

3-12-2024

Cultiva el Futuro: Monitoreo de condiciones ambientales para los cultivos de café en Colombia, caso finca El Cascajal ubicado en San Mateo, Boyacá



David Felipe López Tabares
UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
BOGOTÁ, 2024



Cultiva el Futuro: Monitoreo de Condiciones Ambientales para los cultivos de café en Colombia, caso finca El Cascajal ubicado en San Mateo, Boyacá

David Felipe López Tabares

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

Dario Alejandro Segura M.Sc.

Codirigido por

Gianina Garrido Silva M.Sc

Grupo de Investigación MEM

Línea de Investigación: Automática

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Electrónica

Bogotá, Colombia

2024

Autoridades de la universidad

RECTOR GENERAL

Fray, Álvaro José Arango Restrepo, O.P.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

Fray, Hernán Yesid Rivera Roberto, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

Fray, Mauricio Antonio Cortés Gallego, O.P.

SECRETARIO GENERAL

Dra. Lucero Galvis Cano

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Fray, Javier Antonio Hincapie Ardila, O.P.

SECRETARIA DE DIVISIÓN

Dra. Luz Patricia Rocha Caicedo

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Ph. D. Carlos Andrés Torres Pinzón

Nota de aceptación

Firma del tutor

Firma del jurado

Firma del jurado

BOGOTÁ D.C. _____ DE 2024

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

Dedicatoria

A mis padres, quienes me inculcaron el amor por el conocimiento y me apoyaron en cada paso de mi camino. A mi hermano, por ser mi mejor amigo y por acompañarme varias noches desarrollando la tesis. Yesid Alveirum Pérez Sepúlveda, por su guía y sabiduría además de la ayuda por dejarme utilizar la finca para el desarrollo del proyecto.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, el profesor Dario Alejandro Segura, por su invaluable guía y orientación durante todo el proceso de investigación. Agradezco también a los profesores Carlos Javier Mojica Casallas y Gianina Garrido Silva por sus valiosos comentarios y sugerencias. Quiero agradecer a la Sra. Concha Sepúlveda de Pérez que proporciono el espacio para la implementación del proyecto en la finca del Cascajal. Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Santo Tomás por la oportunidad de desarrollar este proyecto.

Contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Lista de ilustraciones	4
Glosario.....	8
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Pregunta problema	2
1.3 Justificación	3
1.4 Impacto social.....	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo General.....	6
1.5.2 Objetivos específicos	6
2 Estado del arte	7
3 Marco teórico.....	9
3.1 El café y su importancia	9
3.1.1 Variedades de café.....	9
3.1.1.1 Café Arábica (Coffea arabica).....	9
3.1.1.2 Café Robusta (Coffea canephora)	10
3.2 Sistemas de monitoreo	10
3.3 Telemetría	12
4 Metodología	14
4.1 Caracterización de la finca.....	14
4.2 Variables a tener en cuenta en un cultivo de café	16
4.3 Investigación y selección de sensores.....	19
4.3.1 Sensores de temperatura y humedad ambiente.	19
4.3.2 Sensores de detección de lluvia	22
4.3.3 Sensores de humedad de suelo	24
4.3.4 Sensores de precipitación	25
4.3.5 Calibración de sensores	26
4.4 Desarrollo del prototipo.....	28
4.4.1 Arquitectura del sistema de monitoreo	28
4.4.2 Selección de hardware	29
4.4.3 Selección de software	31
4.4.4 Conexión del dispositivo	33
4.4.5 Desarrollo de software	35

4.4.5.1	Módulo de sensores.....	35
4.4.5.2	Módulo de servidor – Preparación de hardware	43
4.4.5.3	Módulo de servidor – Desarrollo de la página web	48
4.4.6	Ensamblaje del proyecto	52
4.4.7	Pruebas en campo	56
4.4.8	Resultados.....	62
4.4.8.1	Módulo de sensor Temperatura Ambiente	62
4.4.8.2	Módulo Sensor de Humedad Ambiente	66
4.4.8.3	Módulo Sensor Humedad en Suelo.....	71
4.4.8.4	Módulo Sensor Detección de Lluvia.....	76
4.4.8.5	Módulo Sensor de Precipitación	81
4.4.8.6	Análisis final de costos	86
4.5	Pruebas de concepto	91
4.5.1	Veracidad	91
4.5.2	Pertinencia.....	93
4.5.3	Oportunidad	94
5	Planes de mejora	95
6	Conclusiones.....	96
	Referencias.....	97
	Anexos.....	103

Resumen

Este trabajo de grado se centra en el desarrollo de un sistema de monitoreo para el cultivo de café en la finca El Cascajal, ubicada en San Mateo, Boyacá. Este sistema utiliza una combinación de sensores para medir variables críticas como temperatura, humedad ambiental, precipitación y humedad del suelo. Los datos recopilados se transmiten a un servidor mediante un *router* wifi y se almacenan en una base de datos, permitiendo su visualización y análisis a través de una página web. La metodología del proyecto incluye la selección y calibración de sensores, el desarrollo de un prototipo de hardware y software, y la implementación de pruebas de campo para validar el sistema. Se utilizaron dispositivos como el ESP32 y el TV Box T95 para la recolección y procesamiento de datos, y se configuró un servidor web Apache con PHP y MariaDB para gestionar la información. Las pruebas de campo demostraron la efectividad del sistema en condiciones reales, proporcionando datos precisos y oportunos para la toma de decisiones en el manejo del cultivo. Finalmente, el proyecto destaca la importancia de la precisión y la oportunidad de los datos para mejorar la productividad y la salud de los cultivos de café. La comparación de los datos obtenidos con fuentes meteorológicas confiables confirmó la veracidad del sistema, y se identificaron áreas de mejora para futuras implementaciones. Este sistema de monitoreo representa un paso significativo hacia la agricultura inteligente y sostenible en Colombia.

Palabras clave: Base de datos, Pagina web, Sistema de monitoreo, Café, TV Box, ESP-32.

Abstract

This thesis project focuses on the development of a monitoring system to optimize coffee cultivation at the El Cascajal farm, located in San Mateo, Boyacá. This system utilizes a combination of sensors to measure critical variables such as temperature, ambient humidity, precipitation, and soil moisture. The collected data is transmitted to a server via a Wi-Fi *router* and stored in a MariaDB database, allowing for visualization and analysis through a web page. The project's methodology includes the selection and calibration of sensors, the development of hardware and software prototype, and the implementation of field tests to validate the system. Devices such as the ESP32 and the T95 TV Box were used for data collection and processing, and an Apache web server with PHP and MariaDB was configured to manage the information. Field tests demonstrated the system's effectiveness in real conditions, providing accurate and timely data for decision-making in crop management. Finally, the project highlights the importance of data accuracy and timeliness in improving productivity and the health of coffee crops. The comparison of the obtained data with reliable meteorological sources confirmed the system's validity, and areas for improvement for future implementations were identified. This advanced monitoring system represents a significant step toward smart and sustainable agriculture in Colombia.

Keywords: Database, Web page, Monitoring system, Coffee, TV Box, ESP-32.

Lista de ilustraciones

<i>Ilustración 1 - Diagrama de un sistema de monitoreo [35]</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 2 – Componentes de un sistema de telemetría [37]</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 3 - Ubicación finca desde vista satelital. Fuente: Google Maps</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 4 - Ubicación finca contra el pueblo de San Mateo. Fuente: Google Maps</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 5 - Ubicación de la finca. Fuente: Google Maps</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 6 - DHT11 [45]</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 7 - DHT22 [47]</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 8 - SHT31 [42]</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 9 - BME280 [50]</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 10 - Si7021 [52]</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 11 - AHT10 [54]</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 12 - FC37 [47]</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 13 - YL 83 [57]</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 14 - MH – RD [59]</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 15 - YL 69 [50]</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 16 - SEN0193 [51]</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 17- Pluviómetro Fuente: [63]</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 18 - Termohigrómetro. Fuente: Autoría propia</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 19 - Certificación de la ONAC. Fuente: Autoría propia</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 20 - Arquitectura del proyecto – Fuente: Autoría Propia</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 21- PinOut ESP32 Fuente: LastMinuteEngineers.com</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 22 - Raspberry pi 4 [78]</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 23 - Lenovo ThinkPad [80]</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 24 - T95 [82]</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 25 - Conexiones Módulo de sensores Fuente: Autoría Propia</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 26 - Alimentación módulo de sensores Fuente: Autoría propia</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 27 - Diagrama de flujo – Arduino Fuente: Autoría Propia</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 28 – Diagrama de flujo Conectar wifi Fuente: Autoría Propia</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 29 - Librerías código principal Fuente: Autoría propia</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 30 - Librerías código principal 2 Fuente: autoría propia</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 31 - Diagrama de flujo de envío sensores y conexiones 1 Fuente: Autoría propia</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 32 – Diagrama de flujo de envío de Post Fuente: autoría propia</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 33 - Envío de dato de precipitación Fuente: autoría propia</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 34 - Envío de información por serial Fuente: autoría propia</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 35 - Interfaz T95 Fuente: autoría propia</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 36 - Interfaz Termux Fuente: autoría propia</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 37 - Pagina básica en PHP Fuente: autoría propia</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 38 - Inicio de mariadb Fuente: autoría propia</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 39 - Estructura de la base de datos Fuente: autoría propia</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 40 - Configuración invitado - parte 1 Fuente: autoría propia</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 41 - Configuración invitado - parte 2 Fuente: autoría propia</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 42 - Configuración invitado - parte 3 Fuente: autoría propia</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 43 - Script de inicio del dispositivo (boot) Fuente: autoría propia</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 44 - Diagrama de flujo - Archivo de recepción de datos de los sensores</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 45 - Sección de exportación de la página web Fuente: autoría propia</i>	<i>49</i>

<i>Ilustración 46 - Sección de alertas de la página web Fuente: autoría propia</i>	50
<i>Ilustración 47 - Sección de notificaciones de la página web Fuente: autoría propia</i>	50
<i>Ilustración 48 - Plano Módulo Servidor Fuente: autoría propia</i>	52
<i>Ilustración 49 - Plano Módulo de comunicación (Router) Fuente: autoría propia</i>	52
<i>Ilustración 50 - Plano Módulo de sensores Fuente: autoría propia</i>	52
<i>Ilustración 51 - Módulo de sensores Fuente: autoría propia</i>	54
<i>Ilustración 52 - Módulo de sensores (vista completa) Fuente: autoría propia</i>	54
<i>Ilustración 53 - Módulo de servidor Fuente: autoría propia</i>	55
<i>Ilustración 54 - Módulo de servidor(superior) Fuente: autoría propia</i>	55
<i>Ilustración 55 - Lugar del cultivo Fuente: autoría propia</i>	56
<i>Ilustración 56 - Instalación Módulo servidor Fuente: autoría propia</i>	57
<i>Ilustración 57 - Instalación módulo de sensores - Parte 1 Fuente: autoría propia</i>	57
<i>Ilustración 58 - Instalación módulo de sensores - parte 2 Fuente: autoría propia</i>	58
<i>Ilustración 59 - Instalación del módulo de sensores - parte 3 Fuente: autoría propia</i>	58
<i>Ilustración 60 - Instalación del módulo de sensores - Colocación final Fuente: autoría propia</i>	59
<i>Ilustración 61 - Colocación final 1 - Módulo de sensores Fuente: autoría propia</i>	59
<i>Ilustración 62 - Colocación final 2 - Módulo de sensores Fuente: autoría propia</i>	60
<i>Ilustración 63 - Colocación final 3 - Sensor de humedad de suelo Fuente: autoría propia</i>	60
<i>Ilustración 64 - Prueba de módulo de servidor Fuente: autoría propia</i>	61
<i>Ilustración 65 - Prueba de módulo de servidor sin conexión a la red eléctrica Fuente: autoría propia</i>	61
<i>Ilustración 66 - Tableta de visión de • Goyojo Estación Meteorológica Inalámbrica Temperatura Humedad</i>	86
<i>Ilustración 67 - • Goyojo Estación Meteorológica Inalámbrica Temperatura Humedad</i>	86
<i>Ilustración 68 - Tableta de visión - Goyojo Estación Meteorológica Anemómetro wifi Profesional</i>	87
<i>Ilustración 69 - Goyojo Estación Meteorológica Anemómetro wifi Profesional</i>	87
<i>Ilustración 70 - Ambient Weather Ws-2902 10-in-1 wifi Estación Meteorológica Profesional Con Internet Vigilancia, Compatible Con Alexa</i>	87
<i>Ilustración 71 - Tableta de visión - Ambient Weather Ws-2902 10-in-1 wifi Estación Meteorológica Profesional Con Internet Vigilancia, Compatible Con Alexa</i>	87
<i>Ilustración 72 - Tableta de visión - Estación Meteorológica wifi Logia: 7 En 1</i>	88
<i>Ilustración 73 - Estación Meteorológica wifi Logia: 7 En 1</i>	88
<i>Ilustración 74 - Tableta de visión - VIVOSUN Estación meteorológica wifi 18 en 1 con sensor para exteriores</i>	89
<i>Ilustración 75 - VIVOSUN Estación meteorológica wifi 18 en 1 con sensor para exteriores</i>	89
<i>Ilustración 76 - Datos de comparación de veracidad - The Weather Channel [91]</i>	92

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Temperatura ambiente - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	62
Gráfico 2- Temperatura ambiente - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	63
Gráfico 3- Temperatura ambiente - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	63
Gráfico 4- Temperatura ambiente - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	64
Gráfico 5- Temperatura ambiente - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	64
Gráfico 6- Temperatura ambiente - Semana 23-27 de octubre Fuente: autoría propia	65
Gráfico 7- Temperatura ambiente - Mes octubre 2024 Fuente: autoría propia	65
Gráfico 8- Temperatura ambiente - Año 2024 Fuente: autoría propia	66
Gráfico 9- Temperatura ambiente - Todos los años Fuente: autoría propia	66
Gráfico 10- Humedad ambiente - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	67
Gráfico 11- Humedad ambiente - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	67
Gráfico 12- Humedad ambiente - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	68
Gráfico 13- Humedad ambiente - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	68
Gráfico 14- Humedad ambiente - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	69
Gráfico 15- Humedad ambiente - Semana de 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	69
Gráfico 16- Humedad ambiente - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia	70
Gráfico 17- Humedad ambiente - Año 2024 Fuente: autoría propia	70
Gráfico 18- Humedad ambiente - Todos los años Fuente: autoría propia	71
Gráfico 19- Humedad de suelo - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	71
Gráfico 20 - Humedad de suelo - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	72
Gráfico 21- Humedad de suelo - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	72
Gráfico 22- Humedad de suelo - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	73
Gráfico 23- Humedad de suelo - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	73
Gráfico 24- Humedad de suelo - Semana 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	74
Gráfico 25- Humedad de suelo - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia	74
Gráfico 26- Humedad de suelo – Año 2024 Fuente: autoría propia	75
Gráfico 27- Humedad de suelo - Todos los años Fuente: autoría propia	75
Gráfico 28- Detección de lluvia - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	76
Gráfico 29- Detección de lluvia - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	77
Gráfico 30- Detección de lluvia - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	77
Gráfico 31- Detección de lluvia - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	78
Gráfico 32- Detección de lluvia - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	78
Gráfico 33- Detección de lluvia - Semana 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	79
Gráfico 34- Detección de lluvia - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia	79
Gráfico 35- Detección de lluvia - Año 2024 Fuente: autoría propia	80
Gráfico 36- Detección de lluvia - Todos los años Fuente: autoría propia	80
Gráfico 37- Precipitación - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	81
Gráfico 38- Precipitación - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	82
Gráfico 39- Precipitación - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	82
Gráfico 40- Precipitación - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	83
Gráfico 41- Precipitación - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	83
Gráfico 42- Precipitación - Semana 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia	84
Gráfico 43- Precipitación - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia	84
Gráfico 44- Precipitación - Año 2024 Fuente: autoría propia	85
Gráfico 45- Precipitación - Todos los años Fuente: autoría propia	85
Gráfico 46 - Días de toma de datos reales para la comparación Fuente: autoría propia	91
Gráfico 47 - Datos de comparación de veracidad – AccuWeather [67]	92

Lista de Tablas

Tabla 1 - Caracterización de la finca. Fuente: Autoría propia	15
Tabla 2- Parámetros de adaptación del café Fuente: [39]	16
Tabla 3 - Comparativa de sensores temperatura y humedad de suelo. Fuente: Autoría propia	19
Tabla 4-Comparativa de sensores de detección de lluvia. Fuente: Autoría propia	22
Tabla 5- Comparativa sensores humedad de suelo. Fuente: Autoría propia	24
Tabla 6 - Comparación entre patrón y módulo de sensores. Fuente: Autoría propia	27
Tabla 7 - Comparación entre microcontroladores Fuente: Autoría propia	29
Tabla 8- Comparación de procesadores para servidor Fuente: Autoría propia	30
Tabla 9 - Consumos del proyecto Fuente: Autoría propia	34
Tabla 10 – Estructura Lecturas 1 Fuente: Autoría Propia	46
Tabla 11 – Estructura Lecturas 2 Fuente: Autoría Propia	46
Tabla 12 - Alertas de la página web Fuente: autoría propia	50
Tabla 13 – Notificaciones de la página web Fuente: autoría propia	51
Tabla 14 – Costos del proyecto Fuente: Autoría Propia	53
Tabla 15 - Datos de comparación Fuente: Autoría propia	93
Tabla 16 - Datos de error Fuente: Autoría propia	93

Glosario

- **Apache:** Apache es un servidor web de código abierto especialmente adecuado para dispositivos de recursos limitados. Es uno de los servidores más populares y ampliamente utilizados en todo el mundo gracias a su estabilidad, seguridad y versatilidad [1]. Su función principal es actuar como un intermediario entre el navegador del usuario (como Chrome, Firefox o Safari) y el servidor que aloja el sitio web. Cuando un usuario accede a una página web, su navegador envía una solicitud HTTP al servidor Apache, que la procesa y devuelve los archivos necesarios (como PHP, imágenes, entre otros) para que el navegador pueda mostrar correctamente la página.
- **ESP32:** Es un microcontrolador que tiene integrado wifi HT40 y Bluetooth 4.2. el cual puede poseer uno o dos procesadores (240 MHz) que permite tener un bajo consumo, pero alto rendimiento. También posee 32 GPIOs y varios puertos de comunicación [2].
- **Galgas Extensiométricas:** Son sensores que miden la deformación de un objeto. Funcionan como resistencias que cambian su valor cuando se aplica una fuerza externa, generando una tensión y estrés en el objeto. [3]
- **MariaDB:** Es un RDBMS de código abierto, desarrollado por los mismo creadores de MySQL debido a preocupaciones sobre su comercialización tras la adquisición de MySQL por Oracle [4].
- **PHP:** PHP (Hypertext Preprocessor) es un lenguaje de programación de código abierto, especialmente diseñado para el desarrollo web [5].
- **Pluviómetro:** Un pluviómetro es un dispositivo que se usa para medir la cantidad de lluvia que cae en una zona específica durante un tiempo determinado. Este aparato recoge el agua de lluvia en un contenedor y la cantidad acumulada se mide en milímetros o centímetros de lluvia. [6]
- **Puente de Wheatstone:** Es un circuito utilizado para medir pequeñas variaciones de resistencia. En este contexto, se usa para amplificar las señales de las galgas extensiométricas. Puede configurarse como puente completo, medio puente o un solo lado, dependiendo de la aplicación. [3]
- **Termux:** Termux es una aplicación de terminal para Android que permite ejecutar un entorno Linux en un dispositivo móvil. Es una herramienta que no requiere acceso root y permite usar comandos y programas de Linux directamente en el teléfono [7].
- **TV Box:** Es un dispositivo compacto que se conecta a un televisor mediante un puerto HDMI. Su propósito principal es transformar un televisor en un centro de entretenimiento inteligente, lo que permite acceder a una gran cantidad de contenido, incluyendo aplicaciones de streaming, videojuegos, navegación por internet y más, directamente en la pantalla de un televisor. [8]

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La agricultura colombiana, con su diversidad geográfica se enfrenta a desafíos únicos. El país alberga una amplia gama de climas, desde las tierras bajas tropicales hasta las montañas andinas. Esta diversidad crea condiciones ambientales cambiantes que pueden afectar negativamente el rendimiento de los cultivos [9] siendo la capacidad de comprender y responder a estas condiciones cambiantes esencial para garantizar la salud y el rendimiento adecuado de los cultivos en un país con variaciones climáticas tan marcadas. En este contexto, el monitoreo de condiciones ambientales se convierte en una herramienta fundamental.

Además, la agricultura colombiana es esencial para la economía y la seguridad alimentaria del país, que representa el 9% del PIB y emplea a más de 4 millones de personas, se enfrenta a desafíos ambientales y de sostenibilidad. El cambio climático está provocando fenómenos meteorológicos extremos, como sequías e inundaciones, que afectan negativamente a los cultivos [10] [11]. Sin embargo, la adopción de tecnologías de monitoreo avanzado en la agricultura colombiana es aún baja, ya que solo el 10% de los agricultores utilizan estas tecnologías.

Sin embargo, la geografía variada y la diversidad climática presentan un conjunto diverso de desafíos para los agricultores. Las condiciones climáticas impredecibles, que oscilan desde la sequía extrema hasta las lluvias torrenciales, hacen que la gestión de los cultivos sea una tarea intrincada. El monitoreo y la comprensión en tiempo real de las condiciones ambientales, que incluyen factores tales como la temperatura, la humedad y la calidad del suelo, son esenciales para la toma de decisiones agrícolas fundamentadas [10]. Por ende, un sistema de monitoreo puede ayudar a los agricultores a comprender y responder a las condiciones ambientales cambiantes, lo que puede mejorar la productividad y la sostenibilidad de los cultivos.

A pesar de la necesidad innegable de monitoreo de condiciones ambientales en la agricultura colombiana, muchas regiones del país aún no han aprovechado plenamente las ventajas de las tecnologías disponibles y como se muestra en el boletín del DANE [11] actualmente el 51,18% los hogares de los agricultores poseen internet, siendo el momento justo para proporcionar nuevas tecnologías en los campos. La falta de acceso a dispositivos de monitoreo de última generación y del conocimiento sobre su aplicación con los costos asociados a su implementación son barreras significativas. Además, la adaptación de soluciones genéricas a las necesidades específicas de Colombia sigue siendo un desafío. El presente proyecto se posiciona en la encrucijada de estas cuestiones y busca abordarlas de manera integral [12], desarrollando sistemas de monitoreo de condiciones ambientales, asequibles y específicos para Colombia, brindando a los agricultores las herramientas y los conocimientos necesarios para una agricultura más inteligente y sostenible.

Cabe resaltar, que el eje principal del proyecto será el cultivo de café, siendo este cultivado por todo el país y con unos cuidados que, aunque no sean muy exigentes, son muy importantes para la producción y que el grano sea de buena calidad.

1.2 Pregunta problema

¿Cuáles deben ser las características técnicas que debe de cumplir un sistema de monitoreo de un cultivo de café en la finca El Cascajal ubicada en el municipio de San Mateo, Boyacá, desde un punto de vista de instrumentación e informático sin perder de vista el costo de implementación de este?

1.3 Justificación

La agricultura colombiana es un sector importante, pero enfrenta desafíos climáticos. Las condiciones climáticas impredecibles, como sequías, inundaciones y cambios bruscos de temperatura dificultan la gestión de los cultivos. Además, en un mundo en constante cambio, donde la seguridad alimentaria es esencial, es crucial encontrar soluciones que permitan una producción agrícola más sostenible y eficiente, tal y como lo proponen los ODS 9 y 12, los cuales se centran en la industria, la innovación y el consumo responsables. Entonces el proyecto podría favorecer el desarrollo industrial y social del país, y a la preservación del medio ambiente y los recursos naturales esto debido a que en la actualidad según la UNDP [13] la agricultura consume un 70% del agua dulce para el riego.

Este proyecto busca abordar esta problemática central al enfocarse en el desarrollo y la implementación de un sistema avanzado de monitoreo de condiciones ambientales. Dado que la tecnología ha avanzado significativamente en las últimas décadas, es el momento oportuno para aprovecharla y brindar a los agricultores herramientas más efectivas y precisas para gestionar sus cultivos. Al permitir un monitoreo en tiempo real de factores como la temperatura, la humedad y la radiación solar, este sistema podría proporcionar a los agricultores una comprensión más profunda de las condiciones ambientales específicas en sus campos. Esto, a su vez, les permitirá tomar decisiones más informadas sobre riego, fertilización y otras prácticas agrícolas clave, lo que puede llevar a un aumento significativo en la eficiencia y la calidad de la producción [14].

Además, este proyecto busca superar las barreras que actualmente limitan la adopción de tecnologías avanzadas en la agricultura colombiana. La falta de acceso a dispositivos de monitoreo adecuados, junto con la falta de capacitación y conocimiento sobre su implementación [15], son obstáculos que han mantenido a muchos agricultores al margen de estas innovaciones. Al brindar soluciones asequibles y fáciles de usar, así como capacitación y asistencia técnica, este proyecto tiene como objetivo democratizar el acceso a tecnologías agrícolas avanzadas y cerrar la brecha entre los agricultores y la ciencia. En última instancia, este proyecto busca aportar en la transformación de la agricultura en Colombia hacia una empresa más resiliente, sostenible y productiva, capaz de enfrentar los desafíos climáticos actuales y futuros, y contribuir a la seguridad alimentaria del país.

Por último, cabe resaltar que uno de los productos que más se exporta en Colombia es el café, como dice la Federación Nacional de Cafeteros en Colombia [16] [17]. Los cultivos de café en el 2023 tuvieron una producción de 10.6 millones de sacos de 60 kg, bajando un 9.1% respecto al año 2022. Ya que, el cultivo de café es susceptible a una serie de problemas, como enfermedades, plagas, cambios climáticos y otros factores ambientales. Un sistema de monitoreo de cultivos de café basado en sensores puede ayudar a los caficultores a detectar estos problemas de forma temprana, lo que les permite tomar medidas para prevenir daños a sus cultivos.

Como se puede ver en diferentes estudios los sistemas de monitoreo cumplen con lo anteriormente mencionado, según un artículo de Sentera [18], los sistemas de monitoreo de la salud de los cultivos pueden proporcionar una visión más completa de los campos, ofrecer información más detallada sobre los cultivos en cada etapa del ciclo de crecimiento e incluso enviar notificaciones que alertan sobre posibles problemas. Además, un artículo de Eastern Peak [19] sugiere que el uso de la IoT permitirá a los agricultores aumentar las tasas de producción en un 70% para finales de 2050. Por último, la comunidad de Agriplastics [20] señala que supervisar los cultivos no solo contribuye a prevenir la aparición y propagación de plagas, sino que

también asegura que las enfermedades y malas hierbas, que suelen surgir, se mantengan bajo control, evitando así impactos negativos en el rendimiento y en la calidad del producto final.

