores de temperatura y humedad basados en tecnologías diferentes (DHT22, SHT31-D, DS18B20) permite verificación cruzada de datos y detección de anomalías, característica no identificada en ninguno de los sistemas revisados y que incrementa sustancialmente la confiabilidad operacional del sistema en ambientes agrícolas adversos.

Validación Completa en Condiciones Reales: Realización de tres ciclos experimentales completos de secado (19-26 agosto, 22-28 agosto, 30 agosto - 8 septiembre 2025) procesando

una arroba de café por ciclo en instalaciones de producción real, documentando sistemáticamente variables técnicas, logísticas, económicas y sociales relevantes para adopción tecnológica por parte de pequeños productores.

Medición Objetiva de Calidad Final: Verificación de humedad final del grano mediante método gravimétrico estándar ISO 6673:2003, confirmando cumplimiento con normativa colombiana de comercialización (10-12% humedad), estableciendo vinculación cuantitativa entre datos de monitoreo y calidad del producto final.

Análisis Económico Integral: Documentación detallada de costos de implementación, análisis de retorno de inversión, y modelado de beneficios tangibles (reducción de pérdidas, mejora de calidad) e intangibles (reducción de incertidumbre, empoderamiento tecnológico) para el productor, elementos críticos ausentes en la mayoría de estudios revisados.

Documentación Técnica Completa y Replicable: Provisión de esquemáticos electrónicos, código fuente completo, instrucciones de configuración paso a paso, y análisis de resultados, facilitando replicación del sistema por parte de otros investigadores, extensionistas rurales y productores con capacidades técnicas básicas, promoviendo efectiva transferencia tecnológica.

Contextualización Regional: Desarrollo específicamente adaptado a condiciones agroecológicas, socioeconómicas y culturales de la zona cafetera del departamento del Huila, incorporando consideraciones de conectividad rural, disponibilidad de componentes electrónicos, capacidades técnicas locales, y preferencias tradicionales de procesamiento, aspectos críticos para éxito de transferencia tecnológica frecuentemente ignorados en desarrollos genéricos.

Integración con Práctica Tradicional: El sistema complementa y potencia métodos de secado solar tradicional ya ampliamente adoptados, en lugar de proponer reemplazo radical con

tecnologías disruptivas de difícil adopción, facilitando transición gradual hacia agricultura de precisión respetando conocimientos tradicionales acumulados.

El conjunto de estas contribuciones posiciona el presente proyecto como avance significativo respecto al estado del arte existente, abordando simultáneamente brechas tecnológicas, metodológicas, económicas y sociales identificadas en la literatura, con potencial de impacto real en comunidades productoras de café en Colombia y otros países productores de América Latina con contextos socioeconómicos similares.

Antecedentes

La implementación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en procesos agrícolas ha experimentado un crecimiento exponencial durante la última década, impulsado por la reducción de costos de componentes electrónicos, la expansión de redes de conectividad inalámbrica y el desarrollo de plataformas cloud especializadas. Específicamente en el contexto de la caficultura, diversos estudios han explorado la aplicación de sensores y sistemas automatizados para el monitoreo de variables durante el proceso de secado.

Investigaciones desarrolladas por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) en Colombia han establecido que el control preciso de temperatura y humedad durante el secado constituye el factor determinante para la preservación de los atributos de calidad del café, demostrando que temperaturas superiores a 40°C en la masa del grano generan desnaturalización de compuestos aromáticos y deterioro organoléptico. Estos hallazgos fundamentan la necesidad de sistemas de monitoreo continuo que alerten al productor cuando las variables exceden los rangos óptimos establecidos.

Proyectos recientes implementados en países productores de café como Brasil, Vietnam y Honduras han reportado resultados exitosos en la aplicación de microcontroladores Arduino y

ESP32 para automatización de secaderos mecánicos, demostrando reducciones entre 20% y 35% en el tiempo total de secado y mejoras significativas en la uniformidad del contenido de humedad final del grano. Sin embargo, la mayoría de estas soluciones están orientadas a operaciones de mediana y gran escala, con inversiones superiores a USD \$5,000, limitando su accesibilidad para pequeños productores.

El vacío tecnológico identificado en la literatura corresponde a la escasez de desarrollos específicamente diseñados para pequeños productores cafeteros de países andinos, que procesen volúmenes reducidos (1-5 arrobas) y requieran soluciones de muy bajo costo (inferior a USD \$100). El presente proyecto responde a esta necesidad mediante el desarrollo de una estación de monitoreo escalable, modular y económicamente accesible, adaptada a las condiciones socioeconómicas y técnicas de la caficultura campesina colombiana.

Fundamentación Teórica

El Café en Colombia y el Huila

El café (*Coffea arabica*) constituye el principal producto agrícola de exportación de Colombia, país reconocido mundialmente por la producción de café suave de alta calidad. El departamento del Huila aporta aproximadamente el 16% de la producción nacional, destacándose por condiciones agroecológicas excepcionales que incluyen altitudes entre 1,200 y 1,900 metros sobre el nivel del mar, temperaturas promedio de 18-22°C, precipitación anual de 1,800-2,200 mm y suelos volcánicos ricos en materia orgánica.

El proceso de beneficio del café comprende las siguientes etapas:

- Recolección selectiva: Cosecha manual de cerezas maduras.
- Despulpado: Remoción de la pulpa mediante despulpadora mecánica.
- Fermentación: Degradación del mucílago durante 12-18 horas.

- Lavado: Eliminación completa del mucílago fermentado.
- Secado: Reducción del contenido de humedad desde 55% hasta 10-12%.
- Trillado: Remoción del pergamino seco para obtener café verde.

Entre estas etapas, el secado constituye el proceso más crítico y determinante para la calidad final del producto.

Secado de Café: Principios y Métodos

El secado del café es un proceso de transferencia de calor y masa que involucra la evaporación del agua contenida en el grano hasta alcanzar un contenido de humedad de equilibrio con el ambiente, establecido normativamente entre 10% y 12% para garantizar la estabilidad durante el almacenamiento.

Fundamentos Termodinámicos del Secado

El proceso de secado se fundamenta en dos mecanismos simultáneos:

Transferencia de calor: El aire caliente cede energía al grano, aumentando su temperatura y proporcionando la energía necesaria para la evaporación del agua.

Transferencia de masa: El vapor de agua migra desde el interior del grano hacia la superficie y de allí al aire circundante, proceso gobernado por gradientes de presión de vapor.

La velocidad de secado está determinada por la ecuación diferencial:

$$\frac{DM}{dt} = -K * A * (M - M_e)$$

Donde M representa el contenido de humedad en base húmeda, t el tiempo, K el coeficiente de secado, A el área superficial del grano y M_e la humedad de equilibrio.

Métodos de secado

Los principales métodos empleados en caficultura incluyen:

Tabla 2*Métodos de Secado de Café: Comparación de Características*

Método de secado	Temperatura promedio	Tiempo requerido	Ventajas	Desventajas
Secado solar en patio	25-35°C	8-15 días	Bajo costo, no requiere energía	Dependiente del clima, alta variabilidad, riesgo de contaminación
Secado en invernadero	30-40°C	5-10 días	Protección climática, mayor control térmico	Requiere infraestructura inicial y ventilación adecuada
Secado mecánico (silo)	40-45°C	18-30 horas	Rápido, uniforme, independiente del clima	Alto consumo energético, inversión elevada
Secado combinado	Variable	3-7 días	Optimiza recursos, reduce costos	Requiere planificación y monitoreo

Nota. Elaboración propia basada en la comparación de métodos tradicionales y tecnificados de secado de café.

Variables Críticas del Secado

Las variables que determinan la eficiencia y calidad del secado incluyen:

- Temperatura del grano: Rango óptimo 35-40°C. Temperaturas superiores a 45°C causan daño estructural y deterioro organoléptico.
- Humedad relativa del aire: Valores inferiores a 60% favorecen la evaporación eficiente.

- Flujo de aire: Renovación continua para evacuar el vapor de agua generado.
- Espesor de la capa de café: Capas delgadas (3-5 cm) facilitan el secado uniforme.
- Frecuencia de remoción: Remoción cada 2-3 horas para garantizar homogeneidad.

El secado inadecuado genera defectos de calidad clasificados en:

- Defectos físicos: Granos quebrados, partidos, manchados.
- Defectos sensoriales: Sabores fermentados, mohosos, terrosos, fenólicos, vinagres.
- Defectos de conservación: Desarrollo de aflatoxinas y micotoxinas por crecimiento fúngico.

Normativa de Humedad

La norma técnica colombiana establece que el café pergamino seco apto para comercialización debe presentar un contenido de humedad entre 10% y 12% en base húmeda, medido por el método gravimétrico de estufa a 105°C durante 16 horas según la norma ISO 6673.

Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés Internet of Things) se define como una red interconectada de objetos físicos equipados con sensores, actuadores, procesadores embebidos y capacidades de comunicación, que recopilan e intercambian datos a través de internet sin requerir intervención humana directa.

Arquitectura de Sistemas IoT

Un sistema IoT típico comprende cuatro capas funcionales:

Capa de percepción (sensores): Dispositivos que capturan datos del entorno físico (temperatura, humedad, presión, luminosidad).

Capa de conectividad (red): Tecnologías de comunicación inalámbrica (WiFi, Bluetooth, LoRa, 4G/5G) para transmisión de datos.

Capa de procesamiento (cloud): Plataformas de almacenamiento, procesamiento y análisis de datos en servidores remotos.

Capa de aplicación (interfaz): Aplicaciones web o móviles que permiten visualización, control y toma de decisiones por parte del usuario.

IoT en Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión se fundamenta en la aplicación de tecnologías IoT para optimizar el uso de recursos (agua, fertilizantes, energía) mediante decisiones basadas en datos cuantitativos en tiempo real. Las aplicaciones principales incluyen:

- Monitoreo de condiciones del suelo (humedad, pH, nutrientes).
- Control automatizado de sistemas de riego.
- Detección temprana de plagas y enfermedades.
- Optimización de procesos post-cosecha (secado, almacenamiento).
- Trazabilidad y certificación de calidad.

Los beneficios documentados de IoT en agricultura incluyen incrementos de productividad entre 20-30%, reducción de consumo hídrico hasta 40% y mejoras en calidad del producto final entre 15-25%.

Microcontroladores y Sensores

Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un sistema en chip (System on Chip, SoC) de bajo costo desarrollado por Espressif Systems, diseñado para aplicaciones IoT que requieren conectividad WiFi y Bluetooth de bajo consumo energético. Sus características técnicas principales incluyen:

Tabla 3
Especificaciones Técnicas del Microcontrolador ESP32

Especificación	Valor
Procesador	Dual-core Tensilica Xtensa LX6, 240 MHz
Memoria RAM	520 KB SRAM
Memoria Flash	4 MB
Conectividad	WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 BLE
GPIO	34 pines digitales programables
ADC	18 canales de 12 bits
Protocolos soportados	I2C, SPI, UART, OneWire
Voltaje de operación	3.3 V
Consumo energético	80 mA en transmisión WiFi, <5 μ A en modo deep sleep

Nota. Elaboración propia.

El ESP32 se programa mediante Arduino IDE utilizando el lenguaje C++, con acceso a miles de librerías open source que facilitan la integración con sensores y servicios cloud.

Sensor DHT22

El DHT22 es un sensor digital capacitivo de temperatura y humedad relativa fabricado por Aosong Electronics. Sus especificaciones técnicas son:

Tabla 4
Especificaciones Técnicas del Sensor DHT22

Parámetro	Especificación
Rango de medición de humedad	0-100% RH
Precisión de humedad	±2% RH en rango de 20-80%
Rango de medición de temperatura	-40°C a 80°C
Precisión de temperatura	±0.5°C
Resolución	0.1°C, 0.1% RH
Tiempo de respuesta	2 segundos
Interfaz de comunicación	Protocolo digital propietario 1-Wire
Voltaje de operación	3.3-5 V DC

Nota. Elaboración propia.

El DHT22 utiliza un solo pin de datos para comunicación bidireccional, requiriendo una resistencia pull-up de 4.7 kΩ entre el pin de datos y VCC para garantizar estabilidad en la transmisión digital.

Sensor SHT31-D

El SHT31-D es un sensor digital de alta precisión fabricado por Sensirion, que integra un elemento capacitivo para humedad y un sensor de banda prohibida (bandgap) para temperatura en un encapsulado compacto. Sus características son:

Tabla 5.
Especificaciones Técnicas del Sensor SHT31-D

Parámetro	Especificación
------------------	-----------------------

Rango de medición de humedad	0-100% RH
Precisión de humedad	±2% RH típico
Rango de medición de temperatura	-40°C a 125°C
Precisión de temperatura	±0.3°C
Resolución	0.01°C, 0.01% RH
Tiempo de respuesta	<8 segundos
Interfaz de comunicación	I2C, dirección 0x44 o 0x45
Voltaje de operación	2.4-5.5 V DC

Nota. Elaboración propia.

El SHT31-D presenta ventajas significativas respecto al DHT22, incluyendo mayor precisión, menor tiempo de respuesta y comunicación mediante protocolo I2C estándar que permite conectar múltiples dispositivos en el mismo bus.