1.4 Impacto social

El proyecto pretende aportar en desafíos cruciales en términos de seguridad alimentaria, sostenibilidad agrícola y calidad de vida en un contexto rural el cual siempre está en constante crecimiento. La implementación exitosa de tecnologías de monitoreo de condiciones ambientales en la agricultura colombiana tendrá un efecto transformador en múltiples niveles. Asimismo, la relevancia de este proyecto radica en su potencial para impulsar la economía rural de Colombia. La agricultura es una fuente clave de empleo en muchas comunidades rurales, y la adopción de tecnologías avanzadas puede aumentar la productividad, lo que a su vez puede generar más oportunidades laborales. Además, la producción agrícola más eficiente y sostenible puede aumentar la calidad de los productos colombianos en los diferentes mercados, lo que podría llevar a un mayor crecimiento económico a nivel nacional. El proyecto también tiene un impacto ambiental significativo al promover prácticas agrícolas más sostenibles, por ejemplo, la gestión más precisa de los recursos como el agua y los fertilizantes ayuda a reducir el desperdicio y minimiza el impacto ambiental de la agricultura. Al optimizar las condiciones para el crecimiento de los cultivos, se reduce la necesidad de utilizar productos químicos dañinos, lo que puede contribuir a la conservación de los ecosistemas locales y a la protección de la biodiversidad. En un momento en que la sostenibilidad es una preocupación global, este proyecto impulsa a Colombia a liderar en agricultura inteligente y ambientalmente responsable, mostrando un compromiso sólido con la conservación de los recursos naturales y la mitigación de los impactos ambientales de la agricultura. El cultivo de café es una actividad económica importante en Colombia, pero también es una actividad que emplea a millones de personas, en su mayoría en zonas rurales. Un sistema de monitoreo de cultivos de café basado en sensores de variables ambientales puede ayudar a mejorar la productividad de los cultivos, lo que puede conducir a un aumento de los ingresos de los agricultores. Esto puede tener un impacto en la economía rural y en la calidad de vida de los agricultores y sus familias.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de bajo costo de monitoreo y alertas de variables ambientales enfocado en la agricultura colombiana que describa el estado actual de un cultivo de café en la finca “El Cascajal” ubicada en el municipio de San Mateo, Boyacá empleando tecnología de telemetría.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables ambientales y criterios de generación de alertas relevantes en un cultivo de café que guíen los requerimientos del sistema de monitoreo.
- Comparar sensores comerciales de bajo costo apropiados y necesarios de acuerdo con las variables ambientales identificadas teniendo en cuenta su relación costo calidad.
- Desarrollar un prototipo del sistema, tanto software como hardware, que cumpla con los requerimientos identificados y monitoree las principales variables ambientales que afectan un cultivo de café y que genere las alertas identificadas, teniendo en cuenta los costos y la implementación en sitio.
- Evaluar la pertinencia, veracidad y oportunidad de los datos entregados por el sistema de monitoreo, mediante la realización de pruebas en condiciones controladas validando el correcto funcionamiento del sistema.

2 Estado del arte

Aquí se hablará de diferentes proyectos encontrados en diferentes fuentes científicas de información con el fin de obtener una ayuda a la hora de desarrollar el proyecto base:

Ahora, en el artículo [21], los autores se adentran en el mundo de la agricultura urbana, un campo que está ganando interés debido a la creciente urbanización y la necesidad de producir alimentos de manera sostenible en las ciudades. Para ello, diseñaron un sistema de monitoreo que utiliza sensores y dispositivos IoT para recopilar datos sobre las condiciones climáticas en los cultivos de un área urbana. Ahora, imagina que se toma ese sistema y lo lleva un paso más allá. Eso es exactamente lo que hicieron los autores del trabajo [22], no solo desarrollaron un sistema de monitoreo, sino que también lo alimentaron con energía solar. Este sistema se utiliza para recopilar y analizar datos sobre las condiciones ambientales en los cultivos de papa.

En el trabajo [23], los autores se embarcan en un viaje para desarrollar un sistema de monitoreo con una flexibilidad excepcional a comparación de los anteriormente mencionados ya que este sistema puede adaptarse a diferentes entornos agroindustriales, lo que significa que puede manejar diferentes tipos de cultivos y condiciones ambientales. Además, hay otro proyecto que decidió enfocarse más en la automatización. Eso es precisamente lo que hicieron los autores del trabajo [24] no solo diseñaron y construyeron un sistema de monitoreo, sino que también crearon un sistema de riego automatizado. Este enfoque en la automatización del riego no solo puede ayudar a ahorrar agua, sino que también introduce un sistema de monitoreo innovador.

En el artículo [25], se centra en la creación de una plataforma de monitoreo y control de variables ambientales que es precisa, flexible y de bajo costo. Este sistema utiliza una red de sensores y dispositivos IoT para monitorear y controlar las condiciones ambientales en tiempo real, con un enfoque en la agricultura de precisión. Los autores del artículo [26] llevaron este concepto un paso más allá al incorporar la capacidad de monitorear sequías a gran escala. Este trabajo se centra en el uso de la teledetección por microondas para el monitoreo de sequías agrícolas, un enfoque que no se destacó en los artículos anteriores.

Por otro lado, la solución [27], que es un producto comercial, permite a los agricultores monitorizar desde cualquier dispositivo el estado actual de sus cultivos y realizar una gestión integral para la toma de decisiones. Este sistema se centra en la monitorización continua de los cultivos y en la posibilidad de acceder a la información en cualquier momento a través de internet. Los autores del artículo [28] aplicaron este enfoque a una región específica que ha experimentado varias sequías en los últimos años. Este trabajo se centra en la Cuenca Panónica, una región de Europa que ha experimentado varias sequías en los últimos años, causando grandes pérdidas de rendimiento.

El artículo [29] argumenta que se necesita un cambio en la manera en que se informa sobre los gases invernadero que producen los cultivos agrícolas para reflejar mejor los roles distintos de los diferentes gases de efecto invernadero. Este trabajo se distingue por su enfoque en los gases de carbono y una diferencia clara entre el dióxido de carbono y el metano, siendo este último el que es relevante a la hora de hablar de cultivos

agropecuarios. Complementando este enfoque, el artículo [30] proporciona una visión general de los sistemas de teledetección, las técnicas y los índices de vegetación junto con sus aplicaciones recientes (2015-2020) en la agricultura de precisión. Este trabajo se distingue por su enfoque en la teledetección como una herramienta para la agricultura de precisión, incluyendo el monitoreo de cultivos y la predicción del rendimiento. Así que, en resumen, tenemos dos trabajos que abordan diferentes aspectos de la agricultura: uno se centra en la emisión de gases de efecto invernadero y el otro en la teledetección para la agricultura de precisión.

Lo que diferencia el proyecto actual a los anteriormente mencionado es el enfoque principal el cual es el cultivo de café y además de ser un sistema de monitoreo de variables ambientales, también posee una generación de alarmas con el fin de avisar al usuario de alguna falencia o exceso de una de las variables monitoreadas, por ejemplo, si la variable es la humedad y esta es muy alta, se le avisará al usuario que la humedad es alta por medio de una alerta.

3 Marco teórico

Para la investigación de los temas relevantes del proyecto se decidió separar esta sección en 3 partes fundamentales para su desarrollo, siendo estas las siguientes:

3.1 El café y su importancia

El café es una de las bebidas más populares en todo el mundo, apreciada no solo por su sabor y aroma, sino también por su capacidad para estimular y revitalizar a quienes lo consumen. Esta bebida ha trascendido fronteras y culturas, convirtiéndose en un elemento fundamental en la vida diaria de millones de personas.

Colombia es un productor de café a nivel global, reconocida por la calidad de su grano, que se cultiva en las montañas del país, donde el clima y la altitud son ideales. El café no solo es un cultivo agrícola crucial para la economía colombiana, sino que también tiene un papel significativo en la identidad cultural del país.

La producción de café en Colombia genera millones de empleos y es una fuente vital de ingresos para miles de familias campesinas [11]. Además, el café colombiano es considerado un producto premium en el mercado internacional, lo que contribuye al prestigio y la visibilidad de Colombia en el ámbito agrícola global. Esta reputación se ha consolidado a lo largo de los años, gracias a prácticas sostenibles y métodos de producción de alta calidad que han sido transmitidos de generación en generación [16].

Dependiendo de la región, existen diferentes tipos de café que se cultivan en Colombia, cada uno con características únicas de sabor y aroma como se verá a continuación:

3.1.1 Variedades de café

Existen diversos tipos de café que se pueden cultivar, según sus características genéticas, morfológicas, fisiológicas, productivas y de calidad. Existen muchas variedades de café, pero no todas se adaptan a las mismas condiciones ambientales y de manejo. Por eso, es importante elegir la variedad más adecuada para cada zona y objetivo de producción.

Según Nutresa [31] y “la tienda del café” [32] recomiendan algunas variedades que han demostrado buen rendimiento y calidad en diferentes regiones de Colombia.

3.1.1.1 *Café Arábica (Coffea arabica)*

El café arábico es la variedad más cultivada tanto en Colombia como en el mundo, representando alrededor del 70-80% de la producción mundial. La producción exclusiva de café arábica en Colombia ha sido clave para consolidar su reputación de calidad excepcional en el mercado global, gracias a las características que diferencian a este tipo de café de otras variedades [33].

Este café es valorado por su perfil de sabor suave y complejo, en el que se destacan notas afrutadas, florales y achocolatadas. Además, posee una acidez moderada a alta que realza su delicadeza y permite una experiencia de sabor refinada, lo que lo convierte en una opción preferida para los conocedores y consumidores que buscan calidad en cada taza [32].

- **Subvariedades comunes en Colombia:**

- **Typica:** Esta es una de las variedades más antiguas y tradicionales de arábica en Colombia, conocida por su sabor dulce y acidez balanceada.
- **Bourbon:** Con un perfil de sabor afrutado y un cuerpo pleno, esta variedad es valorada por sus notas complejas y su acidez brillante.
- **Caturra:** Es una mutación natural del Bourbon, más resistente y compacta, con un sabor dulce y una acidez marcada.
- **Castillo:** Desarrollada específicamente en Colombia para resistir enfermedades como la roya, mantiene un perfil de sabor balanceado, aunque con menos complejidad que el Typica o Bourbon. [34]
- **Colombia:** También desarrollada en Colombia, esta subvariedad es apreciada por su resistencia y su buena calidad de sabor.

3.1.1.2 *Café Robusta (Coffea canephora)*

En Colombia, aunque la producción de café robusta es limitada en comparación con el arábica, en los últimos años se ha impulsado su cultivo en ciertas regiones de clima cálido y altitudes bajas. Esto ha permitido diversificar la oferta cafetera del país, ofreciendo una alternativa a la variedad arábica que tradicionalmente ha sido predominante.

El café robusto se caracteriza por su sabor fuerte y menos complejo, con notas terrosas y un toque amargo. Su perfil también se distingue por tener casi el doble de cafeína en comparación con el arábica, lo que le otorga un cuerpo denso y un sabor más intenso, ideal para quienes buscan un café con mayor potencia.

Gracias a su resistencia y menor costo de producción, el robusta es ampliamente utilizado en mezclas de café y es un ingrediente común en la producción de café instantáneo. Su robustez y perfil de sabor le permiten complementar las mezclas, aportando cuerpo y una estructura más firme en productos donde la durabilidad y el costo son factores importantes.

Por último, cabe resaltar que el café producido en la finca viene de la variedad “Castillo”, los caficultores comentaron que se plantó esta variedad por su bajo costo de plantación y resistencia a bajas temperaturas que pueden causar algunas enfermedades.

3.2 Sistemas de monitoreo

Un sistema de monitoreo, según dice Franklin W. Kirk en su libro de “Instrumentación y Procesos de Control” [35], es un conjunto de instrumentos y dispositivos que recopilan datos sobre las condiciones de un proceso y los transmiten a un sistema de control. Estos datos pueden incluir mediciones de temperatura, presión, nivel, flujo y otras variables relevantes para el proceso. Los sistemas de monitoreo pueden ser utilizados en

También, un sistema de monitoreo suele tener una estructura organizada en capas que facilita la captura, transmisión, procesamiento y visualización de datos:

-
- ```

graph TD
 P((P)) --> Sensores
 T((T)) --> Sensores
 Ruido((Ruido)) --> Sensores
 SOx((SOx)) --> Sensores
 NOx((NOx)) --> Sensores
 CO2((CO2)) --> Sensores
 Luz((Luz)) --> Sensores
 Sensores --> Adquisición
 Adquisición --> Potencia
 Potencia --> Comunicaciones
 Potencia --> Control
 Potencia --> GNSS
 Potencia --> Nubosidad
 Comunicaciones --> Almacenamiento
 Comunicaciones --> Internet
 Internet --> ControlRemoto[Control remoto y repositorio central]
 ControlRemoto --> Internet
 Almacenamiento --> Control
 Control --> GNSS
 Control --> Nubosidad
 GNSS --> Control
 GNSS --> Adquisición
 GNSS --> Potencia
 GNSS --> Nubosidad
 Nubosidad --> Control
 Nubosidad --> Adquisición
 Nubosidad --> Potencia
 Nubosidad --> Sensores

```

11 | P á g i n a

### 3.3 Telemetría

Según el libro “Principios de Instrumentación Electrónica y Telemetría” de Gustavo Adolfo Meneses Benavides [37], la telemetría es un proceso que permite la medición y recopilación de datos en ubicaciones remotas o inaccesibles y su transmisión a equipos de recepción para su monitoreo. La telemetría se utiliza en una amplia gama de campos, incluyendo:

- **Industria:** Para el monitoreo y control de sistemas complejos como plantas de energía, oleoductos y redes de distribución de agua.
- **Medicina:** Para el monitoreo remoto de pacientes, permitiendo a los médicos mantener un registro constante de las condiciones de salud de los pacientes sin tener que estar físicamente presentes.
- **Meteorología:** Para recopilar datos sobre el clima y las condiciones atmosféricas de ubicaciones remotas. Investigación científica: Para recopilar datos de experimentos y estudios a distancia.
- **Agricultura:** Para monitorear las condiciones del suelo y el clima en los campos, lo que permite a los agricultores hacer Antecedentes

Además, esta consta de varios componentes clave, como se puede observar en la Ilustración 2, que permiten la medición, transmisión y recepción de datos desde ubicaciones remotas siendo estos el concepto fundamental de tecnologías de telemetría:

- **Sensores:** Son dispositivos que detectan variables específicas (temperatura, presión, humedad, entre otras) en el entorno donde se realiza la medición. Los sensores son fundamentales en la telemetría porque convierten las magnitudes físicas en señales eléctricas.
- **Unidad de Adquisición de Datos:** Esta unidad recibe las señales de los sensores y las convierte en datos digitales o analógicos. La unidad puede incluir un microcontrolador o microprocesador que organiza y preprocesa la información antes de su transmisión.
- **Transmisor:** El transmisor envía los datos procesados a través de medios de comunicación como radiofrecuencia, redes móviles, o internet. La elección del medio depende de la distancia, el entorno y los recursos disponibles.
- **Receptor:** Este componente recibe los datos enviados desde el transmisor y los dirige hacia los sistemas de monitoreo. El receptor debe estar adaptado al tipo de señal que se está utilizando.
- **Sistema de Almacenamiento y Procesamiento de Datos:** Aquí se almacenan y procesan los datos recibidos. En muchos sistemas modernos, este proceso se realiza en servidores o en la nube, donde los datos pueden ser analizados para obtener información detallada y relevante.
- **Interfaz de Usuario (UI):** A través de la UI, los operadores o usuarios pueden monitorear y visualizar los datos en tiempo real o analizarlos históricamente. Esta interfaz puede ser un panel físico, una aplicación web o móvil.

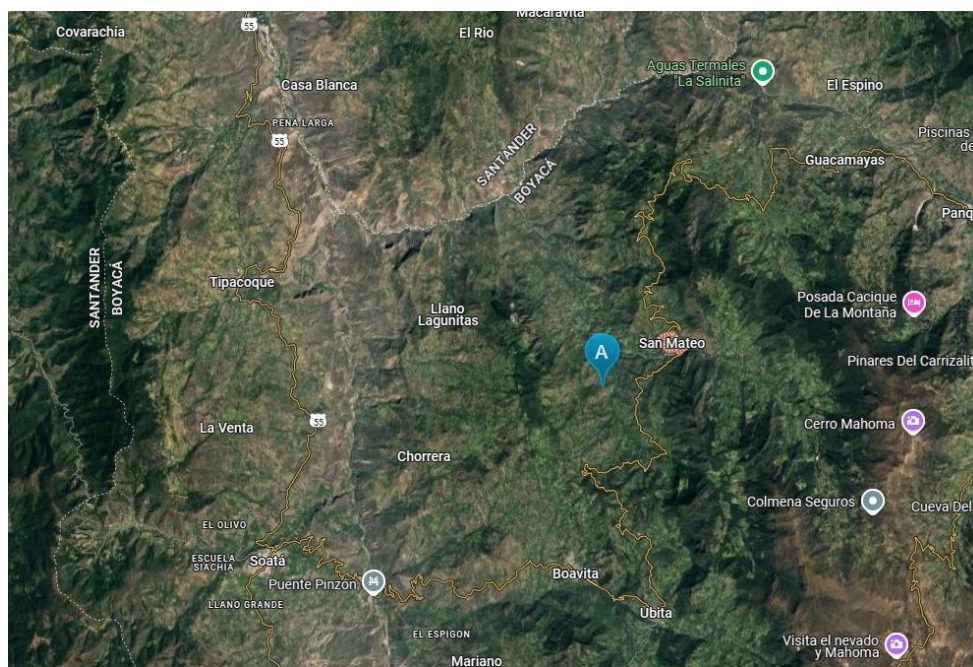


*Ilustración 2 – Componentes de un sistema de telemetría [38]*

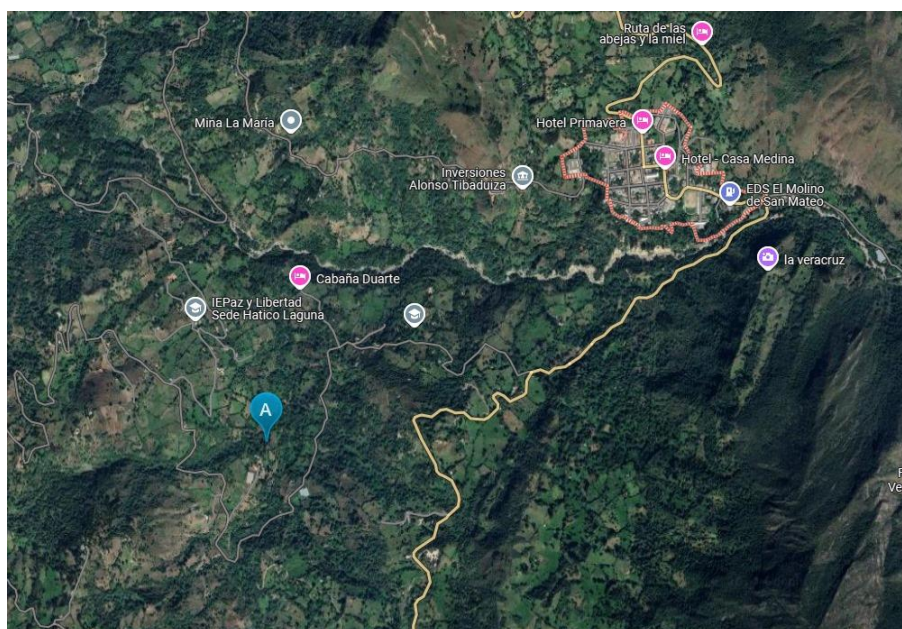
## 4 Metodología

### 4.1 Caracterización de la finca

En esta sección, se describirá el entorno físico de la finca poniendo como detalles fundamentales las variables ambientales que esta posee:



*Ilustración 3 - Ubicación finca desde vista satelital. Fuente: Google Maps*



*Ilustración 4 - Ubicación finca contra el pueblo de San Mateo. Fuente: Google Maps*



*Ilustración 5 - Ubicación de la finca. Fuente: Google Maps*

*Tabla 1 - Caracterización de la finca. Fuente: Autoría propia*

|                                             |                           |
|---------------------------------------------|---------------------------|
| Nombre de la finca                          | "El Cascajal"             |
| Departamento                                | Boyacá                    |
| Municipio                                   | San Mateo                 |
| Altura                                      | 2050 msnm                 |
| Extensión                                   | 4 hectáreas               |
| Suelos                                      | Montaña                   |
| Precipitación                               | 1.100 mm - 1.400 mm       |
| Temperatura promedio                        | 21°C                      |
| Variedad de café                            | Castillo                  |
| Numero de plantas de café                   | 900                       |
| Plantas frutales ubicadas en los cultivos   | Banano, Naranja           |
| Plantas frutales ubicadas fuera del cultivo | Limón, Guayaba y aguacate |

Según como lo muestra en el informe presentado por la alcaldía de San Mateo, Boyacá basados en datos del IDEAM [39] el municipio no posee una estación climatología que pueda permitir tomar datos en sitio y tener un histórico de los mismos. Por ende, este trabajo de grado pretende ayudar tanto a monitorizar los datos de la finca como generar un histórico de datos en sitio con el fin de realizar un análisis más detallado.

## 4.2 Variables a tener en cuenta en un cultivo de café

El café es una planta tropical que se cultiva en regiones cálidas y húmedas, y produce granos valiosos que se encuentran dentro de los frutos rojos, comúnmente conocidos como cerezas, que crecen en arbustos de café. Al madurar, estas cerezas adquieren un color rojizo brillante, señal de que los granos en su interior están listos para la cosecha. Estos granos son los que, tras un cuidadoso proceso de recolección, secado y tostado, se transforman en el café que se consume, apreciado por su sabor, aroma y propiedades energizantes. Algunos de los factores que influyen en el crecimiento y cultivo del café son:

Tabla 2- Parámetros de adaptación del café Fuente: [40]

| PARAMETROS DE ADAPTABILIDAD Y RANGO DE ADAPTACION |                         |
|---------------------------------------------------|-------------------------|
| Piso Altitudinal                                  | 500-1700 msnm           |
| Temperatura (Optima)                              | 21 ° C                  |
| Rango (Máximo y Mínimo)                           | 17 ° - C 23 ° C         |
| Humedad relativa                                  | 85%                     |
| pH Suelo                                          | 5 - 5,5                 |
| Textura Suelo                                     | F, Fa                   |
| Fotoperiodo                                       | 5-12 h/día (con sombra) |
| Precipitación optima                              | 1000-3000 mm anuales    |
| Topografía                                        | Menor al 10 %           |

Con estos factores fundamentales que tiene un cultivo de café vistos en Tabla 2, se decidió enfocarse en la temperatura, humedad, humedad de suelo y precipitación debido a la importancia que tienen estas variables tanto para el cultivo como para las personas de la finca. Ellos tienen en cuenta estas variables de una manera perceptiva, exclusivamente por los sentidos y las tradiciones o costumbres adquiridas debido al comportamiento previo de las variables involucradas, por ejemplo, el campesino puede observar que la tierra esta árida pero no determina un valor conceptual del mismo para su análisis y correlación con otras.

Esto se confirma con los siguientes puntos principales según el artículo del vivero “Flores y Frutos” [41] al igual que en la guía de cultivo de café ICAFE [42]:

- La temperatura es fundamental porque afecta directamente el metabolismo de las plantas de café. Las temperaturas estables entre 18 y 25°C son ideales para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la luz solar en energía. Si las temperaturas caen por debajo o suben por encima de este rango, la tasa de fotosíntesis puede disminuir, lo que a su vez puede afectar el crecimiento y la producción de las plantas de café [43].
- La humedad ambiente juega un papel importante en el mantenimiento de la turgencia de las plantas, que es la absorción de agua de las células vegetales encargadas esencialmente para su estructura y rigidez. Además, la humedad facilita la transpiración, un proceso que ayuda a transportar el agua y los nutrientes desde las raíces hasta las hojas. Una humedad relativa del 60% al 80% es ideal para el café. Si la humedad es demasiado baja, las plantas pueden deshidratarse. Por otro lado, una humedad demasiado alta puede crear un ambiente propicio para el desarrollo de enfermedades fúngicas.
- La humedad del suelo es crucial porque las plantas de café necesitan agua para sobrevivir y crecer. El agua es absorbida por las raíces de las plantas y luego transportada a las hojas donde se utiliza en la fotosíntesis. Un suelo bien drenado es ideal para el café porque evita que las raíces se asfixien debido a un exceso de agua. Además, un suelo demasiado seco puede limitar la disponibilidad de agua para las plantas, lo que puede afectar su crecimiento y rendimiento.
- La precipitación proporciona el agua necesaria para el crecimiento de las plantas y la formación de los frutos. El café necesita una precipitación anual de entre 1500 y 2500 mm. Sin embargo, la distribución de la precipitación a lo largo del año es igualmente importante. Un período seco es necesario para la floración y la formación de los frutos, ya que permite que las flores se polinicen y que los frutos se desarrollen sin ser lavados por la lluvia.

Si estos parámetros no se cumplen se pueden ocasionar diferentes enfermedades. Según el mismo ICAFE [42] y la CICAPE [44] estas son algunas enfermedades que se pueden generar, según su causa:

1. Temperatura:
  - Baja Temperatura: *Hemileia vastatrix* (roya del cafeto).
  - Alta Temperatura: *Cercospora coffeicola* (mancha de hierro).
2. Humedad Ambiente:
  - Baja Humedad: *Colletotrichum kahawae* (antracnosis).
  - Alta Humedad: *Cercospora coffeicola* (mancha de hierro) y *Hemileia vastatrix* (roya del cafeto).
3. Humedad del Suelo:
  - Baja Humedad del Suelo: *Phytophthora spp.* (pudrición de raíces).
  - Alta Humedad del Suelo: *Phytophthora spp.* (pudrición de raíces).
4. Precipitación:
  - Baja Precipitación: *Colletotrichum kahawae* (antracnosis).

- Alta Precipitación: *Cercospora coffeicola* (mancha de hierro) y *Hemileia vastatrix* (roya del cafeto).

Ahora, una breve descripción de las enfermedades anteriormente mencionadas centrándose en la causa, los síntomas y el impacto que tienen en un cultivo de café:

1. Roya del Cafeto (*Hemileia vastatrix*):

- Causa: Es un hongo que afecta las hojas del cafeto.
- Síntomas: Manchas amarillas en las hojas que se vuelven marrones y desarrollan una textura polvorienta.
- Impacto: Reduce la fotosíntesis y afecta la calidad del grano.

2. Mancha de Hierro (*Cercospora coffeicola*):

- Causa: Otro hongo que afecta las hojas.
- Síntomas: Manchas redondas de color marrón en las hojas.
- Impacto: Puede debilitar la planta y afectar la producción.

3. Antracnosis (*Colletotrichum kahawae*):

- Causa: Un hongo que afecta hojas, ramas y frutos.
- Síntomas: Manchas oscuras en las hojas y lesiones en los frutos.
- Impacto: Puede causar defoliación y reducir el rendimiento.

4. Pudrición de Raíces (*Phytophthora spp.*):

- Causa: Diversos patógenos que afectan las raíces.
- Síntomas: Marchitamiento, amarillamiento y muerte de las plantas.
- Impacto: Reducción del crecimiento y la producción.

### 4.3 Investigación y selección de sensores

En este capítulo, se analizarán los diferentes tipos de sensores para los factores anteriormente mencionados con el objetivo de reconocer cuales son los adecuados para el desarrollo del proyecto basados en su costo, rango y precisión. Para ello, se realizó una comparación con sensores que tengan un rango de funcionamiento acorde a las variables ambientales vistas en la sección 4.2 para un cultivo de café además de que su costo sea bajo y su precisión sea adecuada.

#### 4.3.1 Sensores de temperatura y humedad ambiente.

En el ámbito de la agricultura, los sensores de humedad y temperatura ambiente integrados con Arduino ofrecen beneficios significativos. Estos dispositivos permiten a los agricultores monitorear los niveles de humedad y temperatura en sus campos o invernaderos. Esta información es crucial para manejar el riego, ajustar la ventilación y asegurar condiciones ideales de crecimiento para los cultivos. Además, ayudan a detectar y prevenir problemas como el crecimiento de moho y hongos, que pueden dañar las plantas. En resumen, los sensores de humedad y temperatura son herramientas fundamentales en aplicaciones agrícolas, permitiendo un control preciso del ambiente para mejorar la productividad y la salud de los cultivos. A continuación, se listan los siguientes sensores comerciales para hacer la respectiva comparación como se ve en la Tabla 3:

Tabla 3 - Comparativa de sensores temperatura y humedad de suelo. Fuente: Autoría propia

| Sensor     | Rango de humedad | Precisión de humedad | Rango de temperatura | Precisión de temperatura | Costo     | Imagen                                                                                                                |
|------------|------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DHT11 [45] | 20% - 80%        | ±5%                  | 0°C - 50°C           | ±2°C                     | \$ 12.500 | <br><i>Ilustración 6 - DHT11</i> |
| DHT22 [46] | 0% - 100%        | ±2-5%                | -40°C - 80°C         | ±0.5-2°C                 | \$ 30.000 | <br><i>Ilustración 7 - DHT22</i> |

|             |           |     |               |        |           |                                                                                                                            |
|-------------|-----------|-----|---------------|--------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SHT31 [47]  | 0% - 100% | ±2% | -40°C - 125°C | ±0.3°C | \$ 30.000 |  <p><i>Ilustración 8 - SHT31</i></p>    |
| BME280 [48] | 0% - 100% | ±3% | -40°C - 85°C  | ±1°C   | \$ 31.500 |  <p><i>Ilustración 9 - BME280</i></p>   |
| Si7021 [49] | 0% - 80%  | ±3% | -40°C - 125°C | ±0.4°C | \$ 23.000 |  <p><i>Ilustración 10 - Si7021</i></p> |
| AHT10 [50]  | 0% - 100% | ±3% | -40°C - 85°C  | ±0.3°C | \$ 14.000 |  <p><i>Ilustración 11 - AHT10</i></p> |

De todos estos se decidió por el sensor AHT10 debido a que ofrece una combinación de precisión, rango de medición, facilidad de integración y bajo costo, lo que lo convierte en una opción competitiva para proyectos que requieren mediciones precisas de temperatura y humedad.

Por ello, aunque el DHT11 es un sensor económico, su precisión es considerablemente baja y su rango de temperatura es limitado. Esto lo hace menos adecuado para aplicaciones que requieren mediciones confiables y precisas. También el DHT22 tiene un rango de temperatura similar al AHT10, su precisión en temperatura es variable y su costo es significativamente más alto, lo que no justifica su elección frente al AHT10. Además, el SHT31 ofrece una precisión en temperatura equivalente y un rango más amplio, su costo es significativamente mayor. La diferencia en precisión de humedad no justifica la inversión extra en comparación con el AHT10. El BME280 tiene el mismo rango de medición que el AHT10, pero es menos preciso en la medición de temperatura y su costo es más alto. Por lo tanto, el AHT10 resulta ser una opción superior en costo-beneficio. El Si7021 tiene un rango de temperatura amplio, su precisión es ligeramente

inferior al AHT10 y su costo es más alto. Esto hace que el AHT10 sea una opción más eficiente en términos de costo y precisión.

El AHT10 es la mejor opción en comparación con los otros sensores debido a su balance entre bajo costo, alta precisión y rango de medición adecuado para la mayoría de las aplicaciones. Los otros sensores o bien tienen una menor precisión, un rango de temperatura o humedad más limitado, o un costo significativamente mayor que no se justifica por una mejora sustancial en el rendimiento.

### 4.3.2 Sensores de detección de lluvia

Los sensores de lluvia, como el FC-37 y el YL-83, detectan la presencia de agua a través de cambios en la conductividad al entrar en contacto con el líquido. Estos dispositivos son sencillos y cuentan con dos contactos y pistas conductoras entrelazadas que, al mojarse, establecen un contacto eléctrico que puede ser analizado. Incluyen una placa de medición estándar con un comparador LM393, lo que permite realizar lecturas tanto analógicas como digitales. La salida digital se activa cuando la humedad supera un umbral ajustable mediante un potenciómetro [51]. Estos sensores son versátiles y se utilizan en diversas aplicaciones, como la extensión de toldos, la activación de alarmas o el registro de precipitaciones. Es fundamental proteger los contactos y componentes eléctricos del circuito para prevenir cortocircuitos. Además, los sensores de lluvia son económicos y fáciles de conectar a un Arduino, facilitando la lectura del estado del sensor y la ejecución de las acciones correspondientes en presencia de lluvia. A continuación, en la Tabla 4 se ven los sensores comerciales encontrados:

Tabla 4-Comparativa de sensores de detección de lluvia. Fuente: Autoría propia

| Sensor               | Voltaje de Operación | Salida de Corriente | Dimensiones | Costo    | Imagen                                                                                                                   |
|----------------------|----------------------|---------------------|-------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>FC-37</b><br>[52] | 3.3 a 5 VDC          | 15mA                | 5cm x 4cm   | \$ 5.000 | <br><i>Ilustración 12 - FC37</i>     |
| <b>YL-83</b>         | 3.3 a 5 VDC          | 10mA                | 54 x 40mm   | \$ 5.900 | <br><i>Ilustración 13 - YL 83</i>   |
| <b>MH-RD</b><br>[53] | 3.3 a 5 VDC          | 15mA                | 55 x 40mm   | \$ 6.000 | <br><i>Ilustración 14 - MH – RD</i> |

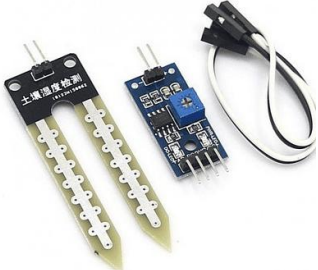
Se decidió utilizar el sensor YL-83 ya que era el más accesible y de gran tamaño entre los anteriores mencionados, además de que posee una mayor capacidad de resistencia a la oxidación.

Aunque el FC-37 tiene especificaciones similares en cuanto a voltaje de operación y dimensiones, consume más corriente (15 mA frente a 10 mA) y tiene un costo ligeramente mayor. Esto lo hace menos eficiente y más caro que el YL-83. El MH-RD también tiene un mayor consumo de corriente (15 mA), y su costo es el más alto de los tres sensores. Aunque sus dimensiones son similares, su mayor costo y consumo lo hacen menos atractivo.

### 4.3.3 Sensores de humedad de suelo

Los sensores de humedad de suelo están compuestos por una sonda de dos electrodos y un módulo comparador, puede entregar señales digitales o analógicas. Calibrando los valores análogos que entrega el sensor podemos obtener una mayor precisión a la hora de recibir los datos además de que es vital en el proyecto para saber en qué momento es necesario regar el cultivo.

Tabla 5- Comparativa sensores humedad de suelo. Fuente: Autoría propia

| Sensor                 | Voltaje de Operación | Salida de Corriente | Salida              | Ajuste de Sensibilidad      | Costo   | Imagen                                                                                                                    |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>YL-69</b><br>[54]   | 3.3V ~ 5V            | 35mA                | Digital y analógica | Ajustable con potenciómetro | \$6.900 | <br><i>Ilustración 15 - YL 69 [50]</i> |
| <b>SEN0193</b><br>[55] | 3,3 ~ 5,5 V CC       | 5mA                 | Analógica           | Ajustable por código        | \$9.000 | <br><i>Ilustración 16 - SEN0193</i>  |

El módulo Sensor Humedad del suelo Capacitivo Higrómetro con Salida Análoga o como se conoce como el SEN0193 está especialmente diseñado para tener más resistencia a la corrosión y realizar medidas confiables en el largo plazo. Esto lo hace un sensor ideal, aunque sean un poco más costoso, hace que producto dure más sin necesidad de realizar un mantenimiento continuo, además de que se puede ajustar por código mejorando así su precisión a la hora de la toma de datos.

Entonces, el YL-69 consume más corriente (35 mA) y solo permite ajustes de sensibilidad manuales mediante un potenciómetro. Esto limita su flexibilidad en aplicaciones donde se requiere un ajuste más fino. Además, su diseño resistivo lo hace más susceptible a la corrosión en ambientes de alta humedad. Por ende, el SEN0193 que es un sensor de humedad de suelo capacitivo que destaca por su bajo consumo de corriente y su precisión. Su ajuste de sensibilidad es digital (por código), lo que permite configuraciones más precisas y programables, siendo ideal para aplicaciones que requieren un control específico [56].

#### 4.3.4 Sensores de precipitación

Para el uso de un sensor de precipitación económico lo primero que se realizó fue la búsqueda y obtención del dispositivo en el cual se basa para el sensado de precipitación. En este caso se encontró un pluviómetro de 40 mm o 40 l/m<sup>2</sup> tal y como se ve en la imagen:



*Ilustración 17- Pluviómetro Fuente: [57]*

Se realizó la investigación de diferentes tecnologías para poder recibir el dato de precipitación, entre ellas están:

- Sensor de ultrasonido
- Por medio de balanza

Como el pluviómetro que se consiguió es cónico, se puede descartar el sensor de ultrasonido debido a que las medidas y las distancias varían en el pluviómetro teniendo así que desarrollar un modelo con mucho procesamiento para obtener datos precisos.

Entonces se decidió utilizar una balanza la cual sensará el peso de un milímetro de agua y de esta manera se podrá determinar con una mayor exactitud las medidas que se pueden observar analógicamente.

### 4.3.5 Calibración de sensores

Para la calibración se utilizó un termohigrómetro referencia 408466 como se puede observar en la Ilustración 18 y en la Ilustración 19, cuya última verificación por parte de la ONAC (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - Ac. 26 #57-83, Bogotá) [58] fue realizado el 19/09/2024 siguiendo los procedimientos para ello, determinando que la fecha de próxima calibración fuese el 24/06/2025, cumpliendo con los parámetros de idoneidad y eficiencia del dispositivo para tal efecto.

Este dispositivo fue prestado por la Clínica de la Mujer (Cra. 19C No. 91-17, Bogotá) y corresponde al activo fijo No. 8748 para realizar el procedimiento de calibración exclusivamente.



Ilustración 18 - Termohigrómetro. Fuente: Autoría propia



Ilustración 19 - Certificación de la ONAC. Fuente: Autoría propia

Para realizar este proceso se procedió a capturar una serie de datos (muestra de 20 [veinte], lo que representa un conjunto de datos que iniciaron a las 18:29:40 y finalizaron a las 21:39:43 del día 26 de noviembre de 2024) proporcionados por el trabajo de grado, de los sensores de temperatura y humedad respectivamente. De igual forma y de manera unísona se tomaron datos manuales del dispositivo (*outdoor*) obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6 - Comparación entre patrón y módulo de sensores. Fuente: Autoría propia

| #  | hora     | Trabajo de Grado |         | Termohigrómetro Calibrado ONAC |         | % error     |         |
|----|----------|------------------|---------|--------------------------------|---------|-------------|---------|
|    |          | Temperatura      | Humedad | Temperatura                    | Humedad | Temperatura | Humedad |
| 1  | 18:29:40 | 21.37            | 63.18   | 21.10                          | 62.00   | 1.3%        | 1.9%    |
| 2  | 18:39:40 | 21.38            | 63.71   | 21.20                          | 63.00   | 0.8%        | 1.1%    |
| 3  | 18:49:40 | 21.40            | 64.82   | 21.10                          | 62.00   | 1.4%        | 4.5%    |
| 4  | 18:59:40 | 21.39            | 65.13   | 21.10                          | 63.00   | 1.4%        | 3.4%    |
| 5  | 19:09:41 | 21.35            | 65.53   | 21.10                          | 63.00   | 1.2%        | 4.0%    |
| 6  | 19:19:41 | 21.31            | 65.99   | 21.10                          | 63.00   | 1.0%        | 4.7%    |
| 7  | 19:29:41 | 21.30            | 66.10   | 21.10                          | 63.00   | 0.9%        | 4.9%    |
| 8  | 19:39:41 | 21.26            | 66.07   | 21.10                          | 63.00   | 0.8%        | 4.9%    |
| 9  | 19:49:41 | 21.20            | 66.49   | 21.00                          | 63.00   | 1.0%        | 5.5%    |
| 10 | 19:59:41 | 21.11            | 66.50   | 20.80                          | 63.00   | 1.5%        | 5.6%    |
| 11 | 20:09:42 | 21.03            | 66.78   | 20.80                          | 64.00   | 1.1%        | 4.3%    |
| 12 | 20:19:42 | 21.07            | 67.14   | 21.00                          | 64.00   | 0.3%        | 4.9%    |
| 13 | 20:29:42 | 21.07            | 67.01   | 21.30                          | 64.00   | 1.1%        | 4.7%    |
| 14 | 20:39:42 | 21.11            | 66.91   | 21.10                          | 64.00   | 0.0%        | 4.5%    |
| 15 | 20:49:42 | 21.12            | 67.06   | 21.10                          | 64.00   | 0.1%        | 4.8%    |
| 16 | 20:59:42 | 21.11            | 67.07   | 21.10                          | 64.00   | 0.0%        | 4.8%    |
| 17 | 21:09:42 | 21.08            | 67.07   | 20.90                          | 64.00   | 0.9%        | 4.8%    |
| 18 | 21:19:42 | 21.05            | 67.02   | 20.90                          | 64.00   | 0.7%        | 4.7%    |
| 19 | 21:29:43 | 21.00            | 66.92   | 21.00                          | 64.00   | 0.0%        | 4.6%    |
| 20 | 21:39:43 | 20.96            | 66.99   | 21.00                          | 64.00   | 0.2%        | 4.7%    |

Con base en la Tabla 6, se determina que el porcentaje de error registrado para el sensor de temperatura en realmente muy bajo, lo que indica que el sensor utilizado en el trabajo supera las expectativas para este tipo de elemento dado su bajo precio y prestaciones en general. En lo que respecta al sensor de humedad se puede establecer que el error máximo fue de 5.6% es decir una diferencia entre 66.50 y 63.00 (+3.5% precisión) lo que se considera aceptable dadas las especificaciones ofrecidas por el *datasheet* del mismo (véase 4.3.1).

## 4.4 Desarrollo del prototipo

En este capítulo se describe el proceso de diseño y construcción del prototipo propuesto para la implementación de un sistema de monitoreo agrícola automatizado.

### 4.4.1 Arquitectura del sistema de monitoreo

Este sistema consta de tres módulos principales: el módulo de sensores, el módulo de comunicación y el módulo de servidor, como se ve en la Ilustración 20. La arquitectura principal del sistema será una arquitectura centralizada ya que, según el artículo [59], esta estructura es beneficiosa porque permite que los dispositivos recojan datos y los envíen a un servidor central o la nube para su procesamiento y almacenamiento. Además de facilitar la gestión a hora de comunicarse garantizando la eficacia y la coherencia en la comunicación. El módulo de sensores, integrado por un microcontrolador y diversos sensores, se ubica en el área de cultivo, donde recopila datos en tiempo real sobre variables ambientales clave. Estos datos se transmiten mediante un *router*, estratégicamente ubicado en un espacio exterior libre de obstáculos, hacia un módulo de servidor en el que se procesan y almacenan. Este último, situado en una zona interior protegida y equipado con un procesador y una fuente de energía ininterrumpida (UPS), asegura la continuidad del sistema incluso en caso de fallos eléctricos.

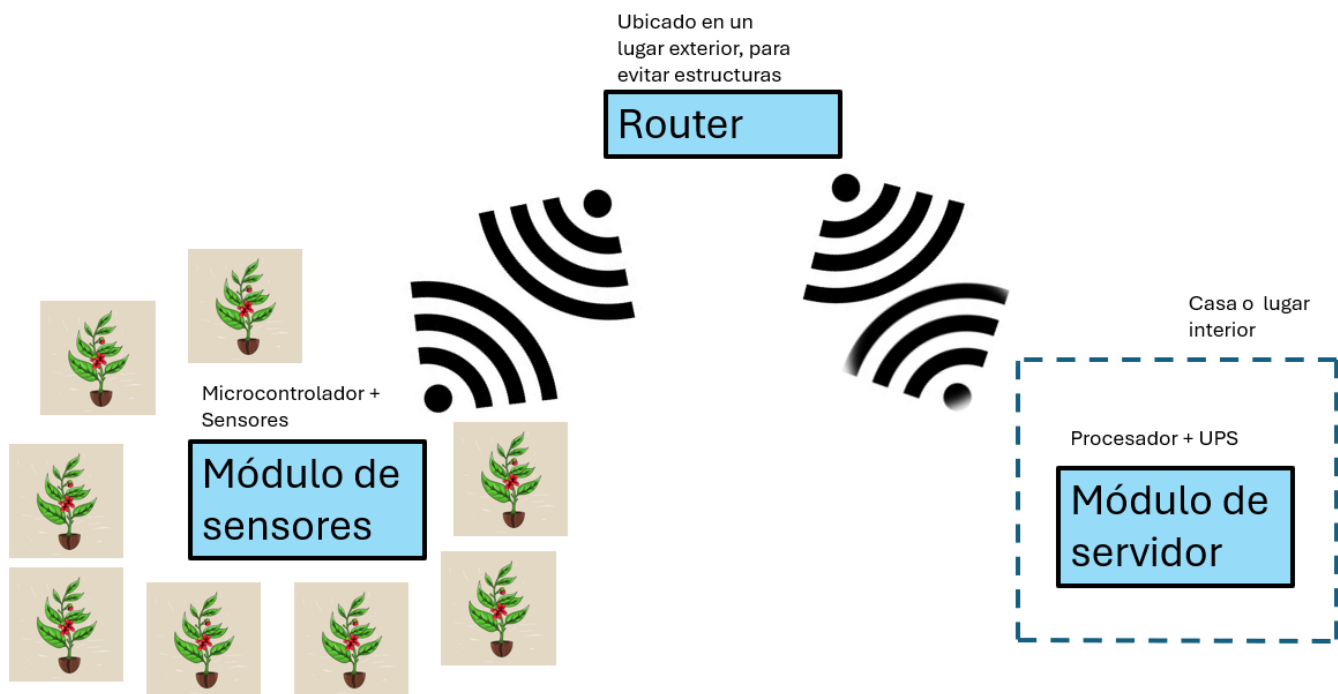


Ilustración 20 - Arquitectura del proyecto – Fuente: Autoría Propia

## 4.4.2 Selección de hardware

El microcontrolador que se va a utilizar en el módulo de sensores será la ESP32 [60] y el procesador que se encargará de mantener y guardar los datos del servidor será el T95, ahora se explicarán algunas características:

- ESP 32

Se decidió escoger este microcontrolador por su versatilidad y su bajo costo, además de que se puede programar con la plataforma de Arduino IDE donde existen varias librerías haciendo más ágil la programación.

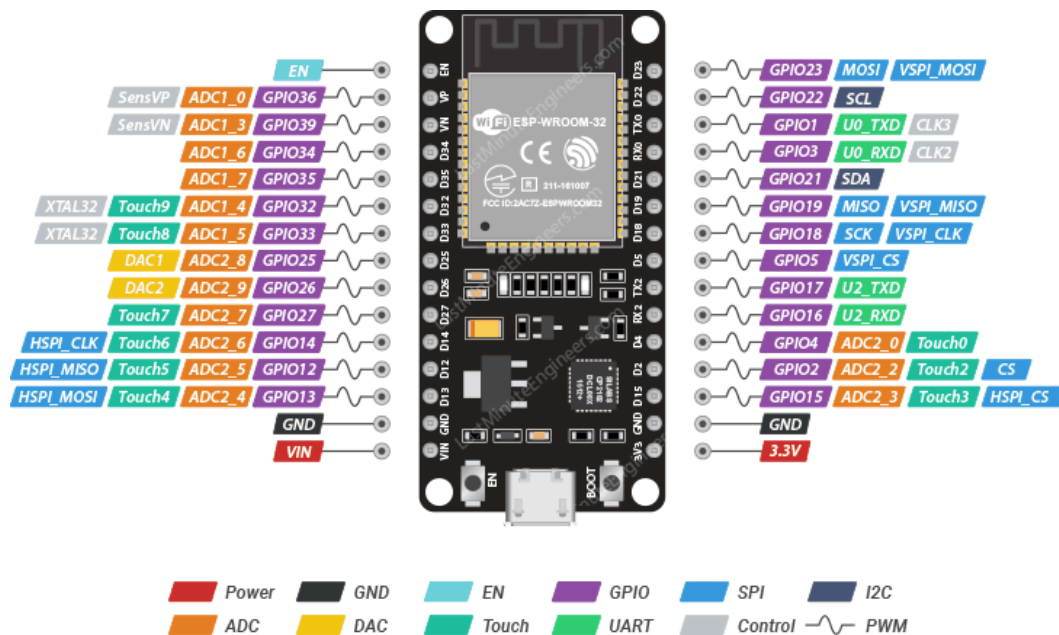


Ilustración 21- PinOut ESP32 Fuente: LastMinuteEngineers.com

Para realizar una comparación entre la ESP32 y otros dispositivos, se pueden ver en la Tabla 7:

Tabla 7 - Comparación entre microcontroladores Fuente: Autoría propia

| Microcontrolador              | Núcleos | Velocidad de Reloj | Memoria Flash | Memoria RAM | wifi | Bluetooth | Precio Aproximado | Aplicaciones                            |
|-------------------------------|---------|--------------------|---------------|-------------|------|-----------|-------------------|-----------------------------------------|
| ESP32 [61]                    | 2       | 240 MHz            | Hasta 16 MB   | 520 KB      | Si   | Si        | \$25.800          | IoT, domótica, sensores inalámbricos    |
| ESP8266 [62]                  | 1       | 80 – 160 MHz       | Hasta 4MB     | 160 KB      | Si   | No        | \$18.800          | IoT básico, control remoto.             |
| Arduino Uno (ATmega328P) [63] | 1       | 16 MHz             | 32 KB         | 2 KB        | No   | No        | \$40.000          | Prototipos básicos, control de motores, |

|                |   |        |             |        |    |    |          |                                                                 |
|----------------|---|--------|-------------|--------|----|----|----------|-----------------------------------------------------------------|
|                |   |        |             |        |    |    |          | proyectos educativos                                            |
| STM32F103 [64] | 1 | 72 MHz | 64 – 128 KB | 264 KB | No | No | \$23.800 | Control industrial, sistemas embebidos, aplicaciones de control |

Y la comparativa que se puede realizar frente al microcontrolador más económico que se investigó (ESP8266) [65] es que la esp32 es más robusta teniendo una mayor cantidad de pines GPIO con múltiples funcionalidades además de 8 canales de lectura de sensores analógicos [66], dando la oportunidad de manejar los datos recibidos de los sensores de manera fiable. Y aunque su costo sea elevado, este proporciona una mayor velocidad de conexión wifi y un mayor ciclo de vida.

- TV Box T95

El TV Box T95 es un dispositivo que cuenta con un sistema operativo Android y 4 GB de RAM, así como 32 GB de almacenamiento. También puede funcionar como un dispositivo portátil para almacenar datos, permitiendo su uso similar al de un ordenador. Se eligió este dispositivo por su costo y funcionalidad, especialmente al considerar la gestión de datos. A continuación, se presenta en la Tabla 8 la comparación de los precios de diferentes dispositivos contemplados como posible solución, un pc normal de bajas especificaciones, un computador de bajo tamaño y el TV Box:

Tabla 8- Comparación de procesadores para servidor Fuente: Autoría propia

| Nombre del dispositivo       | Procesador            | Ram  | Puertos                                                                     | Costo     | Imagen                                                                                                                              |
|------------------------------|-----------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Raspberry Pi 4 Modelo B [67] | Quad Core Cortex-A72. | 4 Gb | 4 puertos USB, 40 Pines GPIO, 2 pines micro HDMI, Conexión wifi y bluetooth | \$345,100 |  <p><i>Ilustración 22 - Raspberry pi 4</i></p> |

|                            |                       |     |                                                    |           |                                                                                                                             |
|----------------------------|-----------------------|-----|----------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lenovo ThinkPad X131e [68] | AMD E1 2500U APU.     | 4Gb | 3 USB 3.0, 1 HDMI, 1 VGA y conexión RJ45           | \$380,000 |  <p>Ilustración 23 - Lenovo ThinkPad</p> |
| TV Box T95 [69]            | Quad Core cortex-A53. | 4Gb | 2 USB 2.0, 1 HDMI y conexión RJ45 y conexión wifi. | \$160,000 |  <p>Ilustración 24 - T95</p>             |

El T95 procesa los datos y puede albergar el servidor que mantiene una página web, lo que facilita la visualización y el análisis de la información. Además, contribuye a mejorar el análisis de datos y permite almacenar la información de manera segura, evitando su pérdida. Y como un plus, es más económico que los otros sistemas anteriormente comparados

#### 4.4.3 Selección de software

Las aplicaciones que se usaron para el desarrollo del proyecto fueron las siguientes:

- Termux

Es una aplicación de fácil acceso la cual emula una terminal de consola Linux en el dispositivo (TV Box T95) funcionando en el sistema operativo Android siendo ideal a la hora de ejecutar y crear el servidor además q

- Apache:

Se decidió usar apache por su compatibilidad, estabilidad y flexibilidad. Es un servidor web de código abierto ampliamente compatible con múltiples plataformas y lenguajes de programación, lo que permite una configuración personalizada y un rendimiento confiable para sitios web de cualquier tamaño

- Página web (PHP)

Una página web es lo que usuario ve cuando digita una *url* valida en cualquiera de los navegadores de internet actuales p.ej: *chrome*, *internet explorer*, *Brave*, *Mozilla*, *Opera*, etc., estos están disponibles para su uso, a través de algún dispositivo físico que se conecte a internet o red local (creada como en este trabajo de grado)

como un computador, tableta, celular, etc. La página web pudo ser creada utilizando diferentes lenguajes de programación (p.ej: *java*, *javascript*, *php*, *Python*, etc.) y cada uno de ellos puede utilizar o no diferentes *frameworks* (plantillas de trabajo), adicionalmente esta debe estar alojada en un servidor web. Para el trabajo de grado se utilizó el lenguaje de programación PHP para crear una página web; adicionalmente esta debe ser ejecutada en un servidor web, para este trabajo de grado se utilizó Apache [70]. Además de que es compatible con Apache, es flexible y funciona con diferentes tipos de bases de datos haciendo que se carguen los elementos de manera ágil y sin generación de fallos.