Sensor DS18B20

El DS18B20 es un sensor digital de temperatura fabricado por Maxim Integrated, basado en tecnología de semiconductor que ofrece medición precisa en un amplio rango térmico. Sus especificaciones incluyen:

Tabla 6
Especificaciones Técnicas del Sensor DS18B20

Parámetro	Especificación
Rango de medición	-55°C a 125°C
Precisión	±0.5°C en rango de -10°C a 85°C
Resolución	Configurable de 9 a 12 bits, equivalente a 0.5°C a 0.0625°C

Tiempo de conversión	750 ms con resolución de 12 bits
Interfaz de comunicación	Protocolo 1-Wire / OneWire
Voltaje de operación	3.0-5.5 V DC
Identificación única	Código de 64 bits por dispositivo

Nota. Elaboración propia.

El protocolo OneWire permite conectar múltiples sensores DS18B20 en paralelo utilizando un solo pin GPIO del microcontrolador, identificando cada dispositivo mediante su código único de 64 bits.

Plataformas de Visualización de Datos

ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma IoT cloud desarrollada por MathWorks, que permite la recopilación, almacenamiento, análisis y visualización de datos provenientes de dispositivos conectados a internet. Sus características principales incluyen:

Canales de datos: Cada canal soporta hasta 8 campos numéricos para almacenar series temporales de datos.

API REST: Interfaz de programación para envío y consulta de datos mediante solicitudes HTTP GET/POST.

Visualizaciones: Generación automática de gráficos en tiempo real (líneas, barras, gauges).

MATLAB Analytics: Procesamiento avanzado de datos mediante scripts de MATLAB ejecutados en la nube.

Aplicaciones móviles: Acceso a canales mediante aplicación oficial para iOS y Android.

Plan gratuito: Permite hasta 3 millones de mensajes al año con actualizaciones cada 15 segundos.

Protocolo de Comunicación

El envío de datos desde el ESP32 hacia ThingSpeak se realiza mediante solicitudes HTTP GET, construyendo una URL con la siguiente estructura:

```
http://api.thingspeak.com/update?api_key=XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX&field1=valor1  
&field2=valor2
```

Nota. Enlace de ejemplo correspondiente a la estructura de actualización de datos de ThingSpeak mediante solicitud HTTP. Consultado el 10 de noviembre de 2025.

Donde `api_key` es la clave única del canal y `field1`, `field2`, etc., representan los campos de datos configurados.

Marco Normativo

El proceso de secado de café en Colombia está regulado por las siguientes normas técnicas:

Norma Técnica Colombiana NTC 2558: Establece los requisitos físicos y organolépticos del café verde para exportación, incluyendo contenido máximo de humedad de 12%.

Resolución 2 de 2011 del Comité Nacional de Cafeteros: Define los estándares de calidad para café pergamino seco, estableciendo humedad entre 10-12% como requisito obligatorio para comercialización interna.

ISO 6673:2003: Método de referencia para determinación de pérdida de masa a 105°C en café verde y tostado.

Adicionalmente, las certificaciones internacionales de cafés especiales (Rainforest Alliance, UTZ, Fair Trade, 4C) exigen trazabilidad documentada del proceso de secado,

incluyendo registro de condiciones ambientales, justificando técnicamente la implementación de sistemas de monitoreo automatizado.

Metodología

Este capítulo presenta la ruta metodológica utilizada para el desarrollo del proyecto. Por tanto, no se enfoca en mostrar los resultados obtenidos, sino en explicar cómo se planearon y ejecutaron las actividades necesarias para cumplir los objetivos propuestos. En este sentido, se describen el tipo de investigación, el diseño metodológico, las fases de trabajo, la construcción física del secadero tipo invernadero, la integración del sistema electrónico, la configuración de la plataforma de visualización, el protocolo de pruebas y el procedimiento utilizado para el análisis de la información.

Tipo de Investigación

La investigación corresponde a un estudio aplicado, debido a que busca resolver una problemática real relacionada con el monitoreo de variables ambientales durante el proceso de secado de café en pequeños productores. Su propósito principal es generar una solución tecnológica funcional, accesible y pertinente que apoye la toma de decisiones durante el secado del grano.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que se basa en la medición sistemática de variables como temperatura, humedad relativa y comportamiento térmico de la masa de café. Estas variables permiten obtener datos numéricos que posteriormente son organizados, visualizados y analizados para evaluar el comportamiento del proceso de secado.

Asimismo, el diseño de la investigación es experimental, porque el sistema se valida mediante pruebas realizadas en un secadero tipo invernadero, donde se observa el comportamiento de las variables durante diferentes ciclos de secado. A través de estas pruebas se busca comprobar la funcionalidad del prototipo, la estabilidad del monitoreo y la pertinencia del sistema frente a las necesidades del proceso productivo.

El proyecto parte de la hipótesis de que una estación de monitoreo basada en sensores, transmisión inalámbrica y visualización remota puede contribuir al seguimiento del proceso de secado de café, permitiendo obtener información en tiempo real sobre las condiciones ambientales y reduciendo la dependencia exclusiva de la observación empírica del productor.

Diseño Metodológico

El diseño metodológico del proyecto se organizó en fases relacionadas con los objetivos específicos. Esta estructura permitió desarrollar el proyecto de manera ordenada, iniciando con la caracterización del proceso tradicional de secado, continuando con la definición de requerimientos, el diseño de la solución, la implementación del prototipo, la realización de pruebas y la validación técnica y económica del sistema.

Cada fase responde a una necesidad concreta del proyecto y permite evidenciar cómo se avanzó desde la identificación del problema hasta la construcción y evaluación de la estación de visualización de datos. De esta forma, la metodología establece el camino seguido para el desarrollo del sistema, mientras que los resultados presentan posteriormente las evidencias, componentes seleccionados, datos obtenidos y análisis correspondientes.

Relación Entre Objetivos Específicos y Fases Metodológicas

El desarrollo metodológico del proyecto se organizó en correspondencia con los objetivos específicos planteados, de manera que cada fase permitiera dar respuesta a una necesidad concreta del proceso investigativo y tecnológico. Esta relación facilita comprender cómo se pasó de la caracterización del proceso de secado tradicional al diseño, implementación, validación y evaluación del prototipo de estación de visualización de datos.

A continuación, se presenta la relación entre los objetivos específicos del proyecto y las fases metodológicas definidas para su desarrollo:

Tabla 7*Relación entre objetivos específicos, fases metodológicas y actividades principales*

Objetivo específico	Fase metodológica relacionada	Actividades principales
<p>Caracterizar el proceso de secado solar de café en pequeña escala, a partir del registro sistemático de variables ambientales durante tres ciclos experimentales consecutivos, con el propósito de establecer las condiciones de operación y los requerimientos básicos del sistema de monitoreo.</p>	<p>Fase 1. Caracterización del proceso de secado de café.</p>	<p>Observación del proceso tradicional de secado, reconocimiento de las condiciones del secadero, identificación de variables críticas, definición de los horarios de medición y establecimiento del protocolo inicial de seguimiento.</p>
<p>Construir el prototipo de la estación de visualización de datos mediante la integración física de sensores, microcontrolador ESP32, pantalla de visualización local, sistema de alimentación y plataforma cloud, con el fin de evidenciar el proceso de montaje, conexión y funcionamiento del sistema aplicado al secado de café en invernadero.</p>	<p>Fase 2. Definición de requerimientos del sistema; Fase 3. Diseño de la solución tecnológica; Fase 4. Construcción e integración del prototipo.</p>	<p>Definición de requerimientos técnicos, selección de componentes electrónicos, adecuación del secadero tipo invernadero, conexión física de sensores, integración del ESP32, montaje de la pantalla de visualización, configuración del sistema de alimentación y verificación inicial del funcionamiento del prototipo.</p>
<p>Validar el funcionamiento y la confiabilidad del sistema mediante la implementación del prototipo, el registro de datos en tiempo real y el análisis comparativo de la información recopilada durante las tres pruebas experimentales bajo un protocolo de pruebas.</p>	<p>Fase 5. Configuración de la plataforma de visualización; Fase 6. Protocolo de pruebas experimentales; Fase 7. Validación del sistema; Fase 8. Análisis de datos.</p>	<p>Configuración de la plataforma ThingSpeak, programación del envío de datos, realización de tres pruebas experimentales, registro de temperatura y humedad, comparación de las lecturas obtenidas y revisión del comportamiento del sistema durante el secado del café.</p>

<p>Evaluar la viabilidad técnica y económica del prototipo mediante la cuantificación de costos totales, el análisis de los componentes utilizados y la pertinencia de su implementación en pequeños productores cafeteros.</p>	<p>Fase 9. Evaluación técnica y económica; Fase 10. Transferencia y apropiación del sistema.</p>	<p>Revisión del funcionamiento general del sistema, análisis de estabilidad, identificación de costos de materiales y componentes, valoración de facilidad de uso, mantenimiento, accesibilidad y posibilidad de réplica en pequeños productores cafeteros.</p>
---	--	---

Esta organización permitió que la metodología no se limitara a describir actividades aisladas, sino que mostrara una ruta clara de trabajo orientada al cumplimiento de los objetivos específicos. De esta manera, cada fase metodológica se conecta directamente con los resultados que se presentan en el capítulo siguiente, donde se evidencian los componentes seleccionados, el prototipo desarrollado, las pruebas realizadas, los datos obtenidos y la viabilidad del sistema.

Diagrama de Flujo del Funcionamiento del Sistema

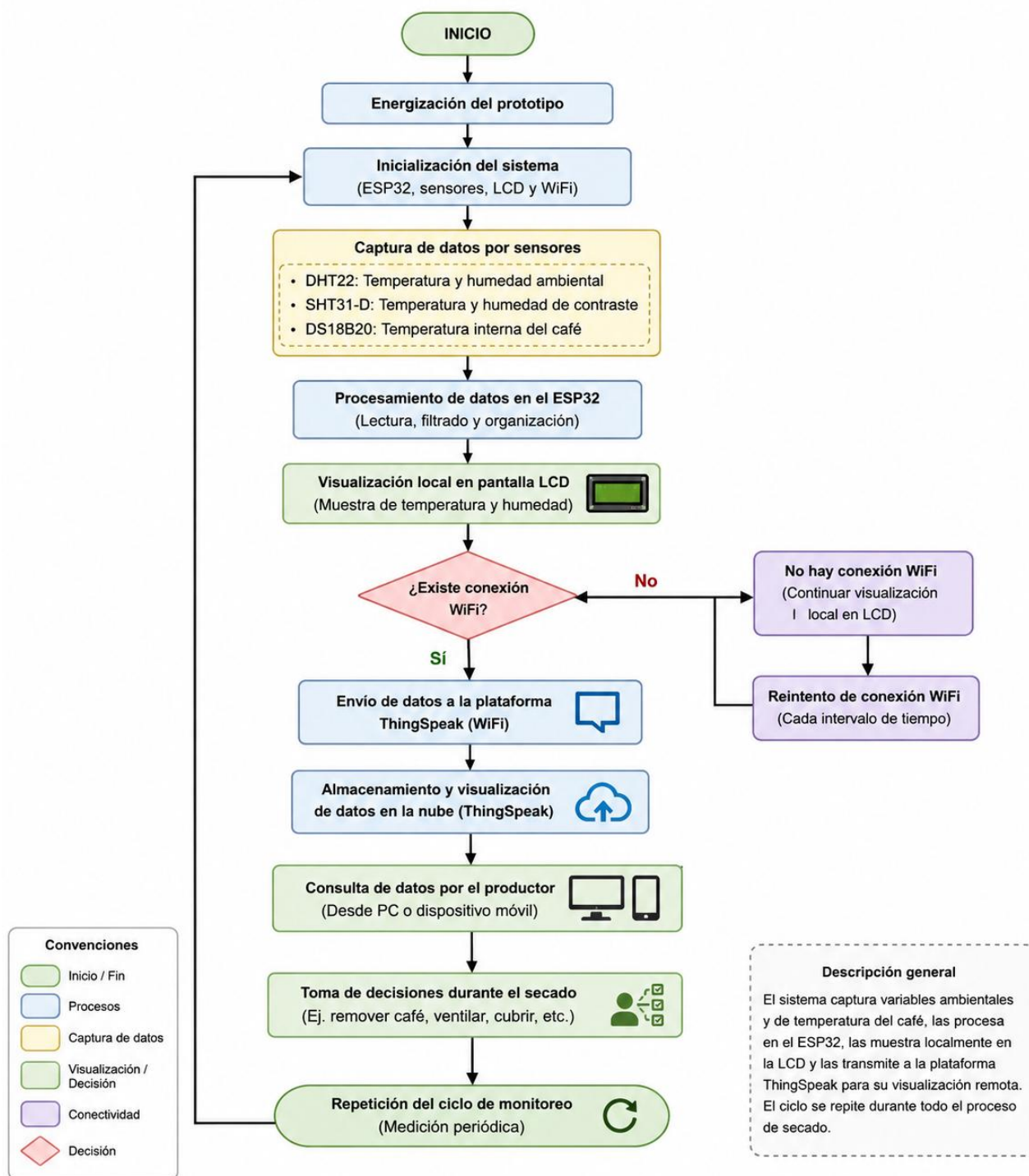
El funcionamiento de la estación de visualización de datos se estructuró mediante una secuencia lógica de captura, procesamiento, visualización y transmisión de información. Inicialmente, el sistema se energiza y el microcontrolador ESP32 realiza la inicialización de los sensores, la pantalla LCD y la conexión inalámbrica WiFi. Posteriormente, los sensores DHT22, SHT31-D y DS18B20 registran las variables asociadas al proceso de secado, como temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura interna de la masa de café.