- MariaDB

Es una base de datos compatible con varios lenguajes de programación y sistemas operativos. También tiene un mayor rendimiento a la hora de realizar consultas y no tiene costo de licencia haciéndolo ideal como base de datos en el proyecto.

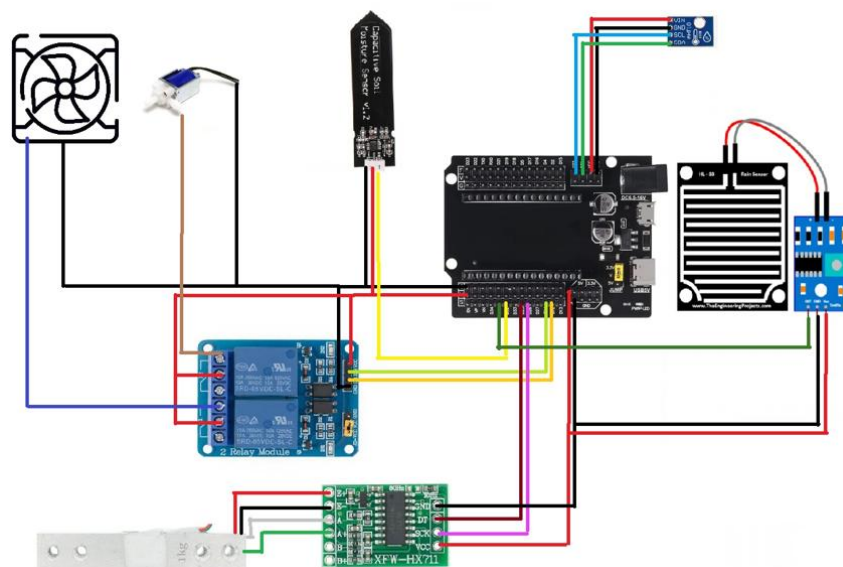
#### 4.4.4 Conexión del dispositivo

El proyecto, ilustrado en la Ilustración 25, se compone de un módulo de sensores autónomo. Este módulo recopila datos de temperatura, humedad ambiental, precipitación y humedad del suelo. Gracias a un panel solar y una batería, puede operar de forma independiente, incluso durante la noche.

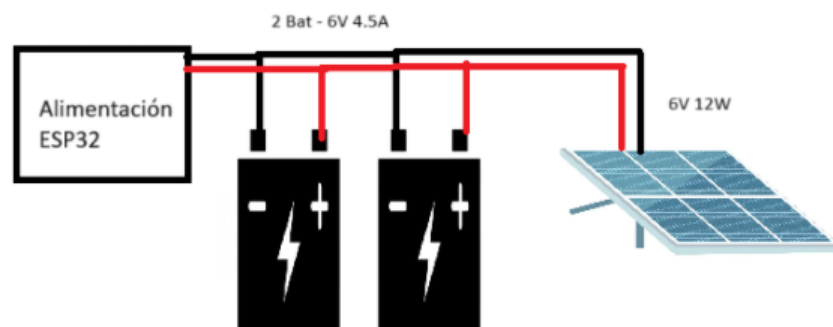
La comunicación entre el módulo y el servidor se establece mediante un *router* wifi con un alcance de 100 metros en campo abierto. Los datos recopilados por el módulo son transmitidos al servidor y almacenados en una base de datos MariaDB.

Finalmente, una página web visualiza los datos en gráficas y genera alertas basadas en los umbrales establecidos por la Federación Nacional de Cafeteros. Esta herramienta permite monitorear las condiciones ambientales y tomar decisiones informadas.

Para ello se realizó la siguiente conexión para el módulo de sensores



*Ilustración 25 - Conexiones Módulo de sensores Fuente: Autoría Propia*



*Ilustración 26 - Alimentación módulo de sensores Fuente: Autoría propia*

A través de mediciones con un multímetro, se cuantificó el consumo eléctrico de cada componente del sistema. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9. Con base en estos datos, se puede determinar

que para realizar la carga completa de las baterías además de alimentar el módulo durante el día se necesitaría de un panel proporcione 27 Wh, por ende, se seleccionó un panel solar de 6v – 12w para alimentar el módulo de sensores en un tiempo aproximado de carga de las baterías de 2 horas y media, además una mini UPS de 500 VA para el equipo T95 (un servidor de datos). Esta configuración garantiza la continuidad de las operaciones del T95, manteniendo la fecha y hora programadas incluso ante cortes de energía. Los cálculos indican que los módulos pueden funcionar de manera autónoma durante aproximadamente 2 día en condiciones de baja luminosidad, mientras que el servidor puede mantenerse encendido durante 4 horas sin suministro eléctrico.

*Tabla 9 - Consumos del proyecto Fuente: Autoría propia*

| Elemento | Elemento(s)                  | Voltaje (V) | Amperios (A) | Vatios (Wh) |
|----------|------------------------------|-------------|--------------|-------------|
| 1        | T95 + ventilador             | 5           | 0,90         | 4,5         |
| 1        | Repetidor                    | 9           | 0,37         | 3,33        |
| 1        | Total: T95 + Repetidor       |             | 1,27         | 7,83        |
| 2        | Conjunto Sensores - voltaje1 | 6,5         | 0,80         | 5,2         |
|          | voltaje2                     | 5           | 0,30         |             |

## 4.4.5 Desarrollo de software

El corazón del proyecto reside en la página web escrita en PHP para el servidor y se programó el módulo de sensores en C++. A continuación, se describirá paso a paso cómo funciona el código, para ello se dividió la explicación en el módulo de sensores y los diferentes archivos que están contenidos en el servidor.

### 4.4.5.1 *Módulo de sensores*

Para la programación, se optó por Arduino IDE, una plataforma que ofrece un entorno de desarrollo intuitivo y una extensa colección de librerías. Estas características resultaron fundamentales para configurar la ESP32, gestionar la comunicación con el servidor donde se almacenan los datos obtenidos.

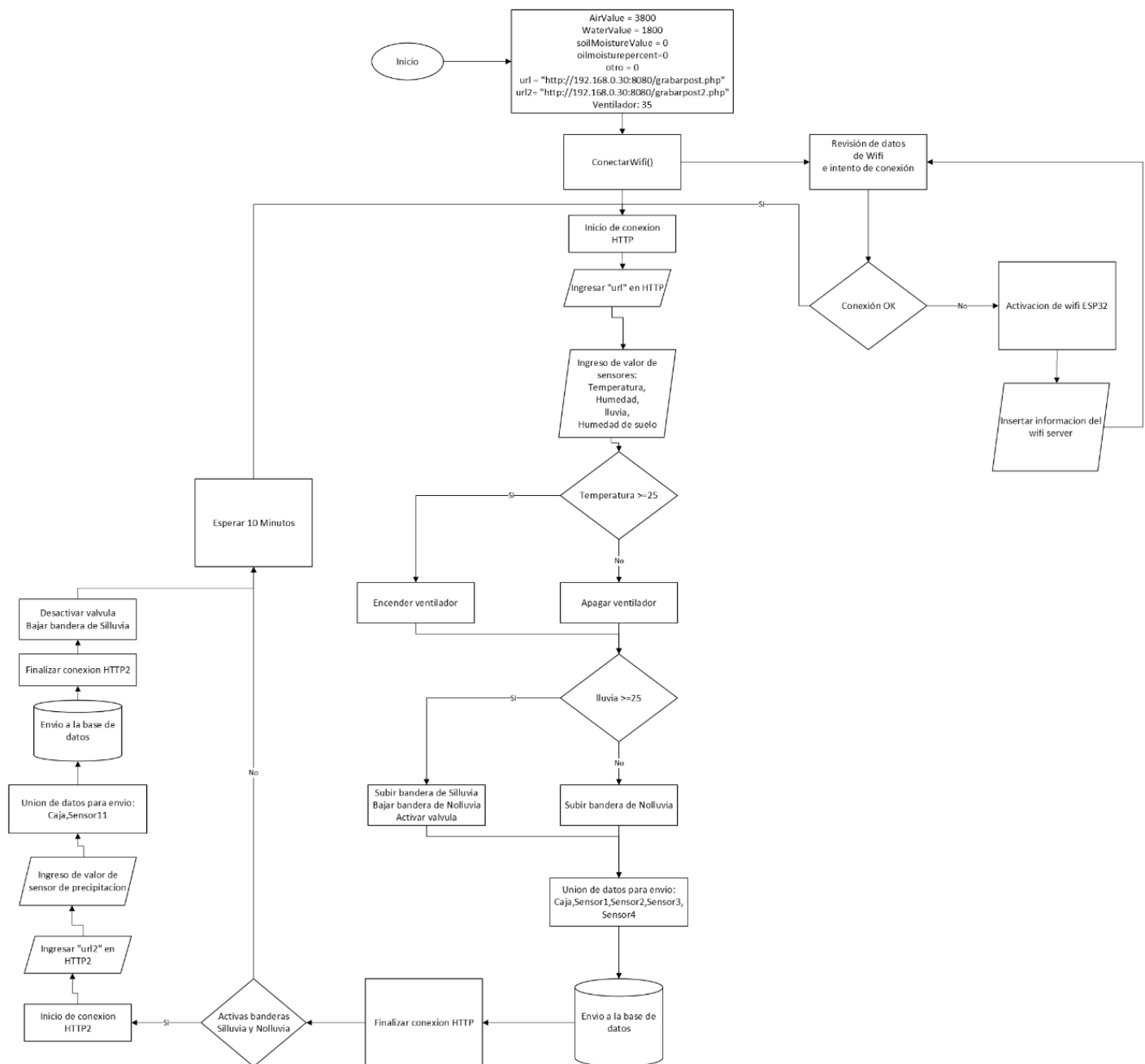
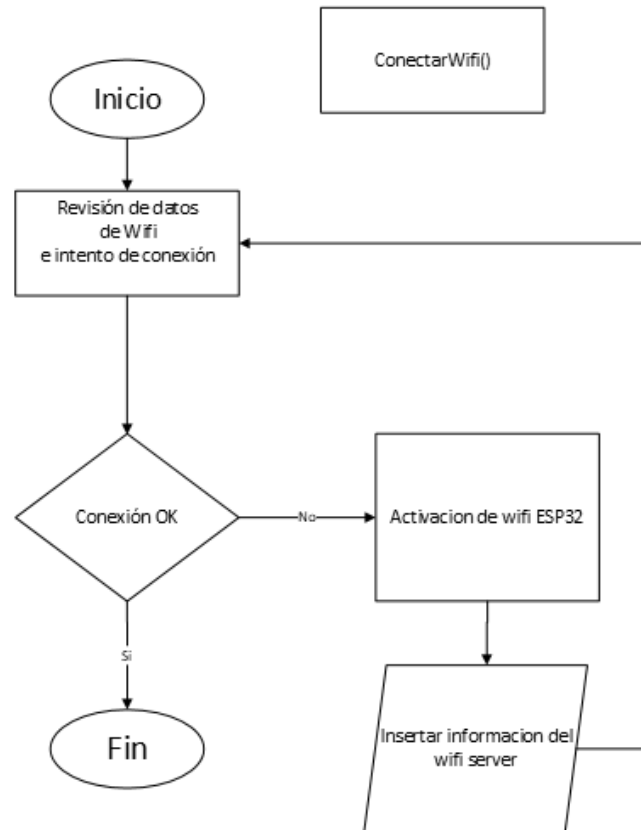


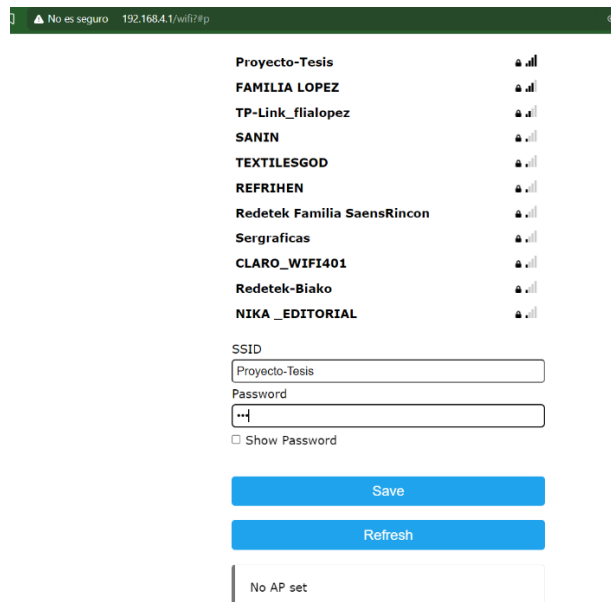
Ilustración 27 - Diagrama de flujo – Arduino Fuente: Autoría Propia

Como se ve en la Ilustración 27, el código implementado en la ESP32 tiene como objetivo principal enviar datos al servidor de manera confiable y constante. Se ha establecido un tiempo de muestreo de 10 minutos, considerando que los cambios en las condiciones climáticas suelen ser graduales y no requieren una medición excesivamente frecuente como lo comprueba el artículo de Morantes [71].

Ya pasando al código, primero se va a hablar referente a la conexión wifi que tiene el dispositivo de manera automática con el servidor. El código hace uso de librerías diseñadas para establecer la conexión con el servidor y manejar la configuración de la red Wifi. Estas librerías facilitan la interacción con el *router*.



*Ilustración 28 – Diagrama de flujo Conectar wifi Fuente: Autoría Propia*



*Grafica 1 - Interfaz de conexión wifiManager Fuente Autoría propia*

Se ha implementado un sistema de gestión de redes wifi simplificado, denominado 'wifi Manager'. Este sistema detecta automáticamente redes disponibles y permite a la ESP32 generar su propia red para facilitar la conexión inicial. De esta manera, se garantiza una conexión estable y automática, incluso en caso de desconexiones o reinicios.

```
//Lib arduino
#include <HTTPClient.h>
#include <Adafruit_AHTX0.h>
#include "HX711.h"
#include <EEPROM.h>

// Funciones creadas
#include <Otro.h>

//Definiciones
#define pinrele 12
#define zero 13
#define valvula 14
#define CLK 25
#define DT 26
#define suelo 32
#define Lluvia 35

Adafruit_AHTX0 aht;
HX711 balanza;
```

*Ilustración 29 - Librerías código principal Fuente: Autoría propia*

```

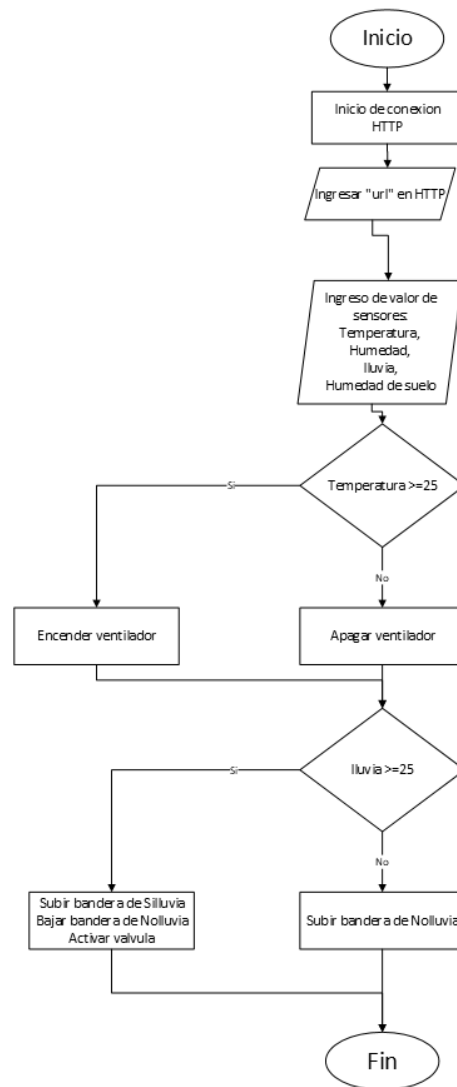
//Variables
float peso1mm = 4.443;
float peso,Milimetro,pesoA;
long escala = 900;
const int AirValue = 3800;
const int WaterValue = 1800;
int soilMoistureValue = 0;
int soilmoisturepercent=0;
int otro = 0 ;
int A = 0;
int B = 0;
int Nolluvia = 0;
int Silluvia = 0;
int state_zero = 0;
int last_state_zero = 0;
int prueba = 0;

//Variables Post
String url = "http://192.168.0.30:8080/grabarpost.php";
String url2 = "http://192.168.0.30:8080/grabarpost2.php";
String nombre = "Tarjeta1";
int valor=0;

```

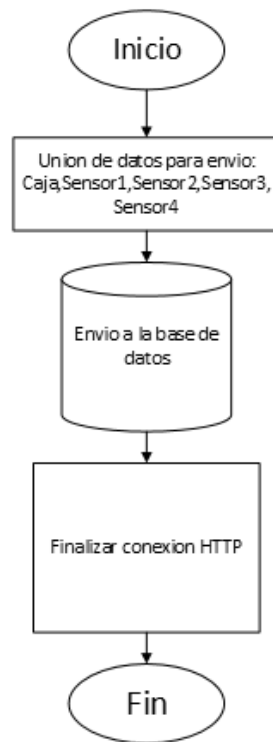
*Ilustración 30 - Librerías código principal 2 Fuente: autoría propia*

En el código principal se encuentran las librerías fundamentales para el funcionamiento del sistema. La librería Adafruit AHT10 se encarga de la comunicación I2C con el sensor de humedad y temperatura, mientras que las librerías cliente HTTP y envío POST permiten enviar los datos recopilados a un servidor remoto y la librería de HX711 se encarga de manejar la comunicación con el sensor de peso para la precipitación. Además, se declaran las variables que almacenarán los valores leídos de los sensores restantes y otros datos relevantes para el proceso de envío.



*Ilustración 31 - Diagrama de flujo de envío sensores y conexiones / Fuente: Autoría propia*

En la parte principal del código se configura una conexión HTTP con un protocolo de cabecera adecuado para enviar los datos recopilados. La librería de Adafruit se utiliza para leer los valores del sensor de humedad y temperatura de forma asíncrona mediante eventos. El sensor de humedad del suelo se calibra para obtener una lectura precisa, mapeando los valores obtenidos en aire seco y en agua. Además, se implementa un mecanismo para limitar los valores de humedad a un rango válido (0-100%). El sensor de detección de lluvia se calibra de manera similar para determinar el porcentaje de humedad. Y para el sensor de precipitación, se utilizó la ayuda del sensor de detección de lluvia para determinar el momento en el que el sensor de precipitación debe realizar el sensado y de esta manera no poseer información irrelevante. Además de tener una comparación de temperatura, la cual, si es mayor a 25°, se activa un ventilador para mantener la temperatura interna del módulo y mantener el ciclo de vida de las baterías [72].



*Ilustración 32 – Diagrama de flujo de envío de Post Fuente: autoría propia*

En la siguiente parte del código, se observan los datos que se van a enviar al servidor por medio de un post que llevarán por nombre “postdata”, la cual une todos los sensores, iniciando por el número de la caja. Del uno al cinco, los sensores y, finalmente, la posdata general la cual une todos los anteriores para realizar un envío de POST. Lo último que se puede observar es el serial, el cual nos imprime un código HTTP de verificación, que es el número 200. Además, imprime todos los valores de los sensores para verificar que los datos enviados sean correctos. Se cierra la conexión, pero si existe un estado anterior de lluvia, se abrirá una nueva conexión HTTP el cual enviará el dato de precipitación por medio de POST a otro archivo PHP y se establece un tiempo de muestreo, como ya se había mencionado anteriormente, de 10 minutos.

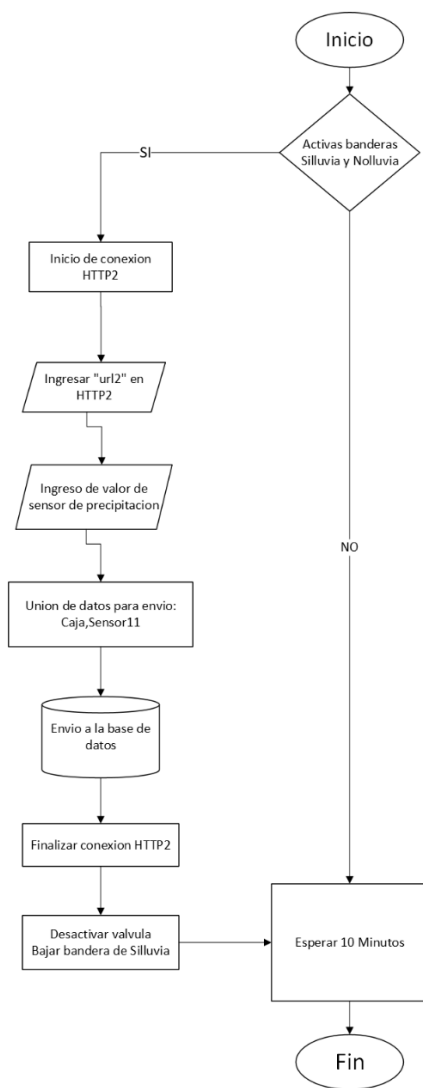


Ilustración 33 - Envío de dato de precipitación Fuente: autoría propia

A continuación, se muestra una prueba de conexión con la ESP y los sensores, demostrando su correcto funcionamiento en el envío.

```

*wm:STA IP Address: 192.168.0.32
Ya estas conectado
Adafruit AHT10/AHT20 demo!
AHT10 or AHT20 found
200
caja=1
23.51
41.68
9
0
0

```

Ilustración 34 - Envío de información por serial Fuente: autoría propia

#### 4.4.5.2 Módulo de servidor – Preparación de hardware

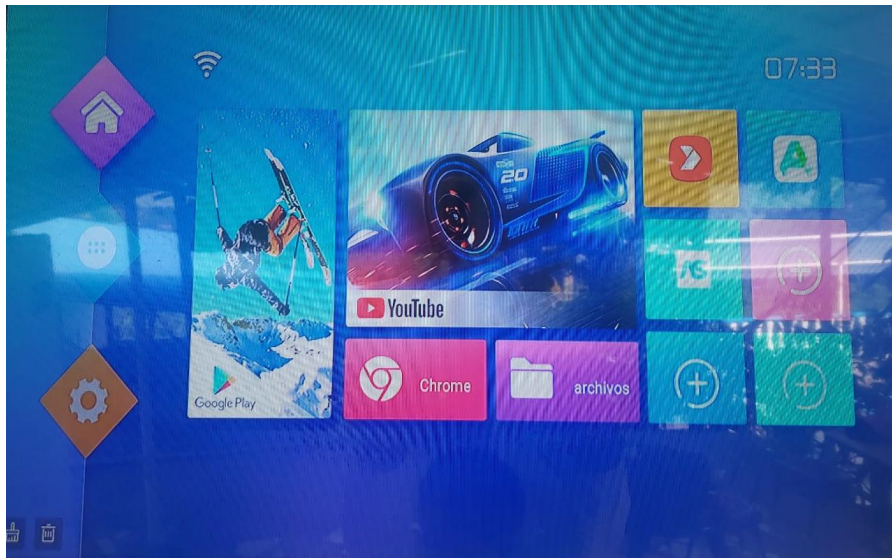


Ilustración 35 - Interfaz T95 Fuente: autoría propia

Se seleccionó un dispositivo Android de gama media como base para el servidor debido a su bajo costo y amplia disponibilidad. Este dispositivo fue actualizado a la versión Android 9 mediante una conexión por cable LAN para garantizar la estabilidad y seguridad del sistema. Posteriormente, se instaló Termux, una herramienta de línea de comandos que permite ejecutar una amplia variedad de aplicaciones Linux en dispositivos Android. Termux proporcionó el entorno de desarrollo necesario para configurar el servidor web, la base de datos y otros servicios requeridos.

```
Welcome to Termux!

Docs: https://termux.dev/docs
Donate: https://termux.dev/donate
Community: https://termux.dev/community

Working with packages:

- Search: pkg search <query>
- Install: pkg install <package>
- Upgrade: pkg upgrade

Subscribing to additional repositories:

- Root: pkg install root-repo
- X11: pkg install x11-repo

For fixing any repository issues,
try 'termux-change-repo' command.

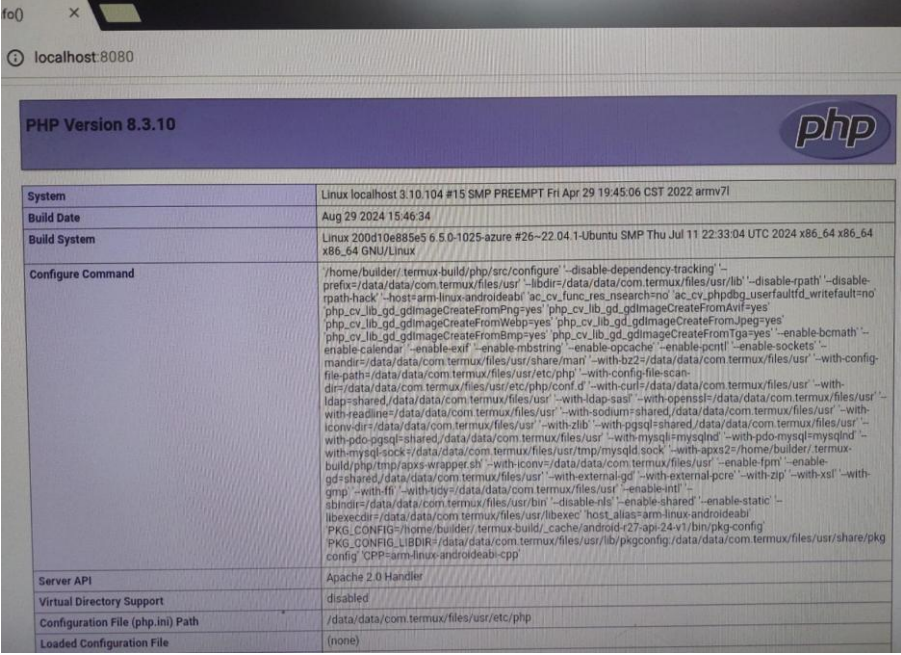
Report issues at https://termux.dev/issues
~ $
```

Ilustración 36 - Interfaz Termux Fuente: autoría propia

En el entorno descrito, se llevó a cabo la instalación de un servidor web Apache y un sistema de gestión de bases de datos MariaDB. Para ello, se emplearon el comando: `apt install apache2 PHP mariadb PHPmyadmin`. A continuación, se configuró el servidor Apache modificando los archivos de configuración en la carpeta `http` para establecer la ruta correcta de los archivos del sitio web, además con ese comando también se instalaron PHP y PHPMyAdmin, herramientas que permiten una interacción más amigable con la base de datos y facilitan la extracción y análisis de datos en formato CSV.

Se lleva a cabo una configuración personalizada de MariaDB para obtener información detallada sobre su versión y origen (MariaDB). Además, se instala y configura PHPMyAdmin, una herramienta de administración de bases de datos, en un entorno separado. Para acceder a PHPMyAdmin, es necesario establecer una conexión a un puerto específico. La organización de los archivos de configuración y datos de los tres servicios se basa en una estructura de directorios definida.

Se realizó una comprobación de la conectividad del servidor T95 mediante el comando `ifconfig`. La dirección IP obtenida como resultado de este comando es: `192.168.0.30`. Se desarrolló un archivo PHP básico con el objetivo de visualizarlo en el servidor. Para acceder a este archivo, se utilizó la dirección URL `http://192.168.0.30:8080`. Al realizar esta solicitud, se obtuvo la siguiente página web como resultado.



|                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PHP Version 8.3.10                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| System                            | Linux localhost 3.10.104 #15 SMP PREEMPT Fri Apr 29 19:45:06 CST 2022 armv7l                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Build Date                        | Aug 29 2024 15:46:34                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Build System                      | Linux 200d10e885e5 6.5.0-1025-azure #26-22.04.1-Ubuntu SMP Thu Jul 11 22:33:04 UTC 2024 x86_64 x86_64 GNU/Linux                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Configure Command                 | <code>/home/builder/termux-build/php/src/configure '--disable-dependency-tracking' '--prefix=/data/data/com.termux/files/usr' '--libdir=/data/data/com.termux/files/usr/lib' '--disable-path' '--disable-path-hack' '--host=arm-linux-androideabi' '--ac_cv_func_research=no' '--ac_cv_phpdbg_userfaultfd_writefault=no' 'php_cv_lib_gd_gdimageCreateFromPng=yes' 'php_cv_lib_gd_gdimageCreateFromAvif=yes' 'php_cv_lib_gd_gdimageCreateFromWebp=yes' 'php_cv_lib_gd_gdimageCreateFromJpeg=yes' 'php_cv_lib_gd_gdimageCreateFromBmp=yes' 'php_cv_lib_gd_gdimageCreateFromTga=yes' '--enable-bcmath' '--enable-calendar' '--enable-exif' '--enable-mbstring' '--enable-openssl' '--enable-pcntl' '--enable-sockets' '--mandir=/data/data/com.termux/files/usr/share/man' '--with-bz2=/data/data/com.termux/files/usr' '--with-config-file-path=/data/data/com.termux/files/usr/etc/php' '--with-config-file-scan-dir=/data/data/com.termux/files/usr/etc/php/conf.d' '--with-curl=/data/data/com.termux/files/usr' '--with-ldap=shared:/data/data/com.termux/files/usr' '--with-ldap-sasl' '--with-openssl=/data/data/com.termux/files/usr' '--with-readline=/data/data/com.termux/files/usr' '--with-sodium=shared:/data/data/com.termux/files/usr' '--with-iconv-dir=/data/data/com.termux/files/usr' '--with-zlib' '--with-pgsql=shared:/data/data/com.termux/files/usr' '--with-pdo-pgsql=shared:/data/data/com.termux/files/usr' '--with-mysql=mysqlnd' '--with-pdo-mysql=mysqlnd' '--with-mysql-sock=/data/data/com.termux/files/usr/tmp/mysql.sock' '--with-apxs2=/home/builder/termux-build/php/tmp/apxs-wrapper.sh' '--with-iconv=/data/data/com.termux/files/usr' '--enable-fpm' '--enable-gd=shared:/data/data/com.termux/files/usr' '--with-external-gd' '--with-external-pcre' '--with-xml' '--with-xmlrpc' '--with-ffi' '--with-tidy=/data/data/com.termux/files/usr' '--enable-intl' '--libexecdir=/data/data/com.termux/files/usr/bin' '--disable-elf' '--enable-shared' '--enable-static' '--libexecdir=/data/data/com.termux/files/usr/libexec' 'host_alias=arm-linux-androideabi' 'PKG_CONFIG=/home/builder/termux-build/_cache/android-27-api-24-v1/bin/pkg-config' 'PKG_CONFIG_LIBDIR=/data/data/com.termux/files/usr/lib/pkgconfig:/data/data/com.termux/files/usr/share/pkgconfig' 'CPP=arm-linux-androideabi-cpp'</code> |
| Server API                        | Apache 2.0 Handler                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Virtual Directory Support         | disabled                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Configuration File (php.ini) Path | /data/data/com.termux/files/usr/etc/php                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Loaded Configuration File         | (none)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Ilustración 37 - Pagina básica en PHP Fuente: autoría propia

Para facilitar la programación remota del dispositivo T95, se habilitó el servicio SSH. Se creó un usuario con una contraseña específica para acceder al dispositivo a través de este protocolo. Utilizando la aplicación MobaXterm, se estableció una conexión SSH al puerto 8022 del T95. Una vez dentro, se inició el servicio de MariaDB, configurándolo para ejecutarse en segundo plano como un demonio sin afectar la integridad de la conexión de la siguiente manera.

```

~ $ mariabdb-safe -u root &
[1] 1913
~ $ 241015 10:33:59 mysqld_safe Logging to '/data/data/com.termux/files/usr/var/lib/mysql/localhost.err'.
241015 10:34:00 mysqld_safe Starting mariabdb daemon with databases from /data/data/com.termux/files/usr/var/lib/mysql

~ $ mariadb -u root
ERROR 2002 (HY000): Can't connect to local server through socket '/data/data/com.termux/files/usr/var/run/mysql.sock' (111)
~ $ mariadb -u root
Welcome to the MariaDB monitor. Commands end with ; or \g.
Your MariaDB connection id is 3
Server version: 11.5.2-MariaDB MariaDB Server

Copyright (c) 2000, 2018, Oracle, MariaDB Corporation Ab and others.

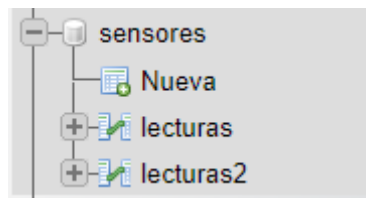
Type 'help;' or '\h' for help. Type '\c' to clear the current input statement.

MariaDB [(none)]> █

```

*Ilustración 38 - Inicio de mariadb Fuente: autoría propia*

Al acceder a la instancia de MariaDB, se procedió a crear una contraseña para el usuario root el cual permitirá acceder a la interfaz de administración de bases de datos PHPMyAdmin, que utiliza la siguiente dirección URL: <http://192.168.0.30:8080/PHPmyadmin>. Es importante destacar que, debido a la configuración actual del servidor Apache, se puede ingresar a PHPMyAdmin utilizando el usuario 'root' tanto en usuario como en contraseña. Se crea la base de datos con nombre sensores, la cual consta de dos tablas como se ve en la Ilustración 39



*Ilustración 39 - Estructura de la base de datos Fuente: autoría propia*

En este entorno se configuran los nombres de las columnas y el tipo de dato que van a poseer en la Tabla 10 donde se guardaran los sensores de temperatura y humedad ambiente, humedad de suelo y detección de lluvia como en la Tabla 11 donde se guardan los valores del sensor.

Tabla 10 – Estructura Lecturas 1 Fuente: Autoría Propia

| #                          | Nombre         | Tipo         | Cotejamiento       | Atributos | Nulo | Predeterminado | Comentarios | Extra          | Acción                |
|----------------------------|----------------|--------------|--------------------|-----------|------|----------------|-------------|----------------|-----------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | <b>id</b>      | bigint(20)   |                    |           | No   | Ninguna        |             | AUTO_INCREMENT | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 2 | <b>caja</b>    | varchar(1)   | utf8mb4_unicode_ci |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 3 | <b>sensor1</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 4 | <b>sensor2</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 5 | <b>sensor3</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 6 | <b>sensor4</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 7 | <b>sensor5</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 8 | <b>fechabd</b> | datetime     |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 9 | <b>vista</b>   | varchar(1)   | utf8mb4_unicode_ci |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |

Tabla 11 – Estructura Lecturas 2 Fuente: Autoría Propia

| #                          | Nombre          | Tipo         | Cotejamiento       | Atributos | Nulo | Predeterminado | Comentarios | Extra          | Acción                |
|----------------------------|-----------------|--------------|--------------------|-----------|------|----------------|-------------|----------------|-----------------------|
| <input type="checkbox"/> 1 | <b>id</b>       | bigint(20)   |                    |           | No   | Ninguna        |             | AUTO_INCREMENT | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 2 | <b>caja</b>     | varchar(1)   | utf8mb4_unicode_ci |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 3 | <b>sensor11</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 4 | <b>sensor12</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 5 | <b>sensor13</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 6 | <b>sensor14</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 7 | <b>sensor15</b> | decimal(5,2) |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 8 | <b>fechabd2</b> | datetime     |                    |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |
| <input type="checkbox"/> 9 | <b>vista</b>    | varchar(1)   | utf8mb4_unicode_ci |           | Sí   | NULL           |             |                | Cambiar  Eliminar Más |

Para crear un usuario que permita acceder a la base de datos desde cualquier dispositivo o servicio externo a Localhost, es necesario ingresar a la siguiente dirección `/data/data/com.Termux/files/usr/etc` como se ve en la Ilustración 40. Una vez allí, se muestran los archivos, tal como se puede ver en la imagen siguiente.

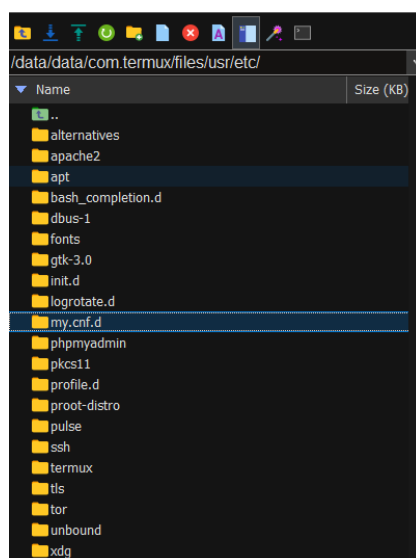


Ilustración 40 - Configuración invitado - parte 1 Fuente: autoría propia

En la carpeta de nombre mff.dif. conf. Se crea un archivo llamado mff.conf el cual. Se conforma por el siguiente contenido

```
[mariadb]
bind-address = 0.0.0.0
port = 3306
```

Ilustración 41 - Configuración invitado - parte 2 Fuente: autoría propia

Por último, en la base de datos se crea un usuario invitado de nombre “remoto” al cual se le permiten todos los privilegios y el comando flush para guardar la configuración de los privilegios en la base de datos.

| Usuarios con acceso a "sensores.lecturas" |                   |                     |        |                |          |                              |
|-------------------------------------------|-------------------|---------------------|--------|----------------|----------|------------------------------|
|                                           | Nombre de usuario | Nombre del servidor | Tipo   | Privilegios    | Conceder | Acción                       |
| <input type="checkbox"/>                  | proyecto          | localhost           | global | ALL PRIVILEGES | Sí       | Editar privilegios  Exportar |
| <input type="checkbox"/>                  | remoto            | %                   | global | ALL PRIVILEGES | Sí       | Editar privilegios  Exportar |
| <input type="checkbox"/>                  | root              | localhost           | global | ALL PRIVILEGES | Sí       | Editar privilegios  Exportar |
| <input type="checkbox"/>                  | u0_a87            | localhost           | global | ALL PRIVILEGES | Sí       | Editar privilegios  Exportar |
| <input type="checkbox"/>                  | usuario           | localhost           | global | ALL PRIVILEGES | Sí       | Editar privilegios  Exportar |
| <input type="checkbox"/>                  | usuario2          | %                   | global | ALL PRIVILEGES | No       | Editar privilegios  Exportar |

☐ Seleccionar todo    Para los elementos que están marcados: Exportar

Ilustración 42 - Configuración invitado - parte 3 Fuente: autoría propia

Y para la última parte de configuración del T95 se realiza la instalación de Termux: Boot, este programa permite iniciar el dispositivo con un conjunto de demonios para habilitar todos los servicios necesarios para funcionamiento del servidor y la base de datos. Por consiguiente, se crea una carpeta donde se guardará el respectivo bash con el siguiente contenido

```
GNU nano 8.0 script.sh
#!/bin/sh
termux-wake-lock
sshd
apachectl start
echo "El dispositivo se ha encendido a las$(date)" >> ~/registros.log
mariadb-safe -u root &
top
```

Ilustración 43 - Script de inicio del dispositivo (boot) Fuente: autoría propia

Con estos comandos, ya no se va a bloquear la terminal de Termux al levantar algún servicio y se puede trabajar dentro de ella sin ningún problema a la hora de prender el dispositivo.

#### 4.4.5.3 Módulo de servidor – Desarrollo de la página web

Este capítulo se centrará en el desarrollo del código de la página web, incluyendo la recepción de datos provenientes de la ESP. Se explicará cómo se estructura la página web, cómo se comunica con el servidor y cómo se procesan los datos recibidos. A continuación, se explicarán 3 archivos PHP de la información, el primero donde se reciben los datos de los sensores, el segundo donde se reciben los datos exclusivamente del sensor de precipitación y por último la página web.

- **Archivo de recepción de datos de los sensores – grabarpost.php**

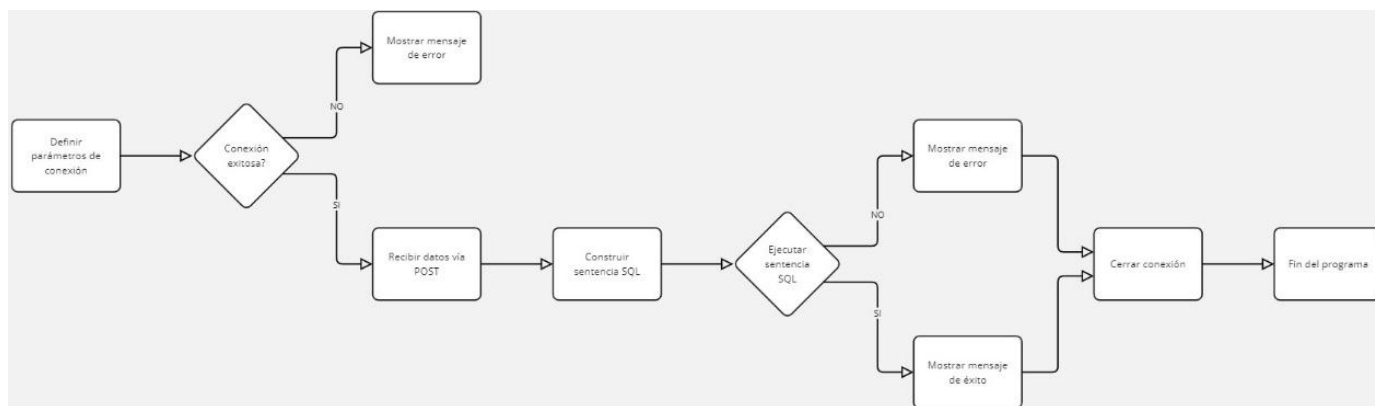


Ilustración 44 - Diagrama de flujo - Archivo de recepción de datos de los sensores

El código inicia, como se ve en la Ilustración 44, estableciendo una conexión a la base de datos MariaDB tal y como se haría con una base de datos MySQL. Se especifican los datos de conexión necesarios: el servidor (localhost), el nombre de usuario, la contraseña y el nombre de la base de datos (sensores). Luego, se utiliza la clase mysqli de PHP para crear una conexión a la base de datos. Se verifica si la conexión se estableció correctamente y, de lo contrario, se muestra un mensaje de error.

A continuación, el código recibe los datos enviados desde un formulario HTML a través del método POST. Estos datos incluyen el valor de una caja y los valores de cinco sensores. Cada valor se almacena en una variable correspondiente. Si alguno de los campos no tiene un valor enviado, se le asigna un valor por defecto.

Una vez que se han recibido los datos, se construye una consulta SQL para insertar estos datos en la tabla llamada "lecturas" de la base de datos. La consulta incluye todos los campos de la tabla y utiliza la función *NOW ()* de MariaDB para insertar la fecha y hora actual en el campo "fechabd". Luego, se ejecuta la consulta utilizando el método *query ()* del objeto de conexión. Si la inserción se realiza correctamente, se muestra un mensaje de éxito, de lo contrario, se muestra un mensaje de error junto con a la descripción del error proporcionado por la base de datos.

Finalmente, se cierra la conexión a la base de datos utilizando el método *close ()* del objeto de conexión. Esto libera los recursos utilizados por la conexión.

- **Archivo de recepción de datos del sensor de precipitación – grabarpost2.php**

Para almacenar la información de este sensor se crea un archivo con la misma estructura de lo anterior cambiando únicamente el valor de las variables y la tabla donde se ingresan los datos.

- **Página web principal - index.php**

El tercer archivo, hace referencia a la página principal de la aplicación donde podemos consultar la información que capturan los diferentes sensores, allí se tiene en primera instancia una serie de alertas un área de notificaciones y un área de gráficos, su código con mayor detalle se encontrará en el enlace que se encuentra en anexos ubicado en la carpeta “frontend”

En la Ilustración 45, a primera vista se puede observar el apartado de exportación de CSV donde se puede descargar la tabla de lectura como la tabla de lecturas2. Bajando un poco más, se puede observar el apartado de alertas como se ve en la Ilustración 46 donde se visualiza tanto el valor, si está por encima o por debajo de los valores promedio para un cultivo de café o unos consejos referentes a la alerta y la visualización de las alertas por medio de una tabla como se ve en la Tabla 12. Siguiendo con la página, se observa como en la Ilustración 47 la sección de notificaciones, el cual, avisa el valor de cantidad de lluvia proporcionado por el sensor de precipitación y también se puede visualizar la tabla de notificaciones como se ve en la Tabla 13 y si se quiere encontrará una explicación más detallada respecto a el contenido de la página web, este se encontrará en el enlace de anexos ubicado en la carpeta de manuales.



*Ilustración 45 - Sección de exportación de la página web Fuente: autoría propia*

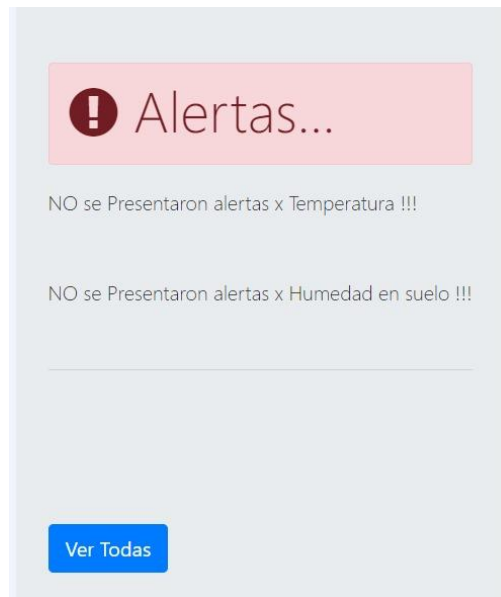


Ilustración 46 - Sección de alertas de la página web Fuente: autoría propia

Tabla 12 - Alertas de la página web Fuente: autoría propia

| <div>  <b>Tabla alertas!</b> </div>                                                                             |            |            |         |         |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|---------|---------|---------------------|
| Usted aqui encontrará un listado de las alertas que se han producido en el cultivo de <b>Café</b> utilizando para ello la parametrización de acuerdo a valores máximos y mínimos respectivamente. |            |            |         |         |                     |
| #                                                                                                                                                                                                 | T Ambiente | H Ambiente | H Suelo | Lluvia? | Fecha/Hora          |
| 1                                                                                                                                                                                                 | 26.59      | 31.47      | 0.00    | 0.00    | 2024-09-24 16:22:16 |
| 2                                                                                                                                                                                                 | 25.46      | 35.47      | 14.00   | 0.00    | 2024-09-24 16:32:16 |
| 3                                                                                                                                                                                                 | 24.96      | 37.41      | 13.00   | 0.00    | 2024-09-24 16:42:16 |
| 4                                                                                                                                                                                                 | 24.61      | 39.46      | 16.00   | 0.00    | 2024-09-24 16:52:16 |
| 5                                                                                                                                                                                                 | 24.56      | 39.45      | 15.00   | 0.00    | 2024-09-24 17:02:16 |
| 6                                                                                                                                                                                                 | 24.46      | 39.70      | 15.00   | 0.00    | 2024-09-24 17:12:16 |
| 7                                                                                                                                                                                                 | 24.25      | 40.03      | 16.00   | 0.00    | 2024-09-24 17:22:16 |

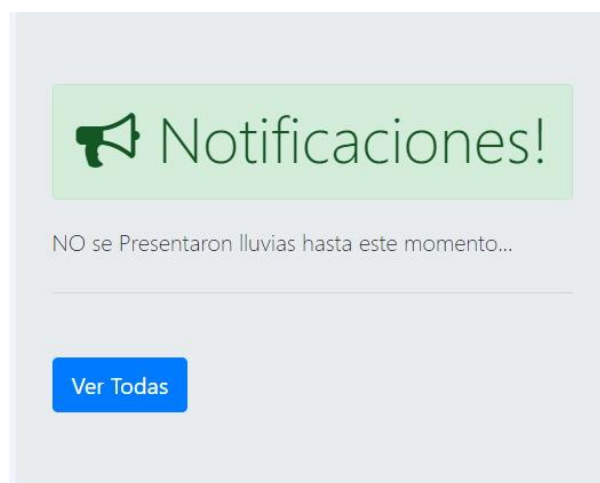


Ilustración 47 - Sección de notificaciones de la página web Fuente: autoría propia

Tabla 13 – Notificaciones de la página web Fuente: autoría propia

## Tabla notificaciones...

Usted aquí encontrará un listado de todas las lluvias y su respectiva cantidad (precipitación en mm.) que se ha presentado en el cultivo de **Café**

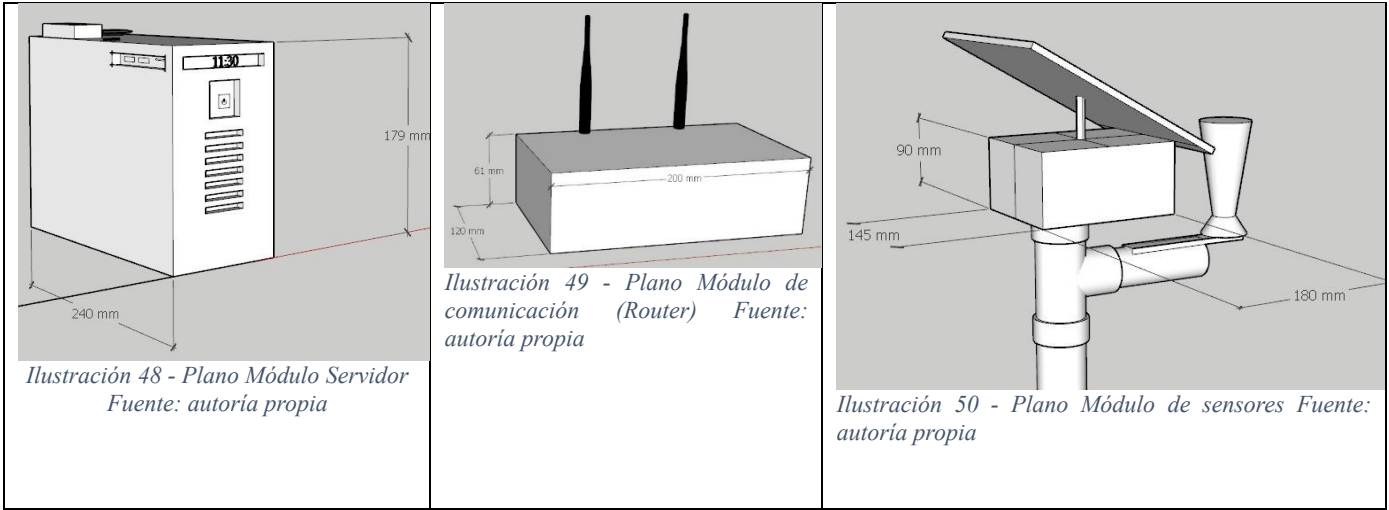
| # | Precipitacion | Fecha/Hora          |
|---|---------------|---------------------|
| 1 | 10.00         | 2024-10-12 14:34:19 |
| 2 | 6.00          | 2024-10-12 16:03:37 |

Salir

### 4.4.6 Ensamblaje del proyecto

Para el respectivo ensamble, se realizó un plano genérico de la disposición de los principales elementos que conforman el proyecto dividido en tres partes:

- 1. Torre con módulo de sensores - Ilustración 50
- 2. Router - Ilustración 49
- 3. Módulo de servidor - Ilustración 48



Posteriormente, se realiza la compra de distintos materiales para el desarrollo de los diferentes módulos, los cuales se pueden observar en la Tabla 14:

Tabla 14 – Costos del proyecto Fuente: Autoría Propia

| # de elemento            | Material                           | Nombre específico | Costo         | Imagen                                                                              | Enlace                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                        | placa + base                       | esp32 wrom        | \$ 40.000,00  |    | <a href="https://www.arcaelectronica.com/products/modulo-esp32-con-placa-de-expansion">https://www.arcaelectronica.com/products/modulo-esp32-con-placa-de-expansion</a>                         |
| 2                        | sensor temperatura/humedad         | AHT10             | \$ 15.000,00  |    | <a href="https://yorobotics.co/producto/sensor-temperatura-humedad-aht10-i2c-mems-40-85c-arduino/">https://yorobotics.co/producto/sensor-temperatura-humedad-aht10-i2c-mems-40-85c-arduino/</a> |
| 3                        | sensor de lluvia                   | YL83/DSK          | \$ 5.000,00   |    | <a href="https://www.zamux.co/sensor-de-lluvia-yl83">https://www.zamux.co/sensor-de-lluvia-yl83</a>                                                                                             |
| 4                        | sensor capacitivo humedad de suelo | sen0193           | \$ 9.000,00   |    | <a href="https://www.mactronica.com.co/sensor-de-humedad-del-suelo-capacitivo">https://www.mactronica.com.co/sensor-de-humedad-del-suelo-capacitivo</a>                                         |
| 5                        | tvbox t95                          | t95               | \$ 161.000,00 |    | <a href="https://todoprecioslospaisitas.com/producto/tv-box-t95-32gb/">https://todoprecioslospaisitas.com/producto/tv-box-t95-32gb/</a>                                                         |
| 6                        | UPS                                | Powest 300w       | \$ 162.000,00 |  | Anexo                                                                                                                                                                                           |
| 7                        | Cajas                              |                   | \$ 60.000,00  |                                                                                     | Anexo                                                                                                                                                                                           |
| 8                        | Panel                              |                   | \$ 55.000,00  |                                                                                     | Anexo                                                                                                                                                                                           |
| 9                        | Bateria                            | GP645             | \$ 25.000,00  |  | Anexo                                                                                                                                                                                           |
| 10                       | Materiales extra                   |                   | \$ 30.000,00  |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                 |
| 11                       | Pluviometro y sistema              | Galga             | \$ 70.000,00  |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                 |
| Costo total del proyecto |                                    |                   | \$ 632.000,00 |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                 |

En el módulo de sensores como se puede observar en la Ilustración 51 y la Ilustración 52, se ha implementado una base construida con 3 tubos de PVC que elevan el panel solar a una altura de 2.6 m. aproximadamente. Esta elevación garantiza una mayor exposición a la luz solar, mejorando la generación de energía y, por ende, la eficiencia de carga de la batería. Con el fin de proteger la batería de los efectos adversos de la humedad y el calor, se ha incorporado un ventilador que permite mantener una temperatura adecuada y prolongar su vida útil. De esta manera, se busca asegurar un mejor funcionamiento y duración del sistema.