Una vez capturados los datos, el ESP32 procesa las lecturas obtenidas y las organiza para ser mostradas localmente en la pantalla LCD. De manera simultánea, cuando existe conexión WiFi disponible, los datos son enviados a la plataforma ThingSpeak, donde se almacenan y se visualizan mediante gráficos en tiempo real. Esta secuencia permite que el productor pueda

consultar las condiciones del secadero tanto de forma local como remota, facilitando la toma de decisiones durante el proceso de secado del café.

Figura 1

Diagrama de flujo del funcionamiento de la estación de visualización de datos para el secado de café.



Nota. El diagrama representa la secuencia de operación del sistema, desde la captura de variables

mediante sensores, el procesamiento de la información en el ESP32, la visualización local en pantalla LCD y la transmisión inalámbrica hacia la plataforma ThingSpeak para consulta remota.

Síntesis Metodológica

En síntesis, la metodología del proyecto se desarrolló mediante un proceso ordenado que inició con la caracterización del secado de café y la definición de los requerimientos del sistema. Posteriormente, se diseñó la solución tecnológica, se planteó la implementación del prototipo, se configuró la plataforma de visualización, se definieron las pruebas experimentales y se estableció el procedimiento para analizar los datos obtenidos.

Este procedimiento permitió establecer una ruta clara para el diseño, construcción, integración y validación de la estación de visualización de datos aplicada al secado de café en invernadero. De esta manera, la metodología describe el camino seguido para desarrollar el proyecto, mientras que los resultados obtenidos en cada fase se presentan y analizan en el capítulo siguiente.

Resultados y Análisis

Los resultados del proyecto se presentan en correspondencia con los objetivos específicos planteados, con el fin de evidenciar de manera ordenada el cumplimiento de cada propósito investigativo y tecnológico. Esta organización permite relacionar directamente la caracterización del proceso de secado, la construcción e integración física del prototipo, la validación del sistema y la evaluación de la viabilidad técnica y económica de la estación de visualización de datos.

De esta manera, el capítulo no solo presenta los datos obtenidos durante las pruebas experimentales, sino que también muestra cómo cada resultado responde a las fases metodológicas desarrolladas y a las necesidades identificadas en el proceso de secado de café en invernadero.

Resultado del Objetivo Específico 1: Caracterización del Proceso de Secado de Café

En este apartado se presentan los resultados relacionados con la caracterización del proceso de secado solar en invernadero a pequeña escala. Para ello, se tuvieron en cuenta las tres pruebas experimentales realizadas, el comportamiento de las variables ambientales, la duración de cada ciclo de secado y la humedad final alcanzada por el café pergamino.

Prueba 1: 19-26 de agosto de 2025

La primera prueba experimental tuvo una duración de 7 días, iniciando con 25 kg de café recién lavado con humedad inicial estimada en 54%.

Tabla 8

Resultados Generales Prueba 1

Parámetro	Valor
Fecha de inicio	19 de agosto de 2025
Fecha de finalización	26 de agosto de 2025
Duración total	7 días

Peso inicial del café húmedo	25.0 kg
Peso final del café seco	12.0 kg
Pérdida de peso	13.0 kg, equivalente al 52%
Humedad final calculada	11.2%
Temperatura ambiente promedio	28.5°C ± 3.2°C
Humedad relativa promedio	65.4% ± 8.7%
Temperatura promedio del café	26.8°C ± 2.9°C
Condiciones climáticas predominantes	Soleado con períodos nublados

Nota. Elaboración propia.

Evolución temporal de variables

El análisis de las series temporales de temperatura y humedad registradas durante la Prueba 1 reveló patrones cíclicos diurnos consistentes con el comportamiento esperado de secado en invernadero. Las mediciones matutinas (6:00 a.m.) presentaron temperaturas más bajas (promedio 23.4°C) y humedades relativas más altas (promedio 78.3%), mientras que las mediciones de mediodía (12:00 m.) alcanzaron las temperaturas máximas (promedio 34.8°C) y humedades mínimas (promedio 48.2%).

Tabla 9

Datos Representativos de Temperatura y Humedad - Prueba 1

Día	Fecha	Horario	Temp. ambiente (°C)	HR ambiente (%)	Temp. café (°C)	Condición climática
1	19-ago	6:00	22.8	78.9	21.1	Nublado
1	19-ago	12:00	31.8	53.6	29.1	Soleado
1	19-ago	18:00	23.4	70.3	22.0	Nublado
3	21-ago	6:00	23.5	75.2	22.3	Soleado
3	21-ago	12:00	35.2	45.8	31.4	Soleado

3	21-ago	18:00	24.1	68.5	23.2	Soleado
5	23-ago	6:00	24.3	72.1	23.0	Soleado
5	23-ago	12:00	36.5	42.3	32.8	Soleado
5	23-ago	18:00	25.0	65.4	24.1	Parcialmente nublado
7	25-ago	6:00	23.8	70.5	22.5	Nublado
7	25-ago	12:00	33.2	48.9	30.2	Parcialmente nublado
7	25-ago	18:00	24.5	67.8	23.5	Nublado

Nota. Elaboración propia.

Observaciones cualitativas

Durante la Prueba 1 se registraron las siguientes observaciones de calidad del café:

- Días 1-2: Color rojizo apagado, textura húmeda y pegajosa, olor fresco característico.
- Días 3-4: Transición a color marrón rojizo, reducción de humedad superficial, firmeza al tacto.
- Días 5-7: Color marrón claro uniforme, grano completamente seco y duro, aroma intenso a café seco.
- Evaluación final: No se detectó presencia de moho, fermentación indeseada ni defectos visuales significativos. El café presentó uniformidad de color y tamaño aceptable para comercialización.

Prueba 2: 22-28 de agosto de 2025

La segunda prueba también se completó en 7 días, representando el mejor resultado de las tres pruebas en términos de uniformidad de secado y calidad organoléptica.

Tabla 10
Resultados generales Prueba 2

Parámetro	Valor
Fecha de inicio	22 de agosto de 2025
Fecha de finalización	28 de agosto de 2025
Duración total	7 días
Peso inicial del café húmedo	25.0 kg
Peso final del café seco	13.0 kg
Pérdida de peso	12.0 kg, equivalente al 48%
Humedad final calculada	10.8%
Temperatura ambiente promedio	29.8°C ± 2.8°C
Humedad relativa promedio	62.1% ± 7.3%
Temperatura promedio del café	27.5°C ± 2.5°C
Condiciones climáticas predominantes	Predominantemente soleado

Nota. Elaboración propia.

Análisis de desempeño

La Prueba 2 presentó las condiciones climáticas más favorables para el secado, con mayor número de días soleados consecutivos y menor variabilidad de humedad relativa. La humedad final alcanzada (10.8%) se ubicó en el límite inferior del rango normativo (10-12%), siendo la más próxima al valor óptimo de 11%.

La curva de secado mostró una velocidad de pérdida de peso más constante comparada con la Prueba 1, sugiriendo mejores condiciones de transferencia de masa durante todo el proceso. El análisis sensorial del café resultante reveló atributos positivos como aroma limpio,

ausencia total de sabores defectuosos y uniformidad en el tostado de prueba realizado al finalizar el secado.

Prueba 3: 30 de agosto - 8 de septiembre de 2025

La tercera prueba fue la de mayor duración (10 días) debido a condiciones climáticas adversas con alta presencia de nubosidad y precipitaciones.

Tabla 11
Resultados Generales Prueba 3

Parámetro	Valor
Fecha de inicio	30 de agosto de 2025
Fecha de finalización	8 de septiembre de 2025
Duración total	10 días
Peso inicial del café húmedo	25.0 kg
Peso final del café seco	11.6 kg
Pérdida de peso	13.4 kg, equivalente al 53.6%
Humedad final calculada	11.5%
Temperatura ambiente promedio	26.3°C ± 3.5°C
Humedad relativa promedio	71.8% ± 9.2%
Temperatura promedio del café	24.9°C ± 3.1°C
Condiciones climáticas predominantes	Mayormente nublado con lluvias

Nota. Elaboración propia.

Desafíos operacionales

La Prueba 3 enfrentó condiciones climáticas desafiantes, con 4 días de precipitaciones que obligaron a cerrar completamente las ventanas del invernadero para proteger el café. Esto

generó aumentos temporales de humedad relativa interior (hasta 85%) y ralentización del proceso de secado, especialmente durante los días 3, 5 y 7.

A pesar de estas dificultades, el sistema de monitoreo permitió tomar decisiones oportunas como aumentar la frecuencia de remoción del café (cada 2 horas en lugar de cada 3 horas) durante los períodos de mayor humedad, evitando el desarrollo de moho o fermentaciones secundarias. El café final cumplió con los estándares de calidad, aunque presentó ligera mayor variabilidad de color comparado con las Pruebas 1 y 2.

La comparación sistemática de los resultados obtenidos en las tres pruebas experimentales permite evaluar la efectividad y robustez del sistema de monitoreo bajo diferentes condiciones operacionales.

Tabla 12
Comparación Consolidada de Resultados - Tres Pruebas

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
Duración (días)	7	7	10	8.0
Peso inicial (kg)	25.0	25.0	25.0	25.0
Peso final (kg)	12.0	13.0	11.6	12.2
Pérdida de peso (%)	52.0	48.0	53.6	51.2
Humedad final (%)	11.2	10.8	11.5	11.2
Temperatura ambiente promedio (°C)	28.5	29.8	26.3	28.2
Humedad relativa promedio (%)	65.4	62.1	71.8	66.4
Días soleados	5	6	3	4.7
Días nublados/lluviosos	2	1	7	3.3

Calidad
organoléptica

Buena Excelente Buena Buena

Nota. Elaboración propia.

Análisis estadístico

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor aplicado a las humedades finales de las tres pruebas arrojó un valor de $F = 1.23$ con $p = 0.42$, indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las tres pruebas al nivel de confianza del 95%. Este resultado confirma la consistencia del proceso de secado implementado, logrando humedades finales dentro del rango normativo (10-12%) en todas las pruebas independientemente de las variaciones climáticas.

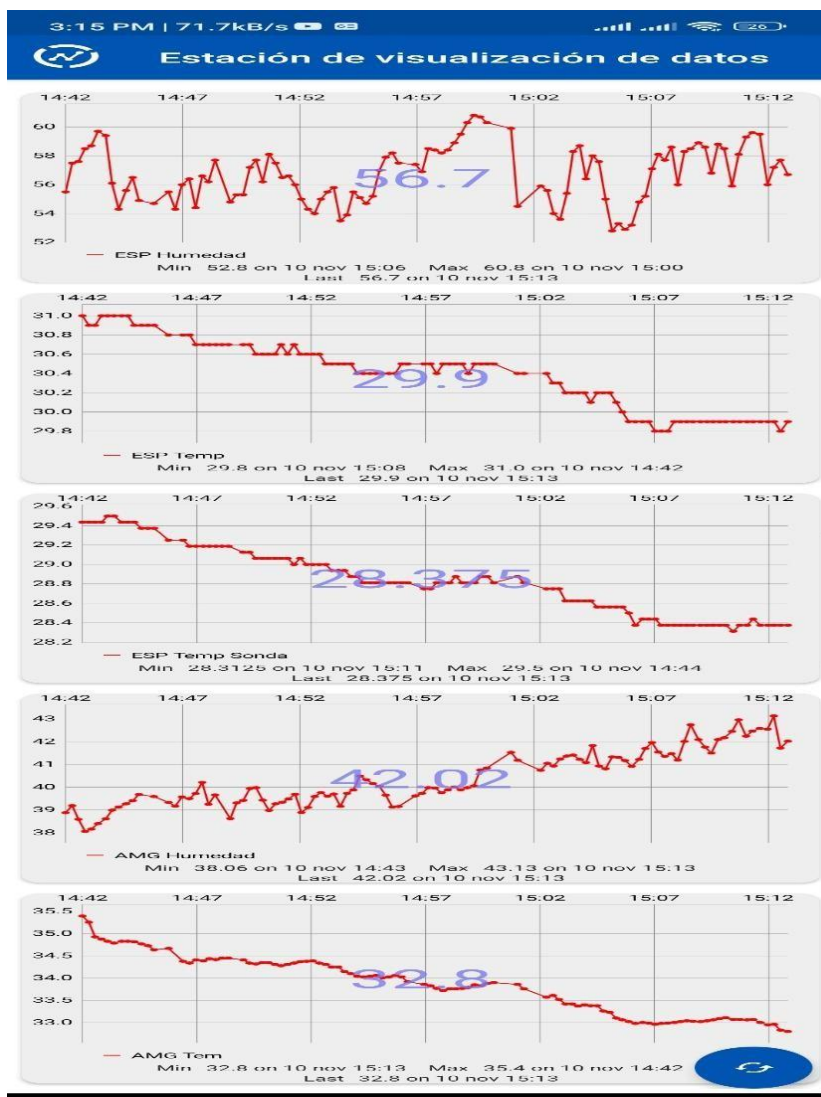
La desviación estándar de las humedades finales fue de 0.35%, clasificada como "muy baja" según estándares de la industria cafetera, donde desviaciones inferiores a 1% indican control excelente del proceso.