*Ilustración 51 - Módulo de sensores Fuente: autoría propia*



*Ilustración 52 - Módulo de sensores (vista completa) Fuente: autoría propia*

Para mejorar la eficiencia y la seguridad del sistema, se decidió alojar la UPS y el T95 en una misma caja como se puede observar en la Ilustración 53 y la Ilustración 54. Esta solución compacta no solo mejora el espacio, sino que también simplifica la instalación y el mantenimiento. Además, se ha permitido el acceso a los puertos USB que permiten extraer fácilmente los datos almacenados en la base de datos. Como detalle adicional, se muestra la hora en pantalla. Las conexiones energía del *router* se encuentran en la parte superior

de la caja, con cables de 10 metros de longitud para facilitar la instalación en diferentes ubicaciones, sin la necesidad de adquirir cables adicionales además de poseer la alimentación del sistema y posibilidad de utilizar una pantalla por medio de un cable HDMI.



*Ilustración 53 - Módulo de servidor Fuente: autoría propia*



*Ilustración 54 - Módulo de servidor(superior) Fuente: autoría propia*

#### 4.4.7 Pruebas en campo

En este capítulo se explicarán las pruebas y puesta en marcha del dispositivo en el lugar propuesto para su funcionamiento.

Se realizó el viaje hasta la finca de “el Cascajal” con una duración de 8 horas de viaje, allí se instaló el dispositivo en medio del cultivo de café de tipo Castillo sembrado de manera mixta, lo que significa que también está plantado al lado de diferentes árboles frutales, en este caso al lado de un árbol de plátano el cual proporciona una mejor calidad de abono para el cultivo además de un sabor diferente en su preparación (toques más dulces), el sitio de instalación se observa en la Ilustración 55 .



*Ilustración 55 - Lugar del cultivo Fuente: autoría propia*

El lugar dispuesto del cultivo para la implementación del dispositivo se encuentra en el centro un total de 10 plantas de café y dos árboles de plátano. Ya definido el lugar, se procede a la instalación del módulo servidor en la casa de la finca. Debido a que el cultivo no se encuentra muy lejos de la casa principal, no fue necesaria la instalación del *router* a una distancia más alejada del servidor como se ve en la Ilustración 56.



*Ilustración 56 - Instalación Módulo servidor Fuente: autoría propia*

Después, se procedió a la instalación del módulo de sensores, se realizó un hueco en la tierra para sostener la estructura como se puede ver en la Ilustración 57 y la Ilustración 58.



*Ilustración 57 - Instalación módulo de sensores - Parte 1 Fuente: autoría propia*



*Ilustración 58 - Instalación módulo de sensores - parte 2 Fuente: autoría propia*

Por cuestiones del material de PVC, el cual es muy flexible y no sostenía en su totalidad el módulo, se tomó la decisión de quitar el tubo de PVC que se enterraba en el suelo y se amarró en la unión entre los dos tubos estructurales como se puede observar en la Ilustración 59 y la Ilustración 60.



*Ilustración 59 - Instalación del módulo de sensores - parte 3 Fuente: autoría propia*



*Ilustración 60 - Instalación del módulo de sensores - Colocación final Fuente: autoría propia*

Ya es su sitio, se procedió a encender el módulo por medio de la activación un interruptor. La posición final del módulo se puede observar en la Ilustración 61, la Ilustración 62 y la Ilustración 63.



*Ilustración 61 - Colocación final 1 - Módulo de sensores Fuente: autoría propia*

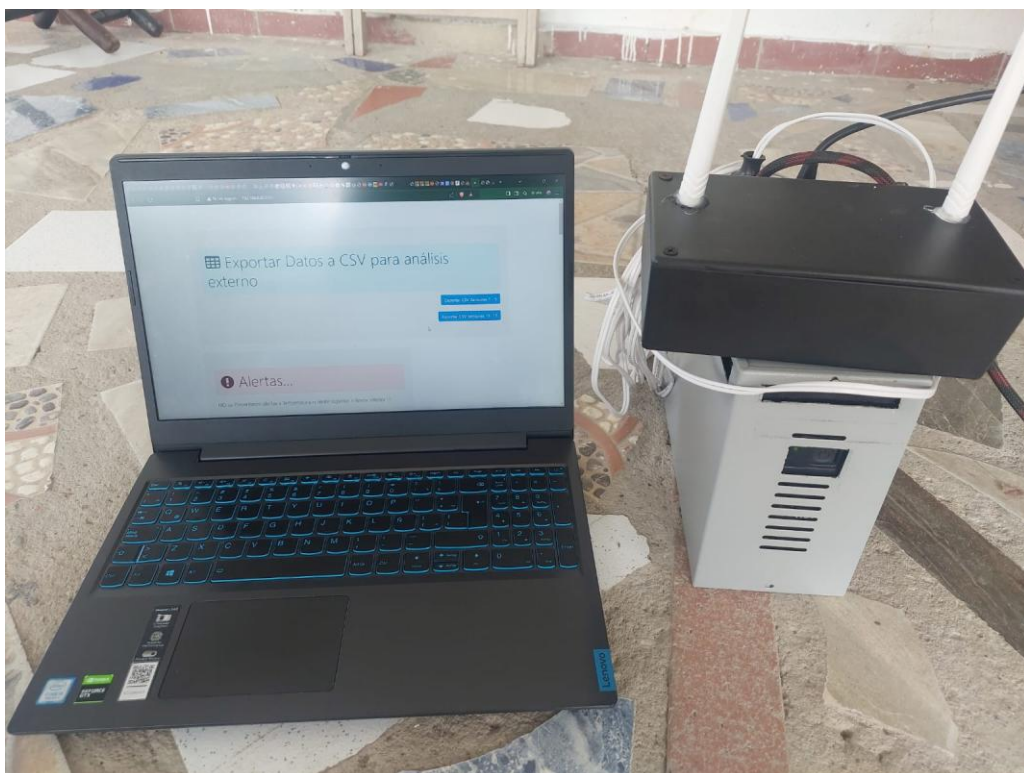


*Ilustración 62 - Colocación final 2 - Módulo de sensores Fuente: autoría propia*



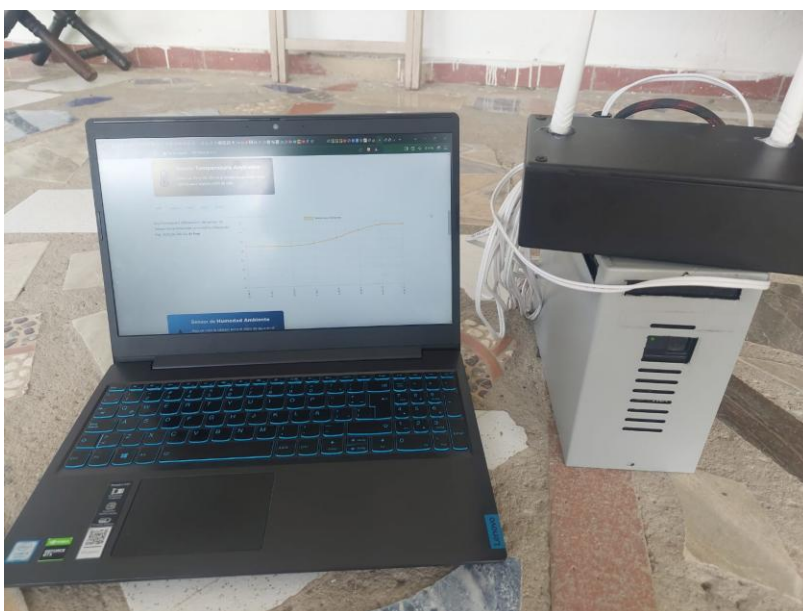
*Ilustración 63 - Colocación final 3 - Sensor de humedad de suelo Fuente: autoría propia*

Para comprobar su funcionamiento, se realizó la conexión de un portátil a la página web y se verifican que los datos se reciben correctamente como se observa en la Ilustración 64.



*Ilustración 64 - Prueba de módulo de servidor Fuente: autoría propia*

Además, que se realizó la prueba de funcionamiento del servidor cuando no posee una red eléctrica como se observa en la Ilustración 65



*Ilustración 65 - Prueba de módulo de servidor sin conexión a la red eléctrica Fuente: autoría propia*

### 4.4.8 Resultados

Para la toma de datos, se tuvieron en cuenta dos escenarios, un primer escenario con un entorno controlado realizando pruebas iniciales de funcionamiento ubicado en la ciudad de Bogotá entre las fechas de 24 de septiembre a las 16:22 hasta el 22 de octubre a las 15:55 y un segundo escenario el cual tiene los datos de la prueba de campo tomados en la finca de “El Cascajal” desde el 23 de octubre a las 12:04 hasta el día 27 de octubre a las 13:43 lo cual permite tener una cantidad de datos suficientes para determinar que el proyecto es funcional, la cantidad de total registros en las dos pruebas fue de 1672.

Ahora se puede observar cómo se encuentran las gráficas de los días con los resultados de las pruebas.

#### 4.4.8.1 Módulo de sensor Temperatura Ambiente



Gráfico 1 - Temperatura ambiente - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Aquí se puede observar el gráfico de sensor de temperatura de los datos de hoy promediando cada hora del día. En la Gráfico 1 se puede observar datos reales del día 23 de octubre de 2024 los cuales iniciaron a las 12:04.

Para el día 24 se tiene el Gráfico 2



Gráfico 2- Temperatura ambiente - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 25 se tiene el Gráfico 3



Gráfico 3- Temperatura ambiente - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 26 se tiene el Gráfico 4



Gráfico 4- Temperatura ambiente - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 27 se tiene el Gráfico 5, los cuales finalizaron a las 13:43.



Gráfico 5- Temperatura ambiente - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab SEMANA se muestra los datos promediados de cada día como se ve en el Gráfico 6.



Gráfico 6- Temperatura ambiente - Semana 23-27 de octubre Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab MES se muestra los datos promediados de cada semana como se ve en el Gráfico 7.



Gráfico 7- Temperatura ambiente - Mes octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab de gráfico AÑO se muestra los datos promediados de cada mes como se ve en el Gráfico 8.



Gráfico 8- Temperatura ambiente - Año 2024 Fuente: autoría propia

Y si se presiona el tab TODOS se muestra un promedio por cada año como se ve en el Gráfico 9.

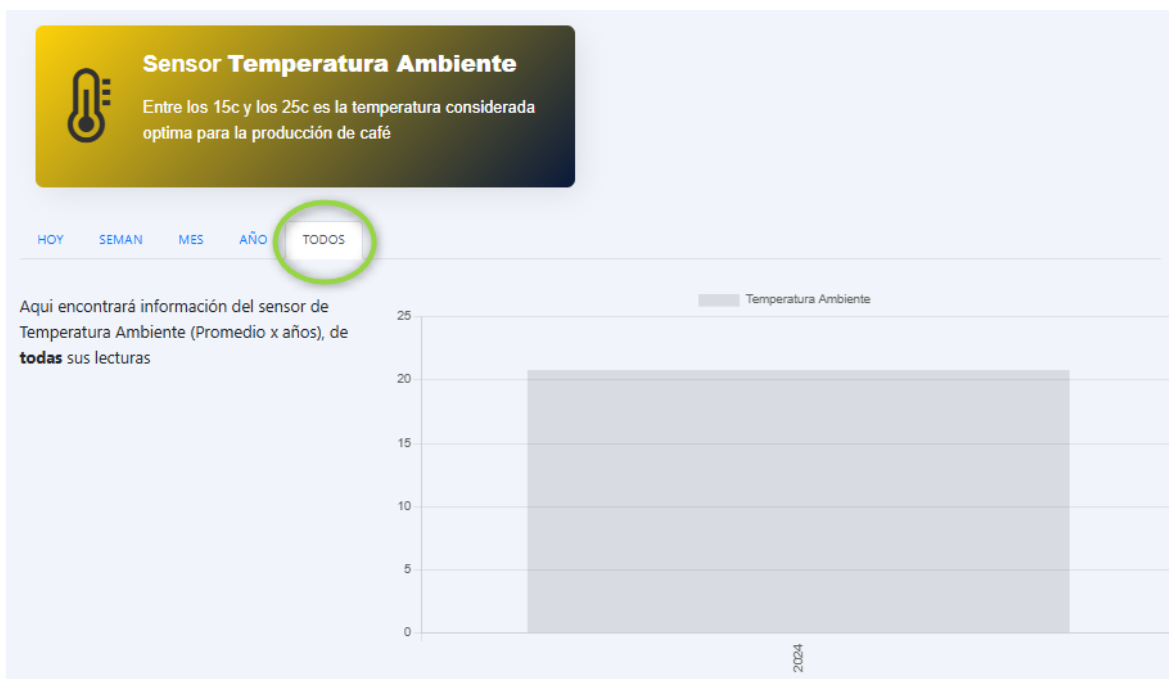


Gráfico 9- Temperatura ambiente - Todos los años Fuente: autoría propia

#### 4.4.8.2 Módulo Sensor de Humedad Ambiente

Al igual que en el sensor de temperatura ambiente se puede ver el gráfico hoy, semana, mes, año y todos

Se ve el gráfico de hoy (23 de octubre de 2024) que inicio siendo las 12:04, los datos mostrados son datos reales de la finca como se observa en el Gráfico 10.



Gráfico 10- Humedad ambiente - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 24 se tiene el Gráfico 11



Gráfico 11- Humedad ambiente - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 25 se tiene el Gráfico 12



Gráfico 12- Humedad ambiente - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 26 se tiene el Gráfico 13



Gráfico 13- Humedad ambiente - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 27 se tiene el Gráfico 14, donde se observa que la captura de los datos finaliza a las 13.



Gráfico 14- Humedad ambiente - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab SEMANA de este módulo, se muestra los datos promediados de cada día como se ve en el Gráfico 15.



Gráfico 15- Humedad ambiente - Semana de 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab MES se muestra los datos promediados de cada semana como se ve en el Gráfico 16.



Gráfico 16- Humedad ambiente - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab de gráfico AÑO se muestran los datos promediados de cada mes como se ve en el Gráfico 17.



Gráfico 17- Humedad ambiente - Año 2024 Fuente: autoría propia

Y si se selecciona el tab TODOS se muestra un promedio por cada año como se ve en el Gráfico 18.

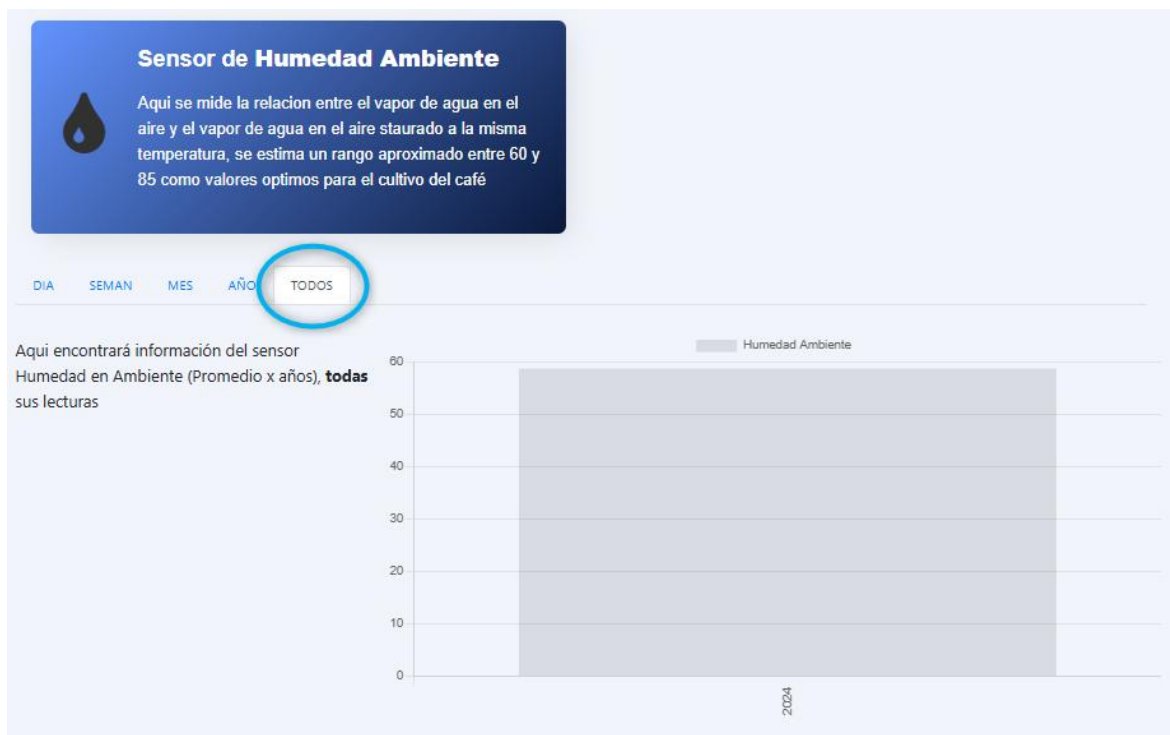


Gráfico 18- Humedad ambiente - Todos los años Fuente: autoría propia

#### 4.4.8.3 Módulo Sensor Humedad en Suelo

Al igual que en los módulos de sensores anteriores, se puede ver el gráfico hoy, semana, mes, año y todos.

Se ve el gráfico de hoy (23 de octubre de 2024) que inicio siendo las 12:04 los cuales son datos reales tomados de la finca como se observa en el Gráfico 19.

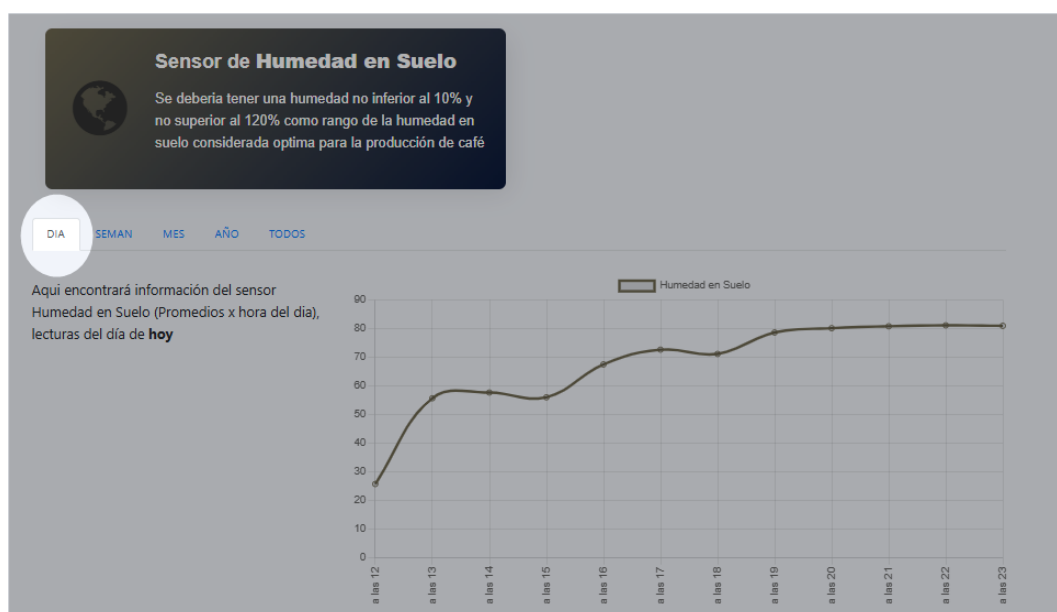


Gráfico 19- Humedad de suelo - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 24 se tiene el Gráfico 20.

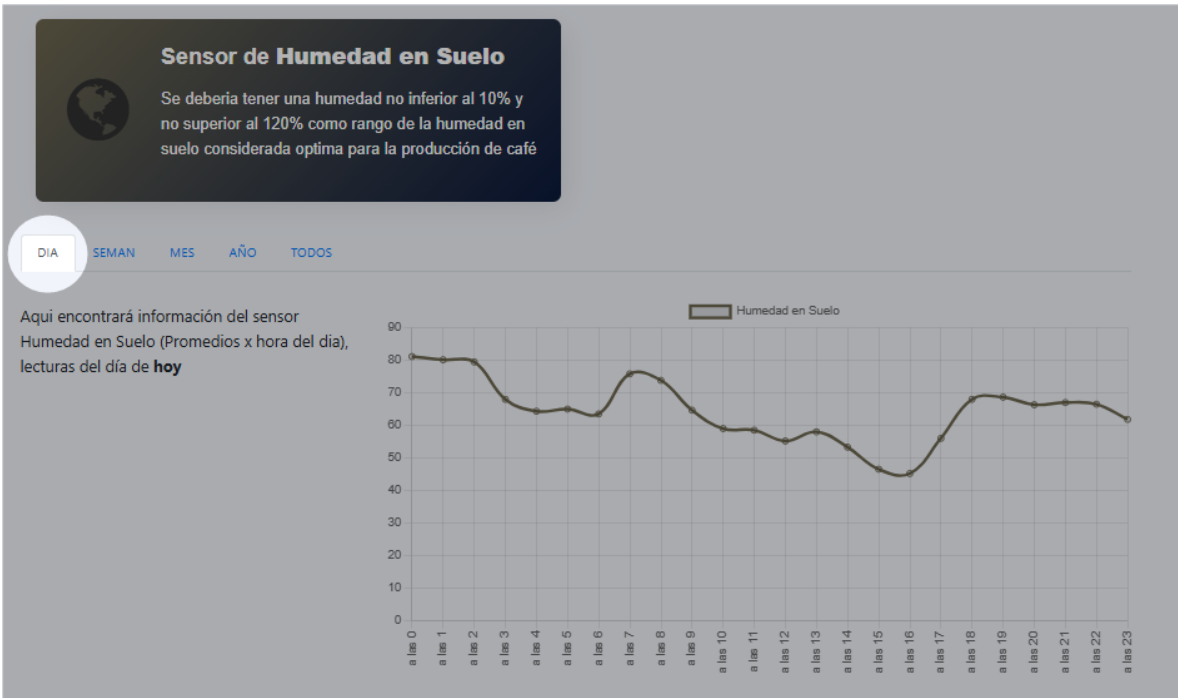


Gráfico 20 - Humedad de suelo - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 25 se tiene el Gráfico 21.

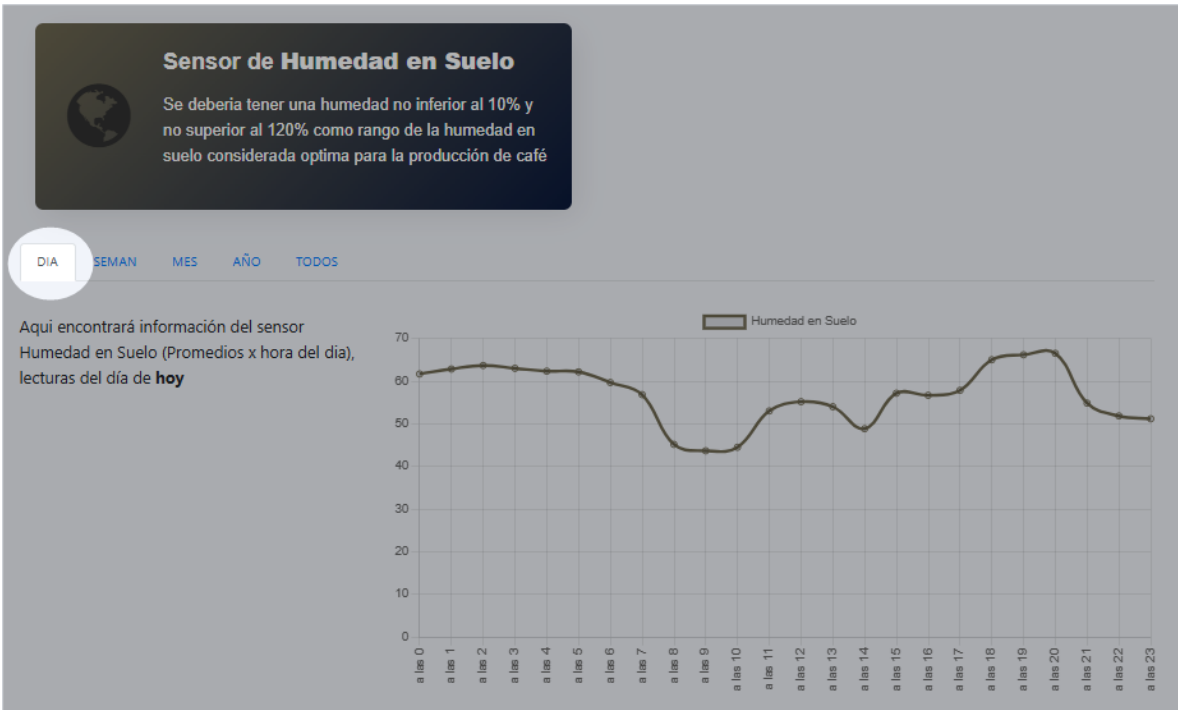


Gráfico 21- Humedad de suelo - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 26 se tiene el Gráfico 22.