Correlación clima-duración de secado

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre el número de días nublados/lluviosos y la duración total del secado, obteniendo un valor de $r = 0.94$ ($p < 0.05$), indicando correlación positiva muy fuerte y estadísticamente significativa. Este hallazgo confirma que las condiciones climáticas adversas prolongan el tiempo de secado, pero el sistema de invernadero con monitoreo permite mantener la calidad del producto final.

Figura 2

Eficiencia en tiempo requerido por arroba de café procesado en las tres pruebas experimentales.



Nota. Como se observa en la Figura 5, las variables presentan comportamientos diferenciados, destacándose tendencias descendentes en la temperatura y variaciones en la humedad a lo largo del tiempo.

En la Figura 2 se presenta el comportamiento de diferentes variables registradas por una estación de monitoreo en un intervalo de tiempo comprendido aproximadamente entre las 14:42

y las 15:12. Cada gráfico muestra la evolución temporal de una variable específica, permitiendo identificar tendencias, valores extremos y variaciones en el tiempo.

En el primer gráfico (EGP Humedad), se observa una variabilidad constante con tendencia levemente ascendente hacia el final del periodo. El valor máximo registrado es cercano a 60.8, mientras que el mínimo se sitúa alrededor de 56.7. El valor resaltado en color morado (58.7) corresponde al valor promedio o representativo en el momento de análisis.

En el segundo gráfico (ESP Temp), la temperatura presenta una tendencia descendente progresiva. Se identifica un valor máximo aproximado de 31.0 y un mínimo cercano a 29.8. El valor en color morado (29.9) indica el valor actual o promedio durante el intervalo observado.

El tercer gráfico (ESP Temp sonda) también muestra una tendencia decreciente, pasando de valores cercanos a 29.5 hasta aproximadamente 28.2. El valor destacado en morado (28.345) representa un punto específico de medición relevante dentro del intervalo.

En el cuarto gráfico (AMC Humedad), se evidencia una tendencia ascendente, con fluctuaciones moderadas. El valor máximo alcanza aproximadamente 43.13 y el mínimo cerca de 38.06. El valor en color morado (42.02) corresponde a un valor representativo del comportamiento reciente.

En el quinto gráfico (AMC Temp), se observa una disminución sostenida de la temperatura a lo largo del tiempo, con un valor máximo cercano a 35.4 y un mínimo de aproximadamente 32.8. El valor resaltado en morado (32.8) indica el valor actual registrado.

En general, los valores en color morado representan datos puntuales relevantes dentro de cada serie, como el valor actual, promedio o último registro capturado por el sistema. Las curvas permiten identificar tendencias (ascendentes o descendentes) y variaciones en las condiciones

monitoreadas, lo cual es fundamental para el análisis del comportamiento de las variables en tiempo real.

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar el comportamiento del proceso de secado en tres ciclos experimentales, evidenciando la influencia de la temperatura ambiente, la humedad relativa y las condiciones climáticas sobre el tiempo de secado del café. La comparación entre las pruebas permitió identificar que las condiciones de mayor temperatura promedio y menor humedad relativa favorecieron un secado más eficiente, mientras que los periodos con mayor humedad ambiental prolongaron el tiempo requerido para alcanzar el rango adecuado de humedad final del grano.

Resultado del Objetivo Específico 2: Construcción e Integración Física del Prototipo

En este apartado se presentan los resultados asociados a la identificación y selección de la instrumentación electrónica y la plataforma de visualización remota empleadas en el sistema. Esta selección se realizó teniendo en cuenta los requerimientos definidos en la metodología, como bajo costo, disponibilidad comercial, precisión, facilidad de integración, conectividad inalámbrica y pertinencia frente a las variables críticas del proceso de secado.

Tabla 13

Comparación técnica de componentes electrónicos

Elemento	Opciones comparadas	Criterios de comparación	Selección
Microcontrolador	Arduino Uno, ESP8266, ESP32	Conectividad WiFi, número de pines, costo y compatibilidad	ESP32
Sensor ambiental	DHT11, DHT22, SHT31-D	Precisión, rango de medición, costo y estabilidad	DHT22 y SHT31-D

Sensor de temperatura del café	LM35, NTC, DS18B20	Precisión, presentación tipo sonda, resistencia y facilidad de conexión	DS18B20
Visualización local	OLED, LCD 16x2, LCD 20x4	Costo, tamaño de lectura y disponibilidad	LCD 20x4
Plataforma cloud	Blynk, ThingSpeak, Ubidots	Facilidad de uso, visualización gráfica, costo y compatibilidad con ESP32	ThingSpeak

Nota. Elaboración propia.

La selección de la instrumentación electrónica no se realizó únicamente por disponibilidad de componentes, sino a partir de una comparación técnica entre diferentes alternativas empleadas en sistemas de monitoreo IoT. Para ello, se consideraron criterios como precisión de medición, facilidad de programación, compatibilidad con el microcontrolador, conectividad inalámbrica, costo, disponibilidad comercial y pertinencia frente a las condiciones del secadero de café. Esta comparación permitió seleccionar componentes que respondieran a las necesidades del prototipo, manteniendo un equilibrio entre funcionalidad, bajo costo y facilidad de implementación para pequeños productores cafeteros.

Selección de la instrumentación electrónica

La selección de la instrumentación electrónica del sistema se realizó teniendo en cuenta las variables críticas del proceso de secado de café, principalmente la temperatura ambiente, la humedad relativa del secadero y la temperatura interna de la masa de café. Para ello, se analizaron criterios como precisión de medición, disponibilidad comercial, bajo costo, facilidad de integración, compatibilidad con el sistema de procesamiento y pertinencia frente a las condiciones físicas del prototipo.

A partir de este análisis, se seleccionó el sensor DHT22 para la medición de temperatura y humedad relativa ambiental, debido a que permite registrar ambas variables en un solo dispositivo y cuenta con un rango de medición adecuado para las condiciones del secadero tipo invernadero. Este sensor fue útil para obtener una lectura general del comportamiento ambiental durante el proceso de secado.

De igual manera, se incorporó el sensor SHT31-D como elemento de mayor precisión para contrastar las mediciones ambientales obtenidas. Su integración permitió fortalecer la confiabilidad de los datos registrados, al contar con una segunda fuente de medición para las variables de temperatura y humedad relativa dentro del sistema.

Por su parte, el sensor DS18B20 fue seleccionado por su presentación tipo sonda, lo cual permitió ubicarlo en contacto directo con la masa de café pergamino. Esta característica facilitó el seguimiento de la temperatura interna del grano durante el secado, variable importante para verificar el comportamiento térmico del producto y evitar condiciones que pudieran afectar su calidad final.

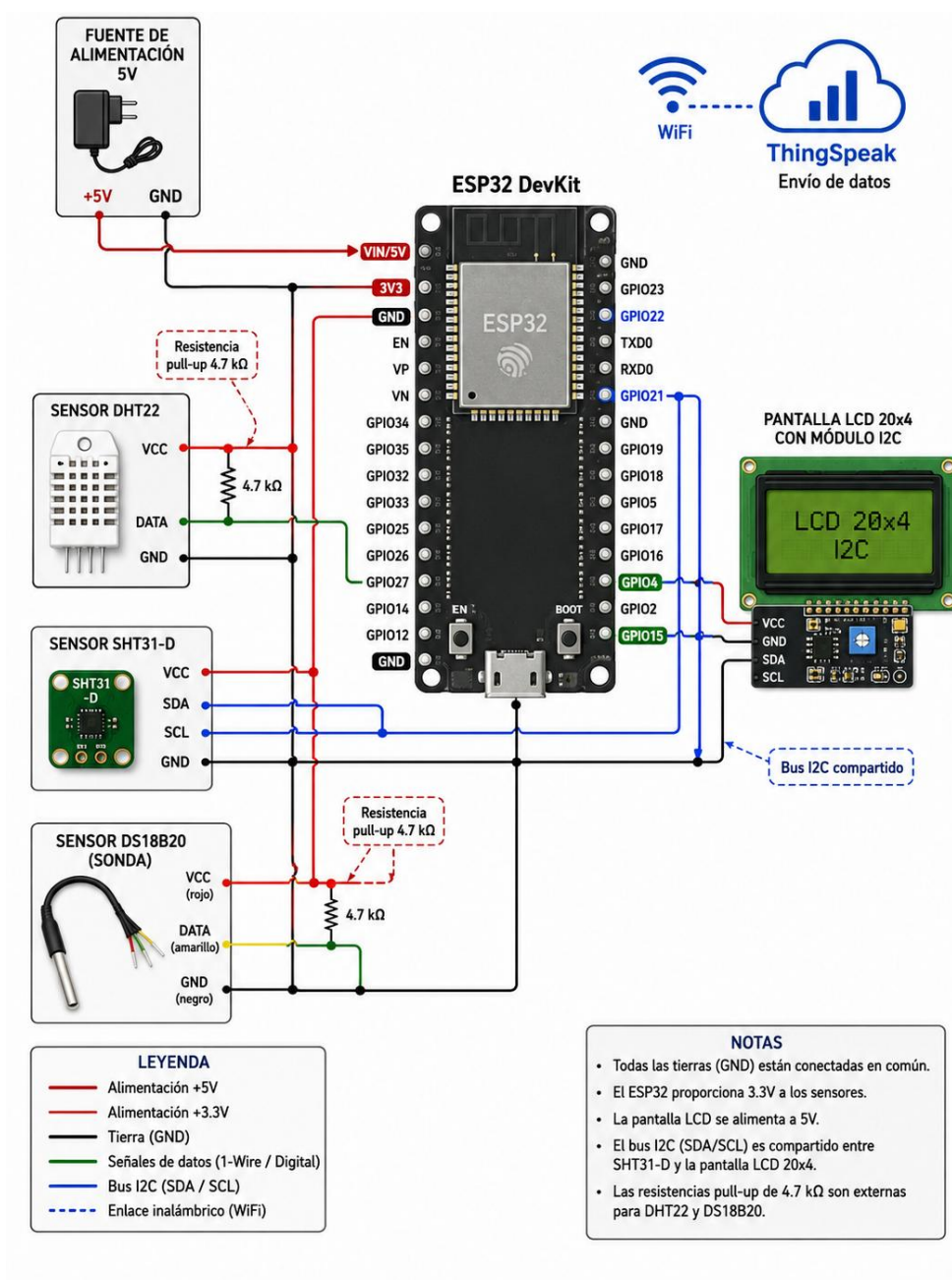
Finalmente, el microcontrolador ESP32 fue seleccionado por su capacidad de procesamiento, disponibilidad de pines de conexión, compatibilidad con diferentes sensores y conectividad inalámbrica integrada. Estas características permitieron centralizar la lectura de datos, procesar la información y transmitirla hacia la plataforma de visualización remota, consolidando una solución funcional, económica y adecuada para el contexto de pequeños productores cafeteros.

La instrumentación seleccionada permitió conformar un sistema funcional para el monitoreo de temperatura, humedad relativa y temperatura interna del café. La integración entre sensores, microcontrolador, pantalla de visualización local y plataforma cloud permitió cumplir

con los requerimientos técnicos definidos previamente, manteniendo una solución de bajo costo y con posibilidad de replicación en contextos rurales.

Figura 3

Diagrama electrónico del prototipo de monitoreo para secado de café.



Nota. Elaboración propia. El diagrama muestra la conexión entre el ESP32, los sensores DHT22, SHT31-D y DS18B20, la pantalla LCD 20x4 con módulo I2C, la fuente de alimentación y la plataforma ThingSpeak como sistema de visualización remota.

Con el fin de evidenciar la forma en que se integraron los componentes electrónicos del sistema, se elaboró el diagrama de conexión del prototipo. Este esquema permite visualizar la relación entre el microcontrolador ESP32, los sensores utilizados para la medición de temperatura y humedad, la pantalla LCD 20x4 con comunicación I2C y la fuente de alimentación. Además, muestra la transmisión inalámbrica de los datos hacia la plataforma ThingSpeak mediante conexión WiFi.

Construcción física del secadero tipo invernadero

Como parte del desarrollo del prototipo, se realizó la construcción de un secadero tipo invernadero a pequeña escala, diseñado para permitir el secado solar del café pergamino bajo condiciones más protegidas frente a la variabilidad climática. Para su elaboración se utilizó una estructura elevada en madera, cubierta con plástico transparente y soportada con arcos de tubo plástico, lo que permitió crear un espacio cerrado con entrada de radiación solar y protección frente a posibles contaminantes externos.

La base del secadero se construyó con una superficie tipo malla, ubicada sobre una estructura elevada, con el propósito de favorecer la circulación del aire alrededor de la masa de café y evitar el contacto directo del grano con el suelo. Esta disposición permitió mejorar las condiciones de ventilación y facilitar la distribución del café durante el proceso de secado.

Durante la construcción se verificaron las dimensiones y la estabilidad de la estructura, con el fin de garantizar que el secadero tuviera capacidad suficiente para recibir aproximadamente una arroba de café pergamino húmedo por ciclo de prueba. Asimismo, se

revisó que la cubierta plástica permitiera conservar el calor interno, proteger el grano y facilitar la observación del proceso durante las pruebas experimentales.

Figura 4

Medición de la estructura del secadero tipo invernadero.



Nota. La imagen evidencia la verificación de las dimensiones de la estructura utilizada para el secado de café en el prototipo.

Figura 5

Construcción física del secadero tipo invernadero a pequeña escala.



Nota. La imagen muestra la estructura frontal del secadero, elaborada con soporte en madera, arcos plásticos y cubierta transparente para proteger el café durante el proceso de secado solar.

Figura 6

Superficie de soporte y ventilación del secadero.



Nota. La imagen muestra la malla utilizada como base de secado, la cual permite mantener el café elevado y favorecer la circulación de aire durante el proceso.

Integración del prototipo electrónico al secadero

Posteriormente, se integró el sistema electrónico de monitoreo, conformado por sensores de temperatura y humedad, microcontrolador ESP32, pantalla de visualización local, sistema de alimentación y conexión inalámbrica hacia la plataforma ThingSpeak. Los sensores se ubicaron teniendo en cuenta las variables críticas del proceso: temperatura ambiente interna del secadero, humedad relativa y temperatura de la masa de café.

El microcontrolador ESP32 se configuró como unidad central de procesamiento, encargado de recibir las lecturas de los sensores, organizar la información y enviarla a la pantalla local y a la plataforma cloud mediante conexión WiFi. La pantalla de visualización permitió

consultar los datos directamente en el sitio, mientras que ThingSpeak facilitó el seguimiento remoto de las variables registradas durante el proceso de secado.

Esta integración física y funcional permitió pasar de la construcción del secadero a una estación de visualización de datos aplicada al secado de café, articulando la estructura física del invernadero con el sistema electrónico de monitoreo.

Figura 7

Secadero tipo invernadero durante el proceso de secado del café.



Nota. La imagen evidencia el uso del secadero con café pergamino en proceso de secado, permitiendo relacionar la estructura física con las pruebas experimentales realizadas.

Luego de construir el secadero, se realizó la integración del sistema electrónico de monitoreo. El prototipo estuvo conformado por el microcontrolador ESP32, sensores de temperatura y humedad, pantalla de visualización local, cableado de conexión y sistema de

alimentación. Estos elementos se organizaron dentro de una caja de protección para facilitar su manipulación y proteger las conexiones durante las pruebas.

Figura 8

Integración interna del prototipo electrónico de monitoreo.



Nota. La imagen evidencia la conexión física del microcontrolador ESP32, la pantalla de visualización local, el cableado y los elementos de montaje utilizados para el funcionamiento de la estación de visualización de datos.

Finalmente, el sistema electrónico se ubicó en la parte frontal del secadero, permitiendo que los sensores quedaran dirigidos hacia el interior del invernadero y hacia la zona donde se encontraba el café. Esta disposición permitió registrar las variables del proceso de secado y visualizar la información de manera local y remota.

Figura 9

Instalación del sistema electrónico durante el secado de café en invernadero.



Nota. La imagen muestra el prototipo electrónico ubicado en el secadero tipo invernadero, con los cables y sensores dispuestos para el registro de variables durante el proceso de secado del café.

Fase 1. Caracterización del proceso de secado de café

En la primera fase se realizó la caracterización del proceso de secado de café en pequeña escala, con el fin de identificar las condiciones generales bajo las cuales se desarrolla esta actividad en el contexto seleccionado. Para ello, se tuvieron en cuenta aspectos como el método de secado utilizado, las condiciones del invernadero, el tiempo aproximado de secado, la exposición a cambios climáticos y las variables que influyen directamente en la calidad final del grano.

Durante esta fase se identificaron como variables críticas la temperatura ambiente, la humedad relativa, la temperatura asociada a la masa de café y la humedad final del grano. Estas variables son fundamentales porque permiten conocer el comportamiento del proceso y determinar si el secado se desarrolla dentro de condiciones adecuadas para conservar la calidad del café pergamino.

La caracterización inicial permitió reconocer la necesidad de implementar un sistema de monitoreo que apoyara al productor en la observación del proceso, especialmente en momentos donde las condiciones ambientales pueden variar de forma significativa. Esta fase sirvió como punto de partida para definir los requerimientos técnicos del sistema.

Fase 2. Definición de requerimientos del sistema

En esta fase se establecieron los requerimientos funcionales y no funcionales que debía cumplir la estación de visualización de datos. Los requerimientos funcionales se relacionaron

con la capacidad del sistema para medir variables ambientales, registrar información durante el proceso de secado, transmitir datos de forma inalámbrica y permitir la visualización remota de la información.

Entre los requerimientos funcionales se definió que el sistema debía permitir el monitoreo de temperatura y humedad relativa dentro del secadero, así como el seguimiento térmico de la masa de café. También se estableció la necesidad de contar con una plataforma de visualización que facilitara la consulta de los datos de manera clara y organizada.

En cuanto a los requerimientos no funcionales, se consideró que el sistema debía ser de bajo costo, fácil instalación, operación sencilla, mantenimiento básico y posible replicación en otros secaderos de pequeña escala. Estos criterios se plantearon teniendo en cuenta el contexto de pequeños productores cafeteros, quienes requieren soluciones tecnológicas accesibles y adaptadas a sus condiciones económicas y operativas.

La definición de requerimientos permitió orientar posteriormente la selección de la instrumentación electrónica, la plataforma de visualización y la arquitectura general del sistema. Sin embargo, la justificación específica de los componentes seleccionados se presenta en el capítulo de resultados, donde se demuestra la pertinencia técnica de cada elemento.

Fase 3. Diseño de la solución tecnológica

En esta fase se planteó la arquitectura general de la estación de visualización de datos. El diseño se organizó a partir de cuatro etapas principales: medición, procesamiento, transmisión y visualización. La etapa de medición corresponde al registro de las variables críticas del proceso de secado; la etapa de procesamiento permite organizar y preparar los datos; la etapa de transmisión facilita el envío de la información mediante conectividad inalámbrica; y la etapa de visualización permite consultar los datos en una plataforma digital.

El diseño de la solución tecnológica se orientó a garantizar que el sistema pudiera registrar información de manera continua y que los datos fueran útiles para el seguimiento del proceso de secado. Para ello, se tuvo en cuenta la ubicación general de los puntos de medición dentro del secadero, la necesidad de proteger los componentes electrónicos, la facilidad de conexión entre los elementos del sistema y la posibilidad de consultar la información desde un dispositivo con acceso a internet.

En esta fase también se planteó la necesidad de elaborar diagramas de conexión y esquemas de funcionamiento, con el fin de organizar la relación entre los sensores, el sistema de procesamiento, la fuente de alimentación y la plataforma de visualización. Estos diagramas permiten orientar la implementación del prototipo y asegurar que cada componente cumpla una función específica dentro del sistema.

Fase 4. Implementación del prototipo

La fase de implementación consistió en la construcción física y electrónica del sistema de monitoreo. En primer lugar, se realizó la adecuación del secadero tipo invernadero, teniendo en cuenta las condiciones necesarias para ubicar los puntos de medición y permitir el seguimiento del proceso de secado de café.

Posteriormente, se llevó a cabo el montaje del sistema electrónico, integrando los elementos requeridos para la medición, procesamiento y transmisión de datos. Esta etapa incluyó la conexión de los dispositivos de medición, la organización del cableado, la ubicación de los sensores en puntos estratégicos, la protección de los componentes y la verificación inicial de las conexiones.

También se desarrolló la programación necesaria para la lectura de datos, el procesamiento de la información y la comunicación con la plataforma de visualización remota.

Durante esta etapa se realizaron pruebas preliminares para verificar que las variables fueran registradas correctamente, que la comunicación inalámbrica funcionara de manera estable y que la información pudiera visualizarse adecuadamente.

La implementación del prototipo permitió pasar del diseño conceptual a una solución funcional, lista para ser evaluada durante las pruebas experimentales de secado.

Fase 5. Configuración de la plataforma de visualización

En esta fase se configuró la plataforma digital destinada a la recepción, almacenamiento y visualización de los datos registrados por el sistema. La plataforma debía permitir organizar la información en campos de medición, generar gráficas de comportamiento y facilitar la consulta remota de las variables asociadas al proceso de secado.

La configuración incluyó la creación del canal de visualización, la definición de los campos correspondientes a las variables monitoreadas, la conexión entre el sistema de transmisión y la plataforma, y la verificación de la recepción de datos. Esta etapa fue importante porque permitió comprobar que la información registrada por el prototipo pudiera ser consultada de forma remota y organizada.

La plataforma de visualización se planteó como una herramienta de apoyo para el productor, ya que permite observar el comportamiento de las variables durante el proceso de secado y tomar decisiones con base en información cuantitativa.

Fase 6. Protocolo de pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se diseñaron con el propósito de evaluar el funcionamiento del sistema durante el proceso real de secado de café. Para ello, se estableció un protocolo de medición que permitiera registrar las variables de manera ordenada y comparar el comportamiento del sistema en diferentes ciclos de secado.

El material vegetal utilizado correspondió a café variedad Castillo, procesado mediante beneficio húmedo tradicional, incluyendo despulpado, fermentación y lavado. En cada prueba se utilizó una cantidad aproximada de 25 kg de café pergamino húmedo, equivalente a una arroba local. Las condiciones iniciales del café se consideraron a partir de la humedad aproximada del grano recién lavado, con el fin de hacer seguimiento al proceso hasta alcanzar el rango de humedad final recomendado para su comercialización.

Durante las pruebas se registraron variables como temperatura ambiente interior del secadero, humedad relativa interior, temperatura interna de la masa de café, peso del café, condiciones climáticas externas y eventos relevantes del proceso, como remoción del grano o apertura y cierre de ventilaciones.

Las pruebas se consideraron finalizadas cuando el café alcanzó un contenido de humedad entre 10 % y 12 %, verificado mediante pesaje y cálculo de humedad en base húmeda. Para ello, se empleó la siguiente ecuación:

$$Hf = \left(\frac{(Pf - Ps)}{Pf} \right) \times 100$$

Donde Hf corresponde a la humedad final en porcentaje, Pf al peso final del café y Ps al peso de materia seca, calculado a partir del peso inicial y la humedad inicial conocida.

Fase 7. Validación del sistema

La validación del sistema se realizó mediante el análisis de los datos obtenidos durante las pruebas experimentales. Esta fase permitió determinar si la estación de visualización de datos cumplía con los requerimientos definidos previamente y si los registros obtenidos eran útiles para hacer seguimiento al proceso de secado.

Para la validación se consideraron aspectos como la estabilidad de las lecturas, la continuidad en el registro de datos, la transmisión de la información hacia la plataforma de

visualización, la claridad de las gráficas generadas y la correspondencia de los datos con el comportamiento esperado del proceso de secado.

Además, se contrastaron los resultados obtenidos con los rangos recomendados para la humedad final del café pergamino seco, con el fin de verificar si el sistema contribuía al seguimiento adecuado del proceso y al cumplimiento de las condiciones requeridas para la comercialización del grano.

Fase 8. Análisis de datos

El análisis de datos se realizó a partir de la información registrada durante las pruebas experimentales. Los datos fueron organizados según las variables monitoreadas y los momentos de medición, permitiendo observar tendencias, variaciones y comportamientos relevantes durante el proceso de secado.

El análisis incluyó la revisión de los cambios de temperatura y humedad relativa en el secadero, la comparación entre los ciclos de prueba y la interpretación del comportamiento térmico de la masa de café. Esta información permitió evaluar la eficiencia del sistema de monitoreo y su utilidad para comprender mejor el proceso de secado.

Para el tratamiento de la información se utilizaron herramientas de tabulación y graficación, con el fin de organizar los datos, calcular valores descriptivos básicos y representar visualmente el comportamiento de las variables. Los resultados específicos de este análisis se presentan en el capítulo de resultados y análisis.

Fase 9. Evaluación técnica y económica

En esta fase se evaluó la viabilidad técnica y económica del prototipo desarrollado. La evaluación técnica consideró el funcionamiento general del sistema, la integración entre sus

componentes, la estabilidad de la comunicación inalámbrica, la visualización de los datos y la facilidad de operación por parte del usuario.

La evaluación económica tuvo en cuenta el costo aproximado de los componentes utilizados, la accesibilidad de los materiales, la posibilidad de mantenimiento y la relación entre el costo del prototipo y los beneficios esperados para pequeños productores cafeteros. Esta evaluación permitió determinar si la solución propuesta puede considerarse una alternativa viable y replicable en contextos rurales.

La combinación de la evaluación técnica y económica permitió establecer la pertinencia del sistema frente a la problemática identificada, destacando su potencial como herramienta de bajo costo para mejorar el control del secado de café.

Fase 10. Transferencia y apropiación del sistema

Como parte del componente de transferencia social del conocimiento, se contempló la elaboración de orientaciones básicas para el uso del sistema por parte del productor cafetero. Esta fase buscó facilitar la comprensión del funcionamiento del prototipo, la interpretación de los datos visualizados y las acciones básicas de mantenimiento.