Gráfico 22- Humedad de suelo - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 27 se tiene el Gráfico 23, donde se observa que la captura de los datos finaliza a las 13.



Gráfico 23- Humedad de suelo - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab SEMANA de este módulo, se muestra los datos promediados de cada día como se ve en el Gráfico 24.



Gráfico 24- Humedad de suelo - Semana 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab MES se muestra los datos promediados de cada semana como se ve en el Gráfico 25.



Gráfico 25- Humedad de suelo - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab de gráfico AÑO se muestra los datos promediados de cada mes como se ve en el Gráfico 26.

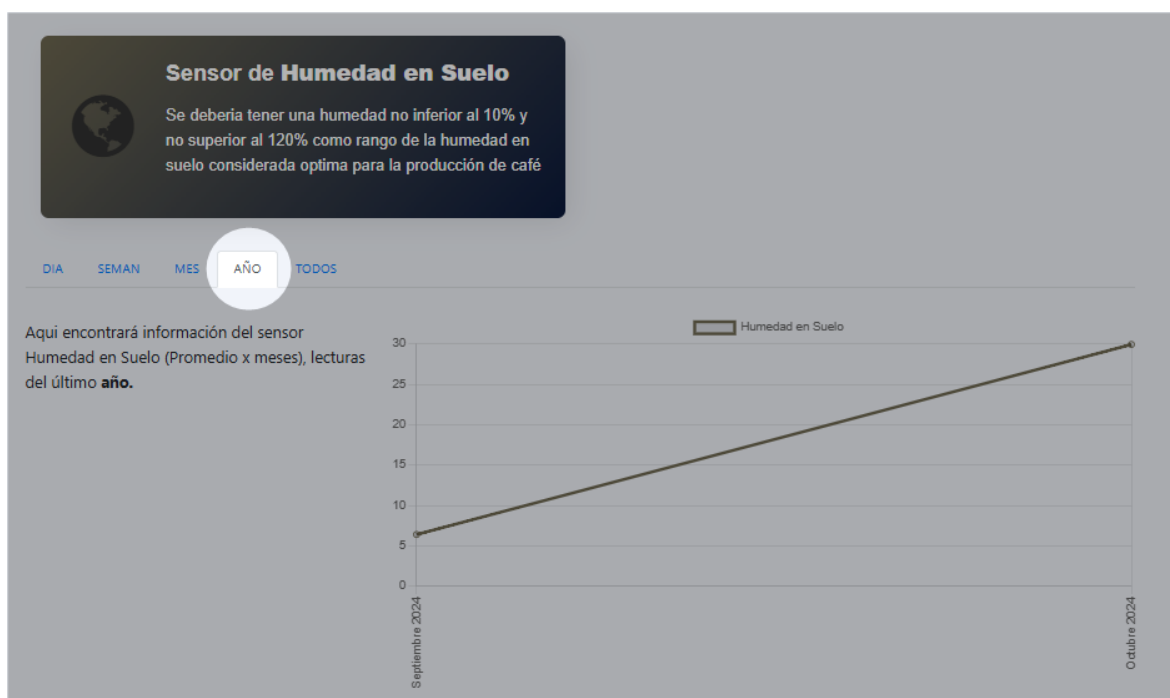


Gráfico 26- Humedad de suelo – Año 2024 Fuente: autoría propia

Y si se selecciona el tab TODOS se muestra un promedio por cada año Gráfico 27.

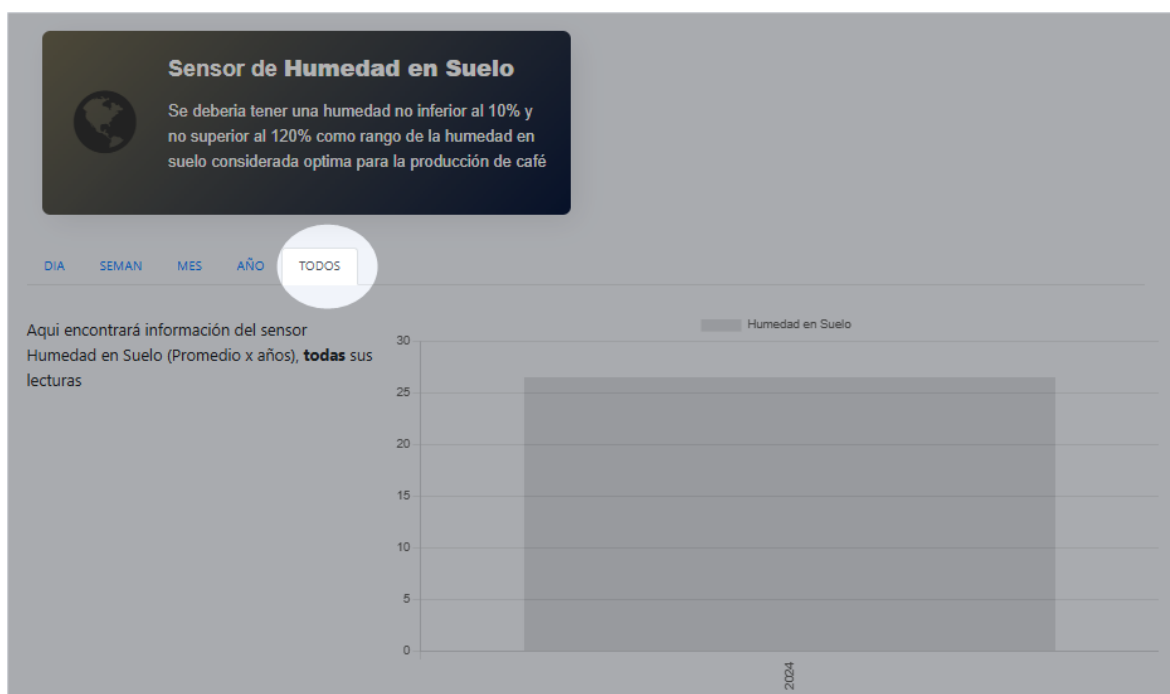


Gráfico 27- Humedad de suelo - Todos los años Fuente: autoría propia

#### 4.4.8.4 Módulo Sensor Detección de Lluvia

Al igual que en los módulos de sensores anteriores, se puede ver el gráfico hoy, semana, mes, año y todos. Se ve el gráfico de hoy (23 de octubre de 2024) que inicio siendo las 12:04, los cuales son datos reales medidos de la finca por el módulo de sensores como se observa en el Gráfico 28.



Gráfico 28- Detección de lluvia - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 24 se tiene el Gráfico 30.



Gráfico 29- Detección de lluvia - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 25 se tiene el Gráfico 30.



Gráfico 30- Detección de lluvia - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 26 se tiene el Gráfico 31.



Gráfico 31- Detección de lluvia - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 27 se tiene el Gráfico 32, donde se observa que la captura de los datos finaliza a las 13.



Gráfico 32- Detección de lluvia - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab SEMANA de este módulo, se muestra los datos promediados de cada día como se ve en el Gráfico 33.



Gráfico 33- Detección de lluvia - Semana 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab MES se muestra los datos promediados de cada semana como se ve en el Gráfico 34.



Gráfico 34- Detección de lluvia - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab de gráfico AÑO se muestra los datos promediados de cada mes como se ve en el Gráfico 35.



Gráfico 35- Detección de lluvia - Año 2024 Fuente: autoría propia

Y si se selecciona el tab TODOS se muestra un promedio por cada año como se ve en el Gráfico 36.



Gráfico 36- Detección de lluvia - Todos los años Fuente: autoría propia

#### 4.4.8.5 Módulo Sensor de Precipitación

Al igual que en los módulos de sensores anteriores, se puede ver el gráfico hoy, semana, mes, año y todos.

Se ve el gráfico de hoy (23 de octubre de 2024) que inicio siendo las 12:04, los cuales son datos reales tomados desde la finca como se observa en el Gráfico 37.



Gráfico 37- Precipitación - 23 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 24 se tiene el Gráfico 38

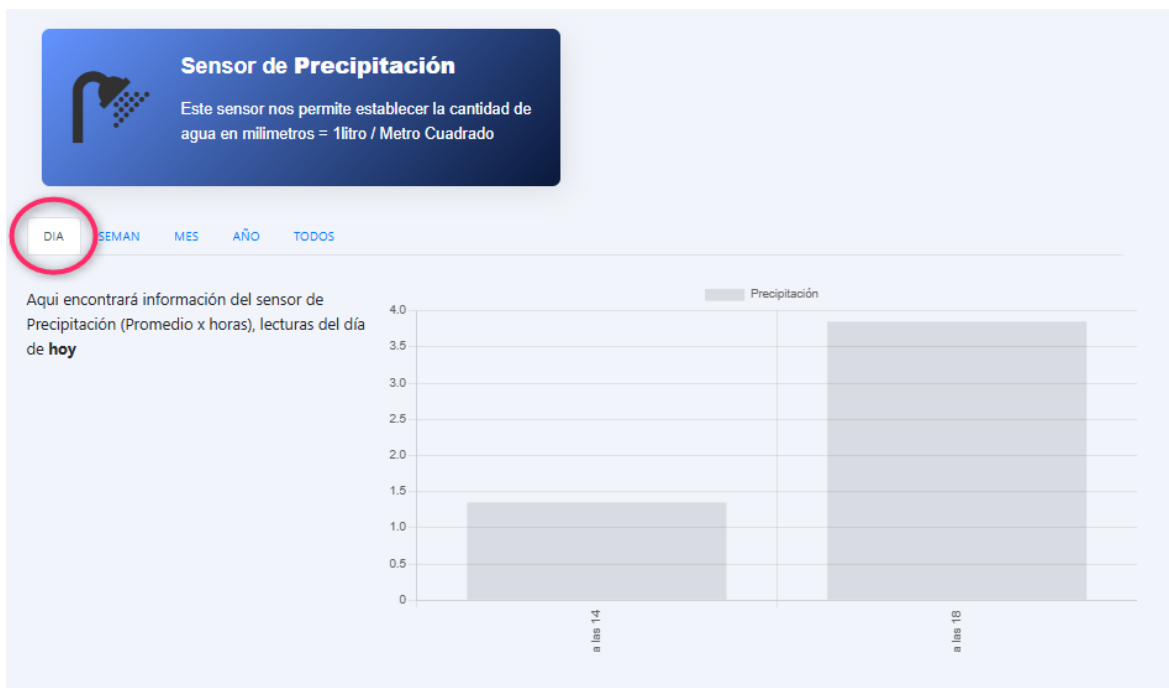


Gráfico 38- Precipitación - 24 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 25 se tiene el Gráfico 39.



Gráfico 39- Precipitación - 25 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 26 se tiene el Gráfico 40.

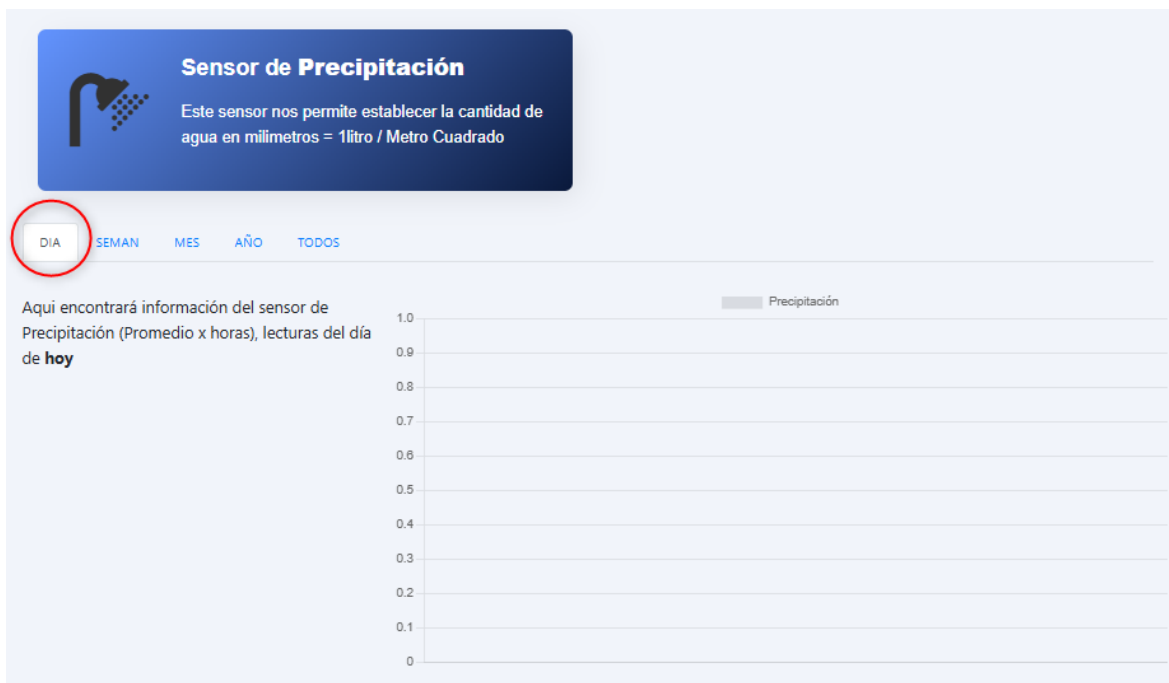


Gráfico 40- Precipitación - 26 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Para el día 27 se tiene el Gráfico 41, donde se observa que la captura de los datos finaliza a las 13.



Gráfico 41- Precipitación - 27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab SEMANA de este módulo, se muestra los datos promediados de cada día como se ve en el Gráfico 42.

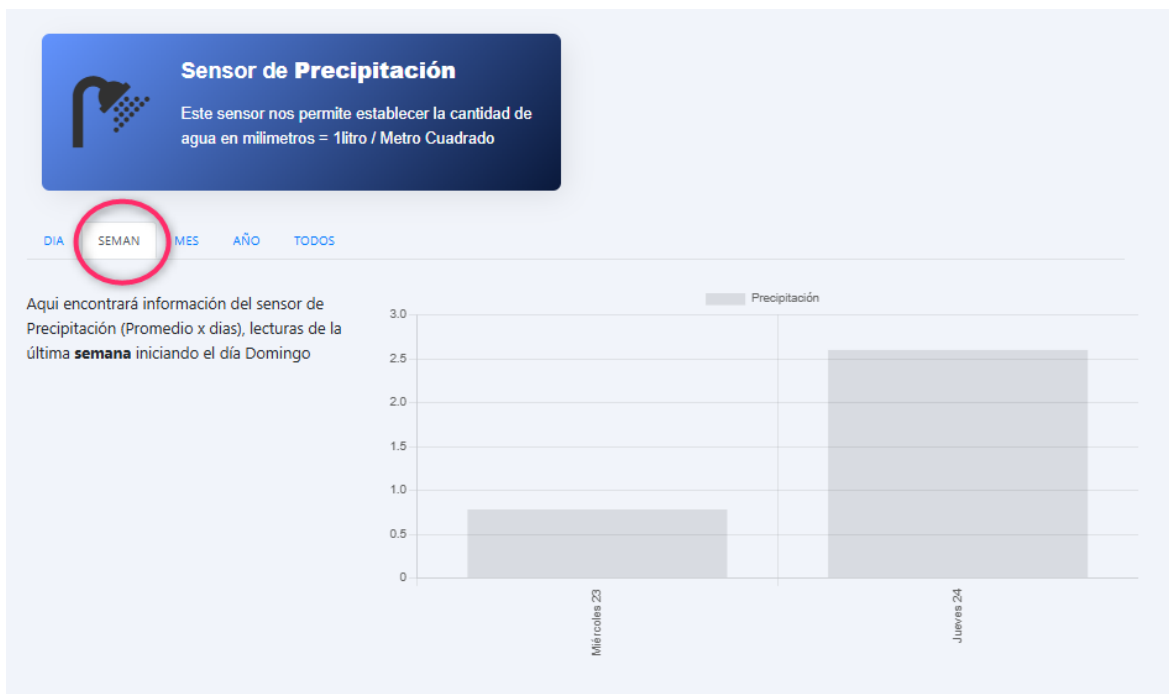


Gráfico 42- Precipitación - Semana 23-27 de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab MES se muestra los datos promediados de cada semana como se ve en el Gráfico 43.

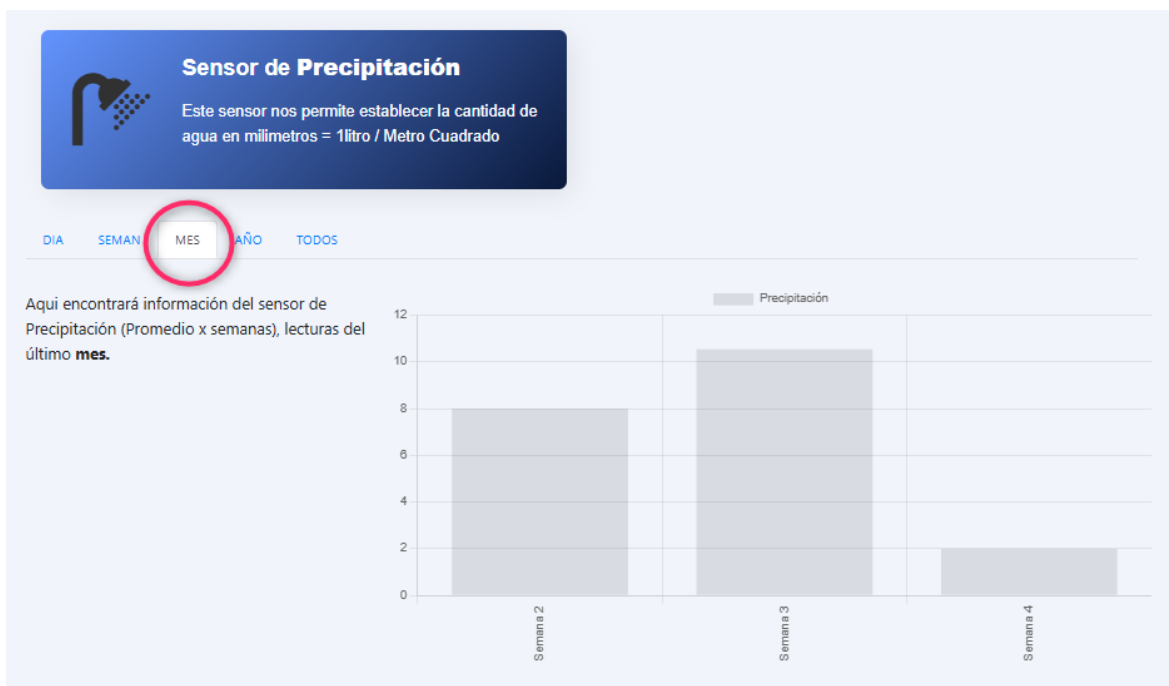


Gráfico 43- Precipitación - Semanas de octubre 2024 Fuente: autoría propia

Sí se presiona el tab de gráfico AÑO se muestra los datos promediados de cada mes como se ve en el Gráfico 44.

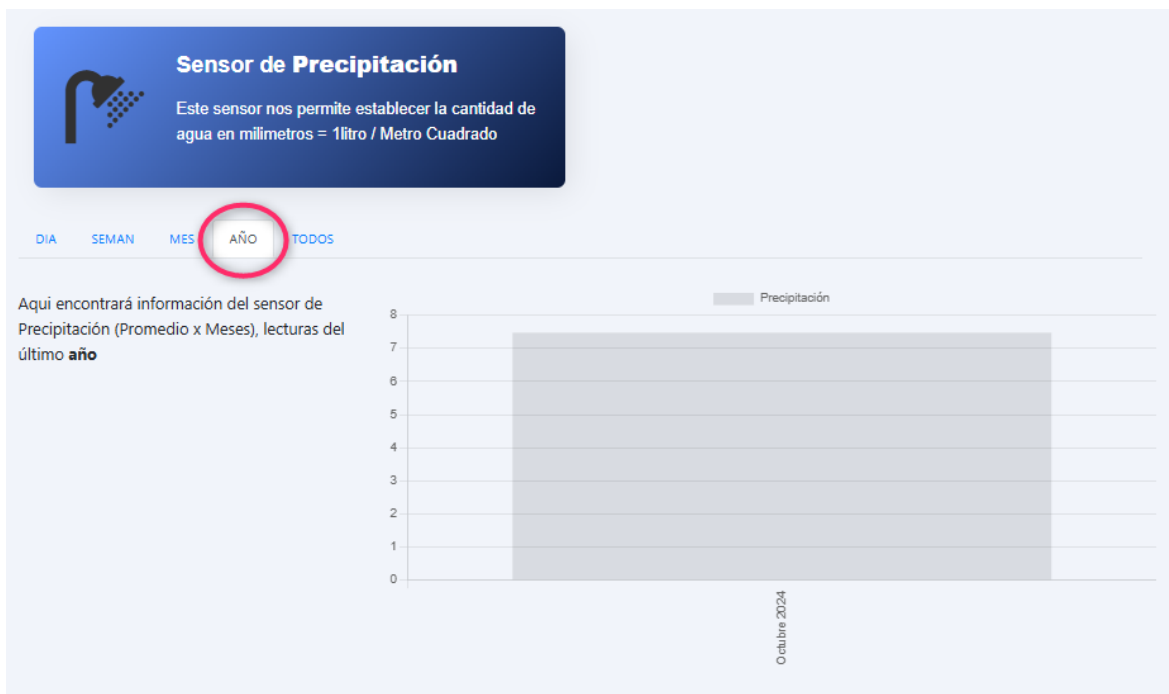


Gráfico 44- Precipitación - Año 2024 Fuente: autoría propia

Y si se selecciona el tab TODOS se muestra un promedio por cada año como se ve en el Gráfico 45.



Gráfico 45- Precipitación - Todos los años Fuente: autoría propia

#### 4.4.8.6 Análisis final de costos

En esta subsección se realizará una comparación tanto física como económica del trabajo de grado contra dispositivos de uso genérico de meteorología.

- **Goyojo Estación Meteorológica Inalámbrica Temperatura Humedad**



Ilustración 66 - Tableta de visión de • Goyojo Estación Meteorológica Inalámbrica Temperatura Humedad Fuente:

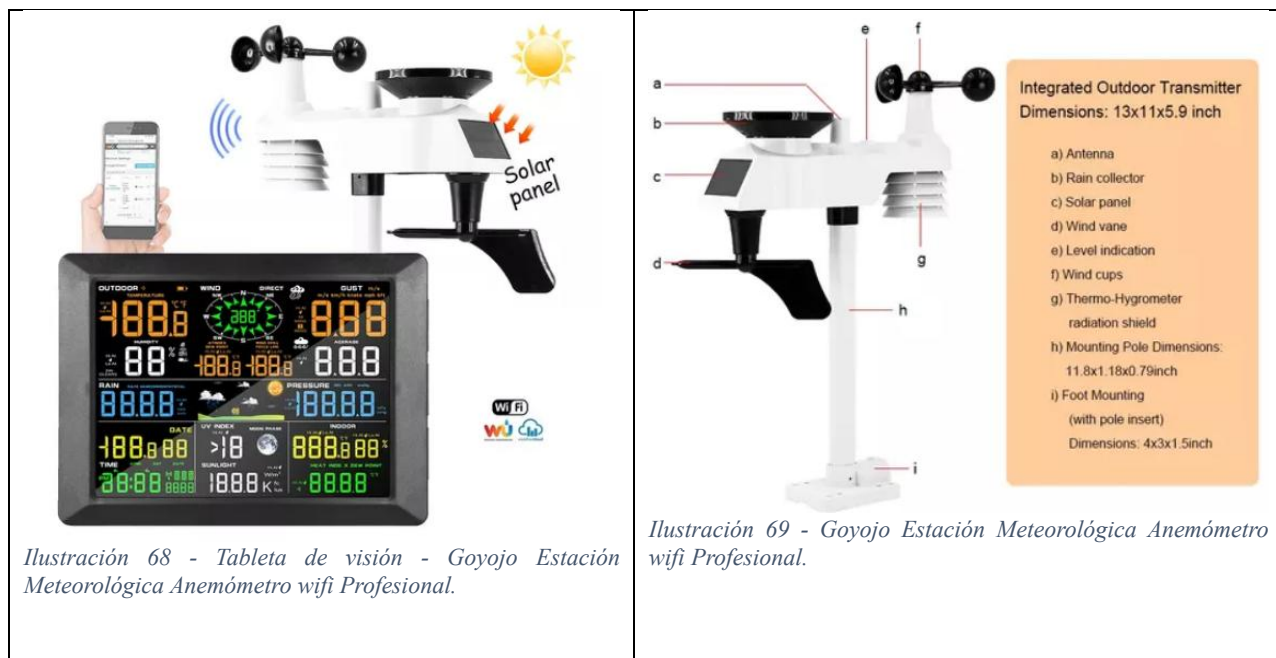


Ilustración 67 - • Goyojo Estación Meteorológica Inalámbrica Temperatura Humedad. Fuente:

Valor Aproximado: 855.861 pesos colombianos

Esta estación monitorea temperatura *indoor* y *outdoor*, características del viento, pluviómetro, humedad, presión del aire, fases de la luna. Esta tiene un dispositivo externo dedicado de video, y pagina web (portal en la nube) para computador y celular; soporta otros sensores como clima subterráneo. No se especifica algún aspecto sobre el manejo de la información histórica. Necesita internet para su funcionamiento.

- **Goyojo Estación Meteorológica Anemómetro wifi Profesional**



Valor Aproximado: 1'003.014 pesos colombianos

A diferencia del modelo anterior este cuenta con un dispositivo externo dedicado de video más grande donde se pueden apreciar más parámetros y la alimentación se acompaña de un panel solar. No se especifica algún aspecto sobre el manejo de la información histórica.

• **Ambient Weather Ws-2902 10-in-1 wifi Estación Meteorológica Profesional Con Internet Vigilancia, Compatible Con Alexa**



Valor aproximado: 2'300.000 pesos colombianos

Esta estación de monitoreo mide la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad, lluvia, barómetro, rayos UV y radiación solar. Funciona con energía solar y cuenta con batería de respaldo. Necesita internet para su funcionamiento.

- **Estación Meteorológica wifi Logia: 7 En 1**



Valor aproximado: 1.283.858 en pesos colombianos

Esta estación mide entre otros: temperatura, humedad (*indoor* y *outdoor*), intensidad y rayos uv, velocidad del viento, presión barométrica, lluvia y fases lunares. Necesita internet para su funcionamiento. Se pueden agregar dispositivos adicionales.

- **VIVOSUN Estación meteorológica wifi 18 en 1 con sensor para exteriores, monitor de CO2, consola de pantalla a color, termómetro meteorológico interior/exterior, pronóstico del tiempo**



Ilustración 74 - Tableta de visión - VIVOSUN Estación meteorológica wifi 18 en 1 con sensor para exteriores.

Ilustración 75 - VIVOSUN Estación meteorológica wifi 18 en 1 con sensor para exteriores.

Valor aproximado: US\$109.99 en dólares

Esta estación meteorológica wifi mide entre otros el nivel co2, temperatura y humedad (indoor y outdoor), parámetros del viento, lluvia, índice uv, luz solar, fases lunares, presión barométrica. Posee pantalla dedicada, se necesita internet para enviar a nube los datos si no posee internet solo se ven en tiempo real.

Este trabajo de grado no utiliza internet debido a las condiciones de Colombia en su cobertura y precio que no son accesibles en la mayoría de casos por el campesino; sin embargo, este proyecto permite capturar información no solo de los principales sensores requeridos para un análisis de las condiciones de cultivo de café, sino almacenarlas, exportarlas y visualizarlas (tanto en página web, como celulares conectados a la red interna) en periodos de tiempo muy amplios, generar alertas específicas en cada uno de ellos y notificar la presencia de lluvias en el sector. Toda esta información se puede extrapolar y permitir acciones tempranas en beneficio del cultivo de café castillo y realizar posibles pronósticos basados en su base de datos local. En este orden de ideas el proyecto cuenta con soporte de ups y rango wifi muy amplio gestionado por la capacidad del *router* de la red (proyecto-tesis) permitiendo la adición de múltiples puntos (módulos de sensores) dentro del cultivo. En lo que respecta a los datos estos se almacenan en una base de datos incorporada dentro del proyecto (módulo de servidor), en el cual también aloja la página web del proyecto (192.168.1.30:8080) lo que significa que toda la solución es local. Desde el punto de vista económico y tal como se puede apreciar los costos son menores a los estipulados en varios de las estaciones de monitoreo descritas anteriormente; sin embargo, es de anotar que el proyecto no cuenta con una consola de visualización dedicada y al no contar con internet no se pueden utilizar las api's disponibles para visualizar temas como la fase lunar y otros aspectos tal como lo hacen en las soluciones descritas anteriormente.

En conclusión, se tiene que todas utilizan internet para subir los datos a la nube y desde allí tener acceso a sus respectivos portales y/o utilizan dispositivos externos de visualización. El costo de la solución en

comparación a otras estaciones de uso genérico tal como las estipuladas anteriormente, es más bajo y en definitiva más orientado a cultivos y sus necesidades.

## 4.5 Pruebas de concepto

### 4.5.1 Veracidad

Para asegurar la precisión de los datos recogidos, se realizó una prueba de veracidad que consistió en comparar estos registros con información meteorológica proveniente de distintas fuentes confiables. Los datos obtenidos se cotejaron con lecturas de varias páginas especializadas en meteorología, verificando que la información fuera coherente y consistente con las condiciones climáticas reales. El rango de verificación es entre los días 23-27 donde se realizaron las pruebas en la finca del cascajal.

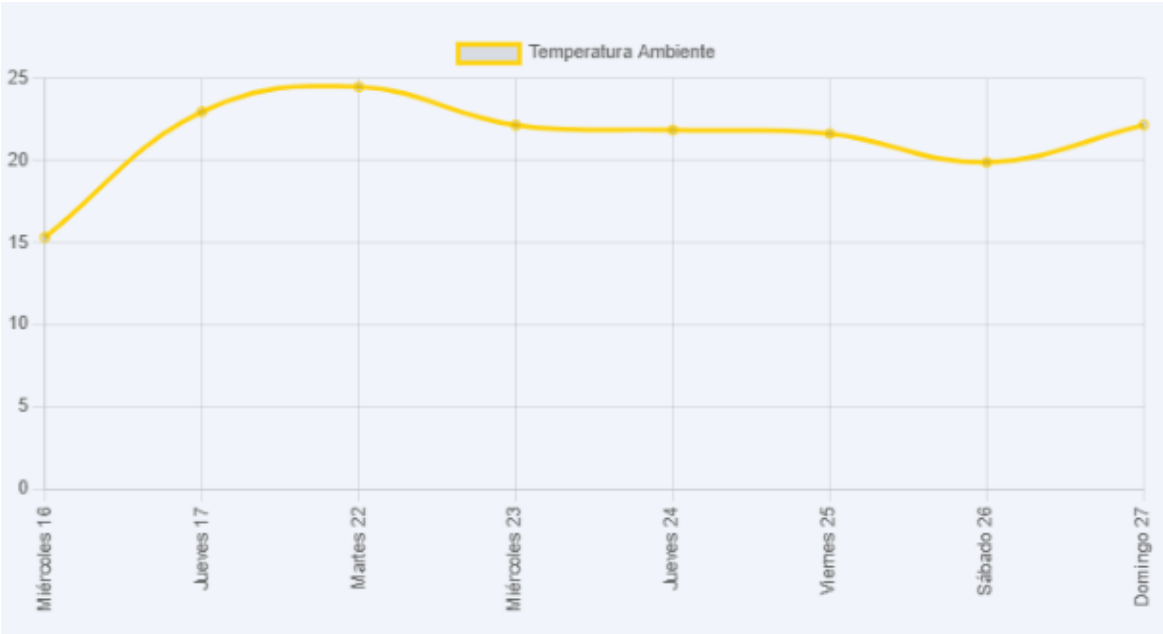


Gráfico 46 - Días de toma de datos reales para la comparación Fuente: autoría propia

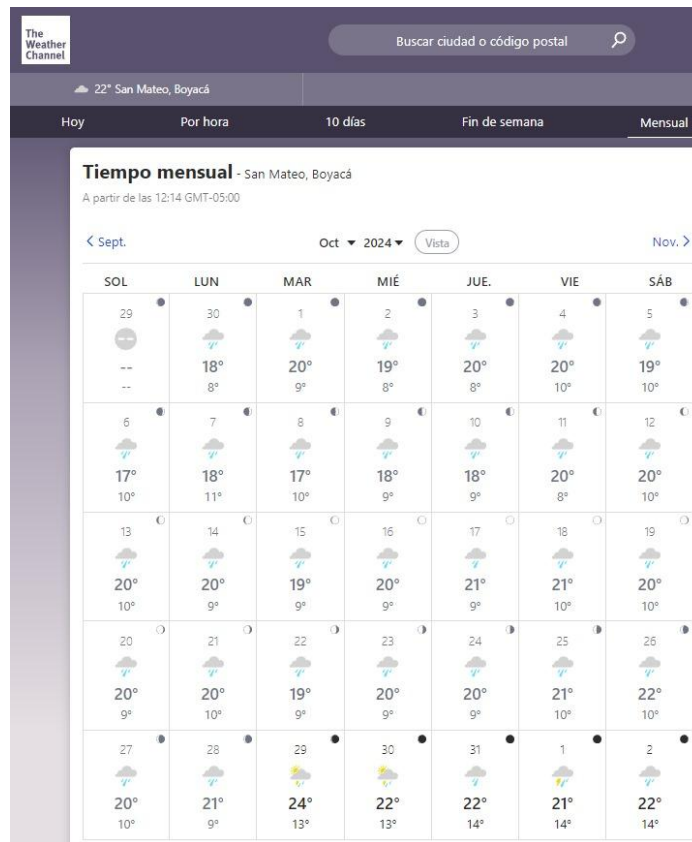


Ilustración 76 - Datos de comparación de veracidad - The Weather Channel [73]

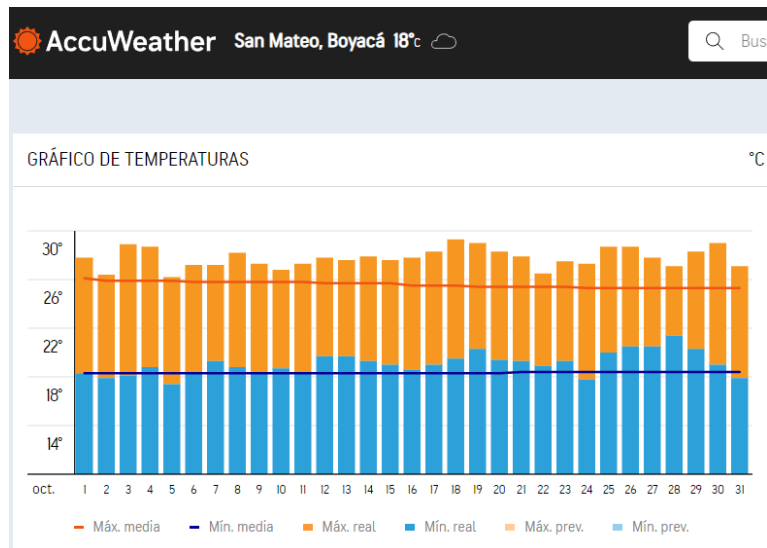


Gráfico 47 - Datos de comparación de veracidad – AccuWeather [74]

Se observa en el Gráfico 46 , la Ilustración 76 y el Gráfico 47, se puede demostrar la confiabilidad de los datos recolectados, al confirmar su coherencia y consistencia con información meteorológica de fuentes confiables como las anteriormente mencionados. Para ello, se realizó la Tabla 15 , donde se puede ver numéricamente los valores anteriormente mencionados y en la Tabla 16, se puede ver el grado de error que tiene el módulo de sensores con respecto a las dos fuentes mencionados.

Tabla 15 - Datos de comparación Fuente: Autoría propia

| Datos de comparación |         |                     |             |
|----------------------|---------|---------------------|-------------|
| Día                  | Sistema | The Weather Channel | AccuWeather |
| 23                   | 21      | 20                  | 21          |
| 24                   | 21      | 20                  | 20          |
| 25                   | 21      | 21                  | 22          |
| 26                   | 20      | 22                  | 22          |
| 27                   | 22      | 20                  | 22          |

Tabla 16 - Datos de error Fuente: Autoría propia

| Error       |                     |             |
|-------------|---------------------|-------------|
| Día         | The Weather Channel | AccuWeather |
| 23          | 5%                  | 0%          |
| 24          | 5%                  | 5%          |
| 25          | 0%                  | 5%          |
| 26          | 9%                  | 9%          |
| 27          | 10%                 | 0%          |
| Error total | 6%                  | 4%          |

Este proceso de comparación permite una tener una referencia valida de los datos que se puedan generan en el proyecto, fortaleciendo su utilidad en la toma de decisiones informadas para el manejo del cultivo. Sin embargo, es de anotar que los modelos meteorológicos tomados por satélite no son exactos debido a las distancias y los microclimas que se pueden presentar en las regiones montañosas de Colombia como en el municipio de San Mateo. Igualmente, la veracidad quedo confirmada por medio de la calibración de los sensores como se puede observar en el subsección 4.3.5.

#### 4.5.2 Pertinencia

Se llevó a cabo una prueba de pertinencia para evaluar la utilidad y aplicabilidad de los datos recolectados en el sistema de monitoreo para un cultivo de café. Esta prueba consistió en analizar si la información generada (como temperatura, humedad ambiente, humedad de suelo y precipitación) se ajusta a las necesidades específicas del cultivo y permite identificar condiciones favorables o adversas para su desarrollo.

Esto implica que las lecturas del sistema con los valores favorables y críticos definidos previamente para cada variable en estudios agronómicos dadas específicamente para un cultivo de café de variante Castillo. La pertinencia de los datos se evalúa en términos de exactitud y su capacidad de reflejar cambios que impactan directamente en la productividad y salud del cultivo, como sequías, fluctuaciones de temperatura o altos niveles de humedad, factores cruciales para la prevención de plagas, enfermedades y estrés en las plantas. Este análisis garantiza que los datos no solo sean precisos, sino también prácticos y útiles para la toma de decisiones en el manejo del cultivo. En caso de que se detecten discrepancias o que algunos datos no correspondan completamente con las necesidades específicas del cultivo de café, se pueden ver una serie de

alarmas con el objetivo de dar unos consejos además de poder tomar una serie de decisiones con base a estos tal y como se puede visualizar en la sección 4.1 del documento y en la sección 4.3.8.

La comparación con parámetros de referencia permitió confirmar que el sistema es capaz de proporcionar información precisa y relevante la toma de decisiones y permitiendo una gestión más efectiva del cultivo.

### 4.5.3 Oportunidad

La prueba de oportunidad se realizó para evaluar si el sistema de monitoreo es capaz de proporcionar datos en el momento adecuado para apoyar la toma de decisiones en el manejo del cultivo de café. Esta prueba consistió en verificar que los datos ambientales clave, como cambios en temperatura, humedad o precipitaciones, se registraran y transmitieran en tiempo real o con una mínima demora. La oportunidad de los datos es fundamental en un cultivo de café, ya que permite reaccionar a condiciones adversas—como eventos de estrés hídrico o aumentos de humedad que propicien enfermedades de manera inmediata.

Los tiempos de obtención de datos entre los dispositivos y la comunicación entre el servidor son los siguientes:

- Toma y envío de datos: Cada 10 min para obtener varios valores y de esta manera tener una mayor exactitud. Además de que se tomará un promedio de estos datos (6) por hora y se visualizará en la gráfica del día de hoy para cada uno de los sensores.
- Tiempo de llegada entre el módulo de sensores y el *router*: Según la ficha técnica del *router* utilizado para el desarrollo del proyecto, el cual se encuentra en los anexos, se observa que llega a 300 Mbps, pero teniendo en cuenta las condiciones ambientales o defectos de fábrica este llega a 150 Mbps dando así que el tiempo de comunicación entre módulos sea muy corto.
- Comunicación entre la página web y la base de datos: Realizando pruebas con la misma se pudo determinar que se demora en ingresar entre 30-60 segundos esto debido a la cantidad de consultas que se realizan al ingresar a la página por primera vez, después de esto la página se actualizará automáticamente cada 5 minutos lo cual sucede por el procesador del TV Box.
- Descarga de CSV desde la página web: Realizando pruebas con la misma se pudo determinar que se demora en descargar los archivos entre 1-10 segundos.

Los resultados de esta prueba confirmaron que el sistema es capaz de proporcionar información actualizada y oportuna de acuerdo con Morantes [71], lo cual es crucial para aplicar medidas preventivas y correctivas de manera eficiente, manteniendo así la salud y productividad del cultivo, ya que ninguno de los procesos nombrados anteriormente tiene un impacto significativo en el tiempo establecido general

## 5 Planes de mejora

- Uno de los primeros planes de mejora que se propone es la creación de una página web que permita enviar datos a través de Internet. Esto facilitaría el acceso a la información, tanto de manera local como en la nube. Para aquellas fincas que cuenten con conexión a Internet, esta herramienta les permitirá consultar los datos desde sus hogares o desde la ciudad.
- Una segunda acción para mejorar el proyecto es actualizar el sensor de suelo, reemplazándolo por uno que mida nutrientes, temperatura y humedad. Este sensor no se incluyó en la primera etapa del proyecto debido a la prioridad de mantener bajos costos.
- Además, se podría instalar una batería de mayor capacidad y un panel solar más grande, con el objetivo de aumentar el tiempo de funcionamiento del prototipo sin depender exclusivamente de la energía solar.
- Se sugiere la creación de un segundo módulo que tenga características similares al primero y que pueda integrarse con la página web. Estos dos módulos funcionarán de manera independiente.
- Si se instala un dispositivo GPS en el módulo, este permitirá conocer la ubicación exacta en tiempo real, facilitando el monitoreo de su posición y la distancia entre los sensores. Esta información se podrá visualizar en un mapa de Google integrado en una página web, alimentada por datos en la nube.
- La mejora de materiales y una obtención de un mejor procesador para el servidor para obtener un mayor rendimiento.
- Además de realizar un almacenamiento local del módulo del sensores para cuando no se encuentre una conexión con el servidor. El cual no se implementó en el proyecto debido a la UPS ubicada en el módulo de servidor el cual lo mantienen encendido en caso de algún apagón.

## 6 Conclusiones

- La identificación de las variables ambientales y criterios de alerta relevantes para el cultivo de café como se observa en la Tabla 2, ha sido fundamental para establecer los requerimientos específicos del sistema de monitoreo. Este proceso asegura que el sistema responda de manera efectiva a las necesidades del cultivo, contribuyendo a la preservación y mejora de su productividad.
- La comparación de sensores comerciales de bajo costo, bajo un criterio de costo-beneficio, ha permitido seleccionar los dispositivos más apropiados para el sistema como se ve en la Tabla 3, la Tabla 4 y la Tabla 5 . Esta selección equilibra los requisitos técnicos y económicos del proyecto, lo cual garantiza una implementación del sistema de monitoreo efectiva y económicamente viable.
- El prototipo diseñado cumple con los requerimientos establecidos como se puede observar en la Tabla 6 y la Tabla 16, en cuanto a software y hardware, proporcionando el monitoreo de las variables ambientales más críticas para el cultivo de café de manera offline. La capacidad de generar alertas específicas incrementa la efectividad en la respuesta a factores ambientales adversos, ayudando en el manejo del cultivo como se visualiza en la Ilustración 46. Permitiendo igualmente el exportado de los datos para el análisis por personal especializado si fuese necesario como se en la Ilustración 45. Además de que el usuario puede visualizar en gráficos el comportamiento de los diferentes sensores en diferentes escalas de tiempo como se observa en la sección 4.4.8.
- La evaluación del sistema ha permitido verificar la veracidad, como se observa en la Tabla 6 y en la Tabla 16, precisión y oportunidad de los datos proporcionados, demostrando la confiabilidad del sistema de monitoreo. Estos resultados aseguran que los datos generados sean oportunos y precisos, facilitando la toma de decisiones informadas y promoviendo la sostenibilidad del cultivo.

## Referencias

- [1] The Apache Software foundation, «ABOUT APACHE,» 2024. [En línea]. Available: [https://httpd.apache.org/ABOUT\\_APACHE.html](https://httpd.apache.org/ABOUT_APACHE.html).
- [2] E. R. Moraguez, «Todo sobre ESP32: Guía y Aplicaciones Prácticas,» lovtechnology, 2024. [En línea]. Available: <https://lovtechnology.com/todo-sobre-esp32-guia-y-aplicaciones-practicas/>. [Último acceso: 25 Julio 2024].
- [3] C. Admin, «TODO SOBRE el SENSOR de PESO con ARDUINO,» Electroall, 02 11 2022. [En línea]. Available: <https://www.electroallweb.com/index.php/2022/11/02/todo-sobre-el-sensor-de-peso-con-arduino>.
- [4] PURESTORAGE, «¿Qué es MariaDB?,» Pure Knowledge, 2024. [En línea]. Available: <https://www.purestorage.com/es/knowledge/what-is-mariadb.html>. [Último acceso: 24 Julio 2024].
- [5] I. Souza, «Descubre qué es el lenguaje de programación PHP y en qué situaciones se hace útil,» Rockcontent, 09 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://rockcontent.com/es/blog/php/>. [Último acceso: 24 Julio 2024].
- [6] J. Borbino, «Pluviómetro: qué es, para qué sirve, cómo funciona y tipos,» Geoenciclopedia, 9 Octubre 2024. [En línea]. Available: <https://www.geoenciclopedia.com/pluviometro-que-es-para-que-sirve-como-functiona-y-tipos-1017.html>.
- [7] Hetzner, «Termux,» 28 10 2024. [En línea]. Available: <https://termux.dev/en/>. [Último acceso: 24 Julio 2024].
- [8] Compubit, «Guía sobre el TV BOX y sus utilidades,» Compubit, 2024. [En línea]. Available: <https://compubit.com.co/que-es-un-tv-box-y-para-que-sirve/>.
- [9] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, «El sector agrícola colombiano: una mirada al futuro,» Bogotá, Colombia, 2023.
- [10] UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria), «El sector agropecuario impulsa el crecimiento del PIB en el segundo trimestre de 2024,» 22 08 2024. [En línea]. Available: <https://upra.gov.co/es-co/saladeprensa/Paginas/El-sector-agropecuario-impulsa-el-crecimiento-del-PIB-en-el-segundo-trimestre-de-2024.aspx#:~:text=El%20valor%20agregado%20de%20la,el%20bienestar%20social%20del%20pa%C3%ADs..>
- [11] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, «Boletín Estadístico Sectorial Agropecuario 2022,» 2022. [En línea]. Available:

[https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/Bolet%C3%ADn\\_estad%C3%ADstico\\_sectorial\\_agropecuaria\\_2022.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/Bolet%C3%ADn_estad%C3%ADstico_sectorial_agropecuaria_2022.pdf).

- [12] Fundación Natura Colombia, «La adopción de tecnologías de monitoreo avanzado en la agricultura colombiana,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.naturacolombia.org/wp-content/uploads/2022/07/Informe-Tecnologia-Monitoreo-Avanzado-Agricultura.pdf>.
- [13] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Producción y consumo responsables,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/produccion-consumo-responsables>.
- [14] N. M.Sc Ivanchuk, «Agrometeorología: La precision es la clave del exito,» EOS DATA ANALYTICS, 25 09 2024. [En línea]. Available: <https://eos.com/es/blog/agrometeorologia-y-tiempo-agricultura/>.
- [15] M. de Agricultura y Desarrollo Rural, «El sector agrícola colombiano: una mirada al futuro,» Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural, Bogota, 2023.
- [16] Federacion Nacional de Cafeteros en Colombia, «Informe del gerente 2023 al 92 congreso nacional de cafeteros,» 04 12 2023. [En línea]. Available: <https://federaciondefcafeteros.org/app/uploads/2023/11/IG-92-CNC-DIGITAL.pdf>.
- [17] Federacion Nacional de Cafeteros en Colombia, «Producción anual de café de Colombia cierra 2022 en 11,1 millones de sacos,» 2023. [En línea]. Available: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-anual-de-cafe-de-colombia-cierra-2022-en-111-millones-de-sacos/#:~:text=Exportaciones%20caen%208%25%20en%202022&text=En%20diciembre%20las%20exportaciones%20cayeron,el%20mismo%20mes%20de%2020>.
- [18] L. Osborn, «How to Use a Crop Health Monitoring System,» Sentra, 29 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://sentra.com/resources/articles/crop-health-monitoring-system/>. [Último acceso: 2024 Agosto 05].
- [19] A. Shalimov, «Smart Agriculture Monitoring Solutions to Optimize Farming Productivity,» Eastern Peak, 02 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://easternpeak.com/blog/smart-agriculture-monitoring-solutions-to-optimize-farming-productivity/>. [Último acceso: 05 Agosto 2024].
- [20] A. Goncalves, «The importance of monitoring crops,» Agriplastics Community, 30 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://agriplasticscommunity.com/the-importance-of-monitoring-crops/>. [Último acceso: 05 Agosto 2024].
- [21] G. Chanchí, E. Gabriel, A. Ospina, A. Manuel y M. Saba, «Sistema IoT para el monitoreo de variables climatologicas en cultivos de agricultura urbana,» 08 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.14483/23448350.18470>.
- [22] K. León y O. Sánchez, «SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES EN CULTIVOS DE PAPA MEDIANTE IOT Y ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA,» 2020. [En línea].

Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/604e030e-b281-4cac-aea4-3bf94648e246/content>.

- [23] S. Segreña, A. Castro, D. Galvis y J. Alverto, «Sistema IoT flexible para el monitoreo de variables ambientales en aplicaciones agroindustriales,» 25 11 2022. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10554/63717>.
- [24] C. Cadavid, V. Vargas y M. Fabian, «Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y monitoreo de variables ambientales mediante Iot en los cultivos urbanos de la fundación mujeres empresarias Maria Poussepin,» 2021. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/10983/25546>.
- [25] S. Ossa, «Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos,» vol. 12, p. 51–60, 2017.
- [26] M. Vreugdenhil, I. Greimster-Pfeil, W. Preimesberger, S. Camici, W. Dorigo, M. Enenkel, R. Van der Schalie, S. Steele-Dunne y W. Wagner, «Microwave remote sensing for agricultural drought monitoring: Recent developments and challenges,» 29 11 2022. [En línea]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frwa.2022.1045451>.
- [27] Envira, «Monitorización de cultivos en continuo,» 2019. [En línea]. Available: <https://enviraiot.es/monitorizacion-de-cultivos/>. [Último acceso: 2023 09 30].
- [28] L. Crocetti, M. Forkel, M. Fischer, F. Jurečka y A. Grlj, «Earth Observation for agricultural drought monitoring in the Pannonian Basin (southeastern Europe): current state and future directions,» *Reg Environ Change*, vol. 20, n° 123, 28 10 2020.
- [29] J. Lynch, M. Cain, D. Frame y R. Pierrehumbert, «Agriculture’s Contribution to Climate Change and Role in Mitigation Is Distinct From Predominantly Fossil CO2-Emitting Sectors,» *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 4, 2021.
- [30] R. Sishodia, R. Ray y S. Singh, «Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review,» *Remote Sensing*, vol. 12, n° 19, 23 09 2020.
- [31] Grupo empresarial Nutresa Industria colombiana de café, «Variedades de café en Colombia,» Nutresa, 09 11 2022. [En línea]. Available: <https://www.apasionadosporelcafe.com/blog/variedades-de-cafe-en-colombia/>.
- [32] J. Moreno, «Variedades del Café,» La tienda del cafe colombiano, 09 11 2020. [En línea]. Available: <https://latiendadelcafe.co/blogs/cafe-colombiano/variedades-del-cafe>.
- [33] Grupo empresarial Nutresa Industria colombiana de café, «Variedades de café en Colombia,» Nutresa, 09 11 2021. [En línea]. Available: <https://www.apasionadosporelcafe.com/blog/variedades-de-cafe-en-colombia/>.
- [34] J. Moreno, «Variedades de café creadas en laboratorio,» La tienda del cafe, 31 07 2022. [En línea]. Available: <https://latiendadelcafe.co/blogs/cafe-colombiano/variedades-de-cafe-creadas-en-laboratorios>.

- [35] F. Kirk, T. Weedon y P. Kirik, Instrumentation and process control, American Technical Publishers, 2014.
- [36] J. Ing. Peña, «La estación de monitoreo,» Universidad Industrial De Santander), 15 1 2015. [En línea]. Available: [https://halley.uis.edu.co/tierra/?page\\_id=224](https://halley.uis.edu.co/tierra/?page_id=224).
- [37] G. A. Meneses Benavides, Principios de instrumentación electrónica y telemetría, Medellín: Universidad San Buenaventura, 2015.
- [38] OCEAN DATA MX, «COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA SENSORES DE DIVERSOS TIPOS, AMBIENTE MARINO O TERRESTRE,» 2024. [En línea]. Available: <https://oceandata