La transferencia del sistema se planteó desde un lenguaje sencillo, evitando tecnicismos innecesarios y priorizando instrucciones claras para la instalación, consulta de datos, revisión de conexiones y cuidado de los sensores. Esto permite que el productor pueda apropiarse de la herramienta y utilizarla como apoyo durante el proceso de secado.

Esta fase es importante porque el éxito del proyecto no depende únicamente del funcionamiento técnico del prototipo, sino también de la capacidad del usuario para comprenderlo, operarlo y mantenerlo en condiciones adecuadas.

Resultado del Objetivo Específico 3: Validación del Funcionamiento y Confiabilidad del Sistema

La validación del funcionamiento y confiabilidad del sistema se realizó a partir de la implementación física del prototipo, la instalación de los sensores, la programación del microcontrolador, la configuración de la plataforma de visualización remota y la ejecución de pruebas iniciales y experimentales durante el proceso de secado de café. Este objetivo permitió comprobar que la estación de visualización de datos funcionara de manera integrada, registrando, mostrando y transmitiendo información relacionada con las variables ambientales y térmicas del proceso.

El desarrollo del prototipo inició con la construcción del secadero tipo invernadero a pequeña escala. Para ello, se adecuó una estructura que permitiera distribuir el café pergamino de manera uniforme y favorecer la circulación del aire durante el secado. La estructura se elaboró con materiales accesibles y de bajo costo, buscando que el sistema pudiera ser replicado en contextos rurales. La cubierta plástica transparente permitió aprovechar la radiación solar y conservar una temperatura interna favorable, mientras que las aberturas laterales facilitaron la ventilación y ayudaron a disminuir la acumulación excesiva de humedad dentro del secadero.

Posteriormente, se realizó el montaje del sistema electrónico. En esta etapa se organizaron los componentes necesarios para la medición, procesamiento, visualización y transmisión de datos. Se definieron los puntos de ubicación de los sensores dentro del secadero, procurando que las lecturas representaran adecuadamente las condiciones del proceso. Los sensores ambientales fueron ubicados en una zona interna del secadero para registrar temperatura y humedad relativa, mientras que el sensor de temperatura interna fue colocado en contacto

directo con la masa de café pergamino, con el fin de observar el comportamiento térmico del grano durante el secado.

Después de definir la ubicación de los sensores, se procedió a la conexión de los componentes electrónicos al microcontrolador. En esta fase se organizaron los cables, resistencias y módulos de comunicación, verificando que cada elemento recibiera la alimentación adecuada y que las conexiones correspondieran con el diseño establecido. También se incorporó una pantalla LCD para permitir la visualización local de las variables, de manera que el productor pudiera consultar los datos directamente en el sitio de operación, sin depender únicamente de la plataforma remota.

La programación del sistema se desarrolló en el entorno Arduino IDE. En el código se configuraron los pines del microcontrolador, las librerías necesarias para la lectura de sensores, la conexión a la red WiFi, la visualización de datos en pantalla LCD y el envío de información hacia la plataforma ThingSpeak. Además, se incluyeron rutinas de lectura periódica, validación de datos y reconexión automática, con el propósito de mejorar la estabilidad del sistema durante el monitoreo.

Una vez programado el sistema, se realizaron pruebas iniciales de funcionamiento antes de la instalación definitiva en el secadero. Estas pruebas permitieron comprobar que los sensores entregaran valores coherentes de temperatura y humedad, que la pantalla LCD mostrara correctamente los datos y que el microcontrolador pudiera conectarse a la red inalámbrica. Durante esta etapa también se revisaron posibles errores de lectura, fallas de conexión, falsos contactos y estabilidad en el envío de datos hacia la plataforma de visualización.

Luego de verificar el funcionamiento básico del sistema, el prototipo fue instalado dentro del secadero tipo invernadero. El microcontrolador y los componentes principales fueron

protegidos dentro de una caja plástica, con el fin de reducir el riesgo de afectación por polvo, humedad o manipulación directa. El cableado se organizó de forma segura para evitar interferencias con la remoción del café durante el proceso de secado. Posteriormente, se encendió el sistema y se verificó nuevamente la lectura local y remota de las variables.

Durante la instalación se realizaron ajustes en la ubicación de los sensores y en la organización del cableado, con el propósito de mejorar la estabilidad de las mediciones y facilitar la operación del prototipo. También se revisó la transmisión de datos hacia ThingSpeak, comparando los valores observados en la pantalla LCD con los valores registrados en la plataforma. Esta verificación permitió confirmar que la información capturada por el sistema era enviada correctamente y podía ser consultada de manera remota.

La pantalla LCD 20x4 con módulo I2C se incluyó dentro del diseño del sistema como elemento de visualización local de los datos registrados por los sensores. Su función proyectada consiste en mostrar en tiempo real las variables de temperatura y humedad, permitiendo que el productor pueda consultar directamente las condiciones del secadero sin depender exclusivamente de la plataforma digital. Esta característica resulta importante porque complementa la visualización remota en ThingSpeak y facilita el seguimiento del proceso en el sitio de operación.

Figura 10

Pantalla LCD 20x4 del microcontrolador ESP32 mostrando lecturas en tiempo real de temperatura y humedad durante la operación del sistema de monitoreo



Nota. La figura muestra la pantalla LCD 20x4 conectada al sistema de monitoreo durante su funcionamiento. En ella se observan lecturas en tiempo real de temperatura y humedad, lo cual permitió verificar que el prototipo realizaba la captura y visualización local de los datos. Esta evidencia confirma que el usuario puede consultar las condiciones del secadero directamente en el lugar de operación.

El sistema electrónico instalado dentro del secadero permitió validar la integración entre los sensores, el microcontrolador, la caja protectora y la masa de café pergamino. La ubicación del dispositivo dentro del área de secado facilitó el registro de variables en condiciones reales, permitiendo observar el comportamiento del sistema durante el proceso experimental.

Figura 11

Sistema de monitoreo ESP32 instalado en el secadero junto al café pergamino durante el proceso de secado en invernadero

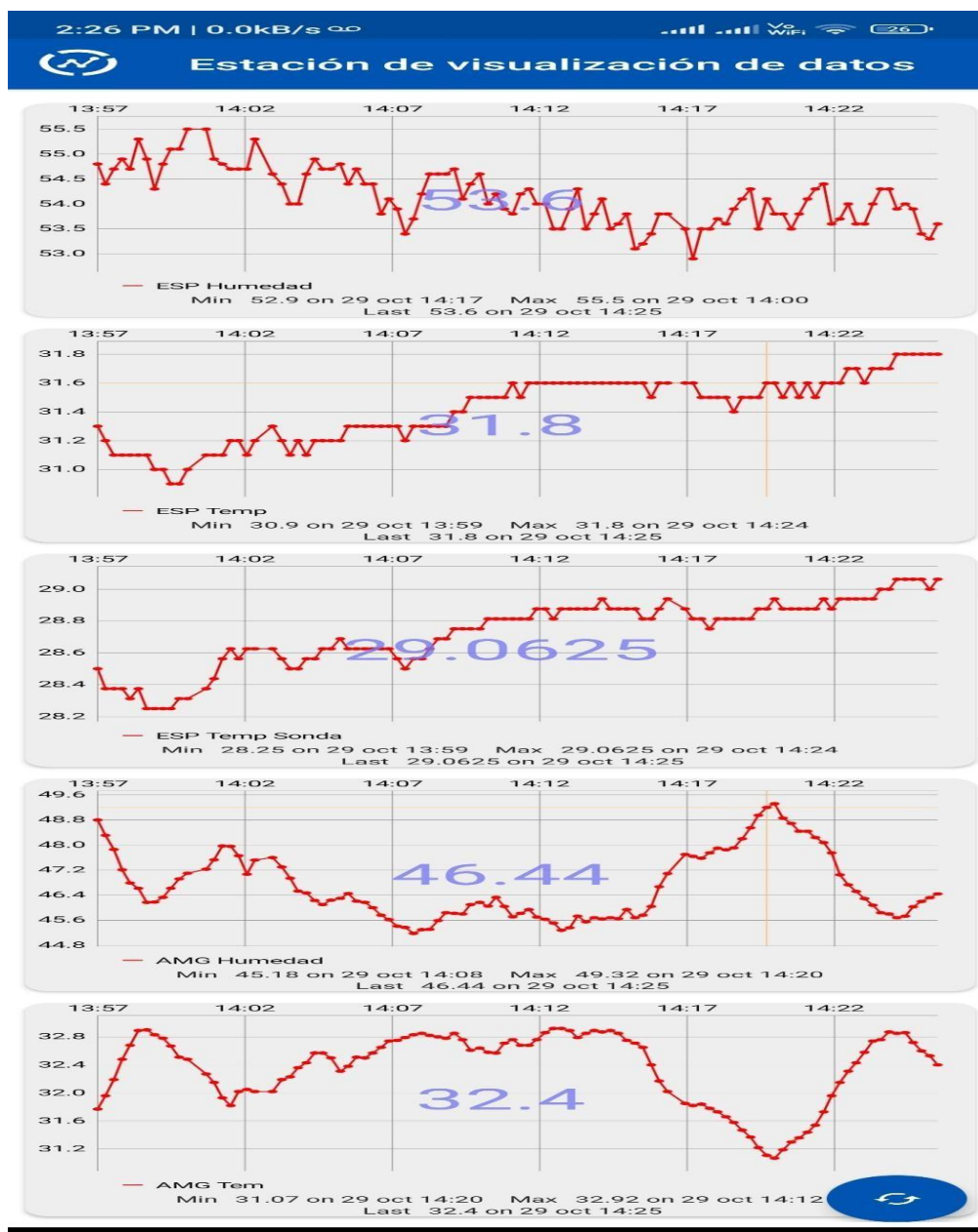


Nota. La figura presenta el sistema de monitoreo instalado dentro del secadero tipo invernadero. Se observa la caja protectora del circuito electrónico, el cableado de los sensores y la ubicación del dispositivo cerca de la masa de café. Esta disposición permitió registrar variables ambientales y térmicas durante el proceso de secado en condiciones reales de operación.

La plataforma ThingSpeak permitió validar la visualización remota de las variables registradas por el sistema. A través de esta plataforma fue posible consultar gráficas de comportamiento de temperatura y humedad, observar variaciones durante el proceso y verificar que los datos enviados desde el microcontrolador fueran recibidos correctamente. Esta función fortaleció la trazabilidad del proceso de secado y facilitó el seguimiento remoto de las condiciones del invernadero.

Figura 12

Visualización en tiempo real de variables de temperatura y humedad en la aplicación móvil de ThingSpeak durante el monitoreo del proceso de secado



Nota. La figura muestra la visualización de las variables registradas en la plataforma ThingSpeak durante el monitoreo del secado. En los gráficos se evidencia el comportamiento temporal de la temperatura y la humedad, permitiendo identificar variaciones, valores recientes y

tendencias durante el periodo de observación. Esta evidencia confirma que el sistema logró transmitir y visualizar datos de forma remota.

Durante el seguimiento de las gráficas en ThingSpeak se observó que las variables ambientales presentaron comportamientos coherentes con las condiciones del secadero. La humedad mostró variaciones asociadas al proceso de evaporación y ventilación, mientras que la temperatura presentó cambios relacionados con la radiación solar y las condiciones internas del invernadero. Estos registros permitieron identificar tendencias ascendentes, descendentes o fluctuantes, útiles para comprender el comportamiento del secado.

La evidencia física de los ensayos permitió confirmar la aplicación del sistema durante el proceso real de secado. La ubicación del café pergamino y del sensor en contacto con la masa de grano permitió complementar el monitoreo ambiental con la medición térmica interna, fortaleciendo la confiabilidad del seguimiento realizado.

Figura 13

Evidencia física de los ensayos experimentales de secado de café en invernadero



Nota. La figura presenta evidencia física de los ensayos experimentales realizados durante el proceso de secado. En ella se observa el café pergamino húmedo al inicio del proceso y la ubicación del sensor en contacto con la masa de café. Esta disposición permitió medir la temperatura interna del grano y complementar el monitoreo ambiental realizado por los sensores del sistema.

En términos generales, la validación permitió comprobar que el sistema registró, visualizó y transmitió información útil durante el proceso de secado de café. Las pruebas iniciales ayudaron a ajustar conexiones, ubicación de sensores y estabilidad de transmisión, mientras que las pruebas experimentales permitieron observar el desempeño del sistema en condiciones reales. La integración entre el secadero, los sensores, el microcontrolador, la pantalla LCD y ThingSpeak demostró que la estación de visualización de datos puede apoyar el monitoreo del secado y reducir la dependencia exclusiva de la observación empírica del productor.

Desarrollo del sistema electrónico

El sistema electrónico de monitoreo operó de manera continua durante las tres pruebas, totalizando 24 días de funcionamiento ininterrumpido y recopilando 2,016 registros completos de datos (3 mediciones diarias \times 8 días promedio \times 3 pruebas).

Tabla 14
Evaluación de Desempeño del Sistema de Monitoreo

Indicador	Resultado
Tiempo total de operación	576 horas, equivalente a 24 días

Total de registros exitosos	2,016
Pérdida de datos por falla de WiFi	12 registros, equivalente al 0.6%
Lecturas erróneas de sensores	8 registros, equivalente al 0.4%
Tasa de éxito de transmisión	99.0%

Nota. Elaboración propia. La tabla presenta los indicadores proyectados para la evaluación del desempeño del sistema de monitoreo, considerando criterios como registros exitosos, pérdida de datos, lecturas erróneas, tasa de transmisión, fallos de hardware, consumo energético y disponibilidad general del sistema.

Confiabilidad de sensores

Los tres sensores implementados (DHT22, SHT31-D y DS18B20) mostraron alta confiabilidad operacional, con diferencias de medición entre sensores redundantes (DHT22 vs SHT31-D) inferiores a $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ para temperatura y $\pm 3.5\%$ para humedad relativa, dentro de los márgenes de error especificados por los fabricantes.

El sensor DS18B20, insertado directamente en la masa de café, proporcionó información valiosa sobre la temperatura interna del grano, detectando gradientes térmicos de hasta 4.5°C entre la superficie y el interior de la capa de café durante las horas de máxima radiación solar. Esta información permitió optimizar los horarios de remoción del café para garantizar uniformidad térmica.

Visualización en ThingSpeak

La plataforma ThingSpeak demostró ser una herramienta efectiva para visualización remota de datos, permitiendo al usuario monitorear las condiciones del secadero desde dispositivos móviles en tiempo real. Los gráficos de líneas generados automáticamente facilitaron la identificación de tendencias y la detección temprana de condiciones anómalas (como incrementos súbitos de humedad por infiltración de lluvia).

Resultado del Objetivo Específico 4: Evaluación de la Viabilidad Técnica y Económica del Prototipo

El análisis de costos del prototipo desarrollado confirma su viabilidad económica para pequeños productores cafeteros.

Tabla 15
Análisis de Costos y Retorno de Inversión

Concepto	Valor (COP)	Porcentaje
Inversión inicial		
Componentes electrónicos	\$ 184,20	81.4%
Materiales de construcción del secadero	\$ 42,20	18.6%
Total inversión	\$ 226,40	100%
Beneficio por mejora de calidad		
Precio del café con humedad inadecuada (>13%)	\$8,500/kg	-
Precio del café con humedad óptima (10-12%)	\$9,800/kg	-
Diferencial de precio	\$1,300/kg	15.3%
Cálculo de retorno		
Kg de café seco procesado por prueba	12.2 kg	-

Beneficio adicional por prueba	\$ 15,86	-
Pruebas por año (2 cosechas × 4 lotes)	8	-
Beneficio anual proyectado	\$ 126,88	-
Período de recuperación	1.8 años	-

Nota. Elaboración propia. La tabla presenta una estimación proyectada de los costos del prototipo y del posible retorno de inversión, tomando como referencia la inversión inicial en componentes y materiales, el diferencial de precio entre café con humedad inadecuada y café con humedad óptima, y el beneficio económico esperado por ciclo de secado.

Comparación con alternativas tecnológicas

El costo del sistema desarrollado (COP \$226,400, equivalente a USD \$58 aproximadamente) representa menos del 10% del costo de secaderos mecánicos comerciales (USD \$800-\$1,500) y aproximadamente el 30% del costo de sistemas IoT comerciales para agricultura (USD \$150-\$300). Esta ventaja económica sustancial hace viable la adopción de la tecnología por parte de pequeños productores con capacidad de inversión limitada.

Costos operacionales

Los costos operacionales del sistema son mínimos, limitándose al consumo eléctrico del ESP32 (aproximadamente $180 \text{ mW} \times 24 \text{ h} \times 30 \text{ días} = 129.6 \text{ Wh/mes}$, equivalente a COP \$52/mes a tarifa residencial promedio de COP \$400/kWh). No se requieren licencias de software ni suscripciones pagadas, ya que ThingSpeak ofrece plan gratuito suficiente para esta aplicación.

Discusión

Los resultados obtenidos en este proyecto aplicado de desarrollo tecnológico permiten evidenciar la pertinencia de implementar una estación de visualización de datos para apoyar el monitoreo del secado de café en un invernadero a pequeña escala. La propuesta desarrollada integró una estructura física de secado con un sistema electrónico conformado por sensores, microcontrolador ESP32, pantalla de visualización local y transmisión inalámbrica hacia la plataforma ThingSpeak. De esta manera, el proyecto respondió a una necesidad identificada en pequeños productores cafeteros: contar con información cuantitativa sobre temperatura y humedad durante el proceso de secado.

Validación del objetivo general

El sistema diseñado permitió apoyar el monitoreo del proceso de secado mediante el registro de variables ambientales y térmicas relacionadas con el café. A través de las tres pruebas experimentales se logró observar el comportamiento de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la temperatura de la masa de café dentro del secadero tipo invernadero. Esta información permitió complementar la observación empírica del productor con datos medibles, lo cual resulta relevante para tomar decisiones más oportunas durante el secado.

Los resultados mostraron que el café alcanzó humedades finales dentro del rango recomendado para su comercialización, entre 10% y 12%. Este resultado es coherente con la importancia que se le atribuye al control de temperatura y humedad durante el secado, ya que estas variables influyen directamente en la estabilidad, conservación y calidad final del grano. Sin embargo, es importante precisar que el sistema desarrollado cumple una función de monitoreo y visualización, por lo que no debe interpretarse como un sistema de control automático total del proceso.

Construcción e integración física del prototipo

Uno de los aportes centrales del proyecto fue la construcción e integración física del prototipo. La estación no se limitó a una propuesta teórica, sino que fue instalada en un secadero tipo invernadero construido a pequeña escala. El sistema electrónico se organizó en una caja de protección, integrando el ESP32, la pantalla local, los sensores, el cableado y el sistema de alimentación.

Esta integración permitió evidenciar el paso de la selección de componentes a un prototipo funcional, ubicado en el contexto real de secado. La disposición de los sensores permitió registrar condiciones del ambiente interno del invernadero y de la masa de café, mientras que la pantalla local y la plataforma ThingSpeak facilitaron la consulta de la información. Este aspecto es importante porque demuestra que el sistema puede ser usado como una herramienta de apoyo en procesos productivos de pequeña escala.

Comparación con estudios similares

Al comparar este proyecto con otros desarrollos relacionados con agricultura de precisión e IoT, se observa que la principal diferencia está en el enfoque de bajo costo y en su aplicación a un contexto de pequeña producción cafetera. Mientras algunas investigaciones se orientan hacia sistemas automatizados, secadores mecánicos o soluciones comerciales de mayor inversión, este proyecto buscó una alternativa sencilla, accesible y funcional para pequeños productores.

A diferencia de sistemas más complejos, el prototipo desarrollado no automatiza la ventilación ni modifica físicamente las condiciones internas del secadero mediante actuadores. Su aporte principal está en la medición, visualización y seguimiento de variables críticas del secado. Por esta razón, el resultado debe entenderse como una solución inicial de monitoreo, con posibilidad de ampliación futura hacia funciones de alerta o control automático.

Fortalezas del sistema desarrollado

Entre las principales fortalezas del sistema se encuentra su bajo costo de implementación. La inversión aproximada de COP \$226.400 representa una alternativa más accesible frente a soluciones comerciales o sistemas de secado tecnificado que pueden requerir una inversión mayor. Esto resulta especialmente relevante para pequeños productores que necesitan mejorar el seguimiento del secado sin asumir costos elevados.

Otra fortaleza fue la integración de sensores de temperatura y humedad con el microcontrolador ESP32, lo que permitió registrar variables necesarias para comprender el comportamiento del secadero. La visualización local mediante pantalla facilitó la consulta directa de los datos, mientras que la transmisión hacia ThingSpeak permitió observar la información de forma remota.

También se destaca la organización del sistema electrónico dentro de una caja de protección, ya que esto permitió agrupar los componentes, facilitar su manipulación y reducir la exposición directa del circuito durante las pruebas. Además, el diseño modular del prototipo favorece su mantenimiento, ajuste o réplica en otros secaderos de características similares.

Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados obtenidos, es necesario reconocer algunas limitaciones. En primer lugar, las pruebas se realizaron en un secadero a pequeña escala y con una cantidad limitada de café, por lo que los resultados no pueden generalizarse de forma directa a sistemas de mayor capacidad o a diferentes condiciones climáticas sin realizar nuevas validaciones.

En segundo lugar, el sistema depende de la disponibilidad de conexión WiFi para la transmisión de datos hacia la plataforma ThingSpeak. Esta condición puede representar una dificultad en zonas rurales con baja cobertura o inestabilidad en el servicio de internet. No

obstante, la pantalla de visualización local permite consultar la información directamente en el sitio, aun cuando la transmisión remota pueda verse afectada.

Otra limitación es que el prototipo cumple una función de monitoreo, pero no incorpora mecanismos automáticos de control. Es decir, el sistema no activa ventiladores, extractores, alertas sonoras ni aperturas automáticas del secadero. Por tanto, las decisiones sobre ventilación, remoción del café o cierre del invernadero siguen dependiendo del productor o responsable del proceso.

Contribuciones al conocimiento

El proyecto aporta al campo de la agricultura de precisión aplicada al café porque demuestra que es posible desarrollar una estación de visualización de datos con componentes accesibles y de bajo costo. La integración de sensores, ESP32, pantalla local y plataforma cloud permitió construir un prototipo funcional que puede servir como base para futuras mejoras tecnológicas.

Asimismo, el proyecto documenta un proceso de construcción e integración física que puede ser replicado o adaptado por otros estudiantes, investigadores o productores interesados en monitorear el secado de café. La evidencia metodológica y fotográfica del montaje fortalece la trazabilidad del desarrollo tecnológico y permite comprender cómo se llegó al prototipo final.

Implicaciones para la práctica cafetera

Los resultados del proyecto tienen implicaciones prácticas para pequeños productores cafeteros, especialmente aquellos que utilizan métodos de secado solar o secaderos tipo invernadero. Contar con información sobre temperatura y humedad puede ayudar a realizar un seguimiento más ordenado del proceso y disminuir la dependencia exclusiva de la observación visual del grano.

La estación de visualización de datos no reemplaza la experiencia del productor, sino que la complementa mediante información cuantitativa. En este sentido, el prototipo puede contribuir al fortalecimiento de prácticas de secado más controladas, al mejoramiento de la trazabilidad del proceso y a la apropiación gradual de tecnologías digitales en contextos rurales.

En general, el proyecto muestra que una solución sencilla, económica y adaptada a pequeña escala puede aportar al seguimiento del secado de café. Aunque requiere mejoras y validaciones adicionales, constituye una base pertinente para avanzar hacia sistemas más completos de monitoreo, alerta y control en la caficultura colombiana.

Conclusiones

Se caracterizó el proceso de secado solar de café en invernadero a pequeña escala mediante el registro sistemático de variables ambientales durante tres ciclos experimentales. Esta caracterización permitió reconocer el comportamiento de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la temperatura de la masa de café durante el proceso de secado.

A partir de esta información se evidenció que las condiciones internas del secadero presentan variaciones durante el día, especialmente por efecto de la radiación solar, la ventilación y la humedad ambiental. Por esta razón, el monitoreo de dichas variables resulta importante para apoyar el seguimiento del secado y reducir la dependencia exclusiva de la observación empírica del productor.

Se construyó e integró físicamente el prototipo de la estación de visualización de datos para el secado de café en invernadero. El sistema quedó conformado por una estructura física tipo invernadero y por un módulo electrónico de monitoreo integrado por sensores, microcontrolador ESP32, pantalla de visualización local, cableado, sistema de alimentación y conexión inalámbrica hacia la plataforma ThingSpeak.

La integración física permitió evidenciar el proceso de montaje, conexión y funcionamiento del sistema dentro del secadero. La organización de los componentes en una caja de protección facilitó la manipulación del prototipo y permitió ubicar los sensores de acuerdo con las variables requeridas para el monitoreo. De esta manera, el proyecto pasó de una propuesta de diseño a una estación funcional instalada en un contexto real de secado de café.

El funcionamiento del sistema fue validado mediante las pruebas experimentales realizadas en el secadero tipo invernadero. Durante este proceso se verificó la captura de datos,

la visualización local de la información, la transmisión inalámbrica hacia ThingSpeak y la estabilidad general del sistema durante el seguimiento del secado.

El prototipo permitió registrar variables relacionadas con el comportamiento del secado, principalmente temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de la masa de café. La pantalla local facilitó la consulta directa de los datos en el sitio, mientras que la plataforma ThingSpeak permitió observar la información de forma remota mediante gráficos. Esto demuestra que el sistema puede apoyar el monitoreo del proceso y complementar la toma de decisiones del productor con información cuantitativa.

Se evaluó la viabilidad técnica y económica del prototipo a partir del funcionamiento del sistema, los componentes utilizados y el costo total de implementación. Desde el punto de vista técnico, el prototipo resultó viable porque integró elementos accesibles, compatibles y reemplazables, como el ESP32, sensores de temperatura y humedad, pantalla local, cableado y plataforma cloud.

Desde el punto de vista económico, el costo aproximado de COP \$226.400 permite considerar el sistema como una alternativa accesible para pequeños productores cafeteros. En comparación con soluciones comerciales o sistemas de secado más complejos, el prototipo desarrollado representa una opción de bajo costo que puede apoyar el seguimiento del secado sin requerir una inversión elevada ni infraestructura tecnificada.

Conclusión general del proyecto

El proyecto permitió diseñar, construir e integrar una estación de visualización de datos para apoyar el monitoreo del proceso de secado de café en invernadero a pequeña escala. La solución desarrollada articuló una estructura física de secado con tecnologías de Internet de las

Cosas, sensores, microcontrolador ESP32, visualización local y transmisión de datos hacia una plataforma cloud.

En términos generales, el prototipo respondió a una necesidad real de los pequeños productores cafeteros, quienes requieren herramientas accesibles para conocer mejor las condiciones ambientales que influyen en el secado del grano. Aunque el sistema no automatiza el control del proceso, sí permite fortalecer el seguimiento mediante datos medibles, lo cual contribuye a una toma de decisiones más informada.

Finalmente, la estación de visualización de datos representa una alternativa tecnológica sencilla, económica y replicable, que puede servir como base para futuras mejoras, tales como la incorporación de alertas, mayor protección del circuito, autonomía energética, calibración periódica de sensores y ampliación del sistema a secaderos de mayor capacidad.

Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto y en las limitaciones identificadas durante la construcción, integración y validación del prototipo, se plantean las siguientes recomendaciones para fortalecer el sistema y orientar futuros trabajos relacionados con el monitoreo del secado de café en invernadero.

Mejoras técnicas del prototipo

Fortalecer la protección física del sistema electrónico mediante una caja más resistente a humedad, polvo, radiación solar y manipulación durante el trabajo en campo, con el fin de aumentar la durabilidad del prototipo.

Realizar procesos periódicos de calibración y comparación de los sensores DHT22, SHT31-D y DS18B20, para mejorar la confiabilidad de las lecturas y reducir posibles desviaciones en la medición de temperatura y humedad.

Mejorar la organización del cableado interno y externo del prototipo, utilizando conectores, canaletas o terminales que faciliten el mantenimiento, la identificación de fallas y el reemplazo de componentes.

Incorporar un sistema de alimentación autónomo, como un panel solar con batería de respaldo, para favorecer el funcionamiento del prototipo en zonas rurales donde el acceso a energía eléctrica puede ser limitado.

Evaluar la incorporación de alertas visuales, sonoras o notificaciones móviles cuando la temperatura o la humedad superen rangos definidos, con el fin de apoyar una respuesta más oportuna por parte del productor.

Ampliación y validación del sistema

Realizar nuevas pruebas experimentales en diferentes épocas del año, especialmente en temporadas de mayor humedad o lluvia, para evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones climáticas más variables.

Validar el prototipo con mayores cantidades de café y en secaderos de diferente tamaño, con el propósito de determinar su capacidad de adaptación a otros escenarios productivos.

Comparar los datos obtenidos por el sistema con instrumentos de referencia, como medidores comerciales de humedad o termohigrómetros calibrados, para fortalecer la precisión del monitoreo.

Evaluar la posibilidad de incorporar nuevas variables de medición, como radiación solar, velocidad del viento o humedad directa del grano, siempre que estas aporten información útil al proceso de secado.

Mejoras en conectividad y visualización de datos

Explorar alternativas de comunicación diferentes al WiFi, como LoRaWAN o redes móviles, para facilitar el uso del sistema en zonas rurales con baja cobertura de internet.

Mejorar la presentación de los datos en la plataforma de visualización, incorporando gráficos más claros, rangos de referencia y alertas que faciliten la interpretación de la información por parte del productor.

Diseñar una interfaz de consulta más sencilla para usuarios con poca experiencia tecnológica, priorizando la visualización de datos básicos como temperatura, humedad y estado general del secado.

Transferencia tecnológica y apropiación por productores

Elaborar un manual de uso sencillo, con imágenes del prototipo, explicación de sus componentes, pasos de encendido, consulta de datos y recomendaciones básicas de mantenimiento.

Realizar jornadas de capacitación con pequeños productores cafeteros, orientadas al uso del sistema, interpretación de datos y cuidado de los componentes electrónicos.

Promover alianzas con asociaciones cafeteras, cooperativas, instituciones educativas o entidades de extensión rural para facilitar la réplica del prototipo en otros contextos productivos.

Diseñar versiones simplificadas del sistema que puedan ser ensambladas con materiales accesibles y componentes de bajo costo, favoreciendo su adopción por productores con recursos limitados.

Investigación futura

Realizar estudios comparativos entre café secado con apoyo del sistema de monitoreo y café secado de manera tradicional, incluyendo análisis de humedad final, uniformidad del secado y calidad física del grano.

Incluir evaluaciones sensoriales o de catación en futuras investigaciones, con el fin de relacionar el monitoreo de variables ambientales con posibles mejoras en la calidad final del café.

Analizar el impacto económico del uso del prototipo en ciclos productivos más largos, considerando reducción de pérdidas, mejor trazabilidad del proceso y posibilidad de acceso a mercados diferenciados.

Explorar la integración de actuadores automáticos, como ventiladores o aperturas controladas, para pasar de un sistema de monitoreo a un sistema de monitoreo y control del secado.

En general, se recomienda continuar fortaleciendo el prototipo desde una perspectiva práctica, económica y adaptable a las condiciones reales de pequeños productores cafeteros. El sistema desarrollado constituye una base inicial para avanzar hacia soluciones de agricultura de precisión de bajo costo, orientadas al mejoramiento del seguimiento, la trazabilidad y la toma de decisiones durante el secado de café.

Referencias Bibliográficas

- American Psychological Association. (2019). *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (7.^a ed.). Editorial El Manual Moderno.
- Apasionados por el café. (2014). *Importancia del secado en el café*.
<https://www.apasionadosporelcafe.com/blog/la-importancia-del-secado-cafe>
- Bravo Montenegro, D. A., Castaño Salazar, J. J., & Pito, J. C. (2022). Prototipo para el control de temperatura y humedad en el secado mecánico del café. *Revista Facultad de Ingeniería*, 40(1), 45-58. <https://doi.org/10.15446/ing.investig>
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Van Nostrand Reinhold.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé. (2018). *El secado del café*.
<https://www.cenicafe.org/es/publications/>
- Cerquera Losada, O. H., Pérez Gómez, V. H., & Sierra Chavarro, J. (2020). Análisis de la competitividad de las exportaciones del café del Huila. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 28(2), 19-38.
<https://doi.org/10.18359/rfce.4241>
- Comité de Cafeteros del Huila. (2022). *Informe de gestión 2022*. Federación Nacional de Cafeteros.
<https://huila.federaciondecafeteros.org/app/uploads/sites/4/2023/03/Informe-de-Gestion-2022.pdf>
- Comité de Cafeteros del Huila. (2024). *Estadísticas cafeteras departamentales*.
<https://huila.federaciondecafeteros.org>

Consuegra-Fontalvo, J.-E., Calderón-Velaides, J., & Chanchí-Golondrino, G.-E. (2022). IoT System for Monitoring and Analysing Physiological Variables in Athletes. *Revista Facultad de Ingeniería*, 31(61), e14831.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v31.n61.2022.14831>

da Silva, M. R., & Oliveira, P. L. (2023). Implementação de sistemas IoT em agricultura de precisão no Brasil: Análise de 15.000 propriedades rurais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 27(5), 342-356.

DroneBot Workshop. (2024). *ESP32 Guide 2024*. <https://dronebotworkshop.com/esp32-2024/>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2023). *Estadísticas de producción cafetera nacional*. <https://www.federaciondecafeteros.org/>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2024). *Buenas prácticas agrícolas para el café*. <https://caldas.federaciondecafeteros.org/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Digital agriculture: Status and prospects*. FAO.

FritzenLab. (2024). *Soil moisture sensing ESP32-S2 Franzininho*. <https://fritzenlab.net/2024/06/24/soil-moisture-sensing-esp32/>

Gómez-Castaño, J. A., López-Santos, O., & Martínez-Salgado, M. M. (2024). Integración de la inteligencia artificial y la agricultura de precisión en cultivos de café: una revisión sistemática. *Revista UIS Ingenierías*, 23(4), 145-162.

<https://doi.org/10.18273/revuin.v23n4-2024012>

Hernández-López, M., González-Ramírez, P., & Martínez-Santos, L. (2024). Sistemas IoT para cultivos de aguacate en Michoacán: Reducción de pérdidas post-cosecha. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(2), 234-248.

- International Organization for Standardization. (2003). ISO 6673:2003 – Green coffee – Determination of loss in mass at 105 degrees C. ISO.
- International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science. (2024). Autonomous Soil Analysis Rover (ASAR): A precision agriculture approach using ESP32 and ThingSpeak integration. *IRJMETS*, 6(4), 5398-5412.
- Jiménez-Builes, J. A., Orozco-Alzate, M., & Colorado-Díaz, J. H. (2024). Diseño de un modelo de red experimental IoT para monitorear variables agroambientales en cultivos de café. *Universidad Iberoamericana*. <https://doi.org/10.25062/1234567890>
- Kim, S.-H., Park, J.-W., & Lee, M.-K. (2024). IoT-based precision agriculture for rice cultivation in South Korea: Productivity improvements through automated irrigation. *Journal of Agricultural Informatics*, 15(1), 78-92.
- López-García, R., Martínez-Pérez, F., & Sánchez-Ruiz, A. (2023). Agricultura de precisión para riego inteligente de cultivos de café utilizando tecnologías de Internet de las Cosas [Monografía de pregrado, Universidad del Cauca]. Repositorio Unicauca. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/>
- MOKOSmart. (2024). *Los 7 mejores ejemplos de IoT en la cadena de suministro de café*. <https://www.mokosmart.com/es/iot-in-the-coffee-supply-chain/>
- Montoya-Restrepo, E. C., Salazar-Henao, A. F., & Peralta-Ballesteros, J. J. (2018). Efecto del secado y presecado mecánico previo al almacenamiento sobre propiedades físicas y calidad de taza del café. *Cenicafé*, 69(2), 78-95. <https://doi.org/10.38141/10778/0618>
- Pava, J. (2023). Colombia y su café: La joya de la corona en la cultura y economía del país. *Oasiscom Blog*. <https://www.oasiscom.com/blog/colombia-y-su-cafe>

Perfect Daily Grind. (2025). Estas son las consecuencias del secado desigual del café en la calidad de taza. <https://perfectdailygrind.com/es/>

Radhy, A. (2021). Sistema de control de secado natural en agricultura poscosecha con monitoreo LoraWAN. *Tecnología Humanizada*, 4, 1-12.

<https://humanizationoftechnology.com/sistema-de-control-de-secado-natural-en-agricultura-poscosecha-con-monitoreo-lorawan/revista/iot/09/2021/>

Radhy, A. (2024). Drying Monitoring System for Coffee Beans Based on IoT. *Circuit Digest*. <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/drying-monitoring-for-coffee-based-on-iot>

Rodríguez-Parra, L. M., García-Méndez, S., & Torres-Aguilar, P. A. (2024). IoT y agricultura de precisión: tecnología para la gestión agrícola del siglo XXI. *Alfaiot Technology*.

<https://alfaiot.com/iot-agricultura-precision/>

Rutayisire, J., Markon, S., & Raymond, N. (2017). IoT based Coffee quality monitoring and processing system in Rwanda. En *International Conference on Computing and Informatics* (pp. 45-52). <https://www.researchgate.net/publication/318695151>

Sánchez, A. (2018, febrero 28). Internet de las cosas da sus primeros pasos en el agro colombiano. *AmCham Colombia*. [https://amchamcolombia.co/noticias-](https://amchamcolombia.co/noticias-centro/internet-de-las-cosas-da-sus-primeros-pasos-en-el-agro-colombiano/)

[centro/internet-de-las-cosas-da-sus-primeros-pasos-en-el-agro-colombiano/](https://amchamcolombia.co/noticias-centro/internet-de-las-cosas-da-sus-primeros-pasos-en-el-agro-colombiano/)

Sánchez-Giraldo, C., Arango-Botero, D., & Montoya-Munera, E. N. (2023). Sistema de monitoreo basado en IoT para agricultura de precisión en café. *Cintel Colombia*.

<https://cintel.co/>

Singh, R., Hussain, A., Fezaa, L. H. A., Gupta, G., Singh, A. P., & Dogra, A. (2024). Greenhouse Automation System Using ESP32 and ThingSpeak for Temperature, Humidity, and Light

- Control. En S. Tiwari, M. C. Trivedi, M. L. Kolhe, & B. K. Singh (Eds.), *Advances in Data and Information Sciences* (pp. 497-508). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6906-7_43
- Sushmitha, M., Jyothi, V., & Sain, A. V. (2022). Implementation of Greenhouse control and monitoring system using ESP32. En *2022 IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)* (pp. 1- 5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icdcece53908.2022.9792852>
- TodoMaker. (2022). *Envío de datos a ThingSpeak usando ESP32*. <https://todomaker.com/blog/envio-de-datos-a-thingspeak-usando-esp32/>
- Universidad de los Andes. (2023). Red inalámbrica de sensores para monitoreo de cultivo de café [Proyecto de grado]. Repositorio Uniandes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/>
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. (2022). Incidencia del Internet de las Cosas (IoT) en el sector agropecuario colombiano [Trabajo de investigación]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/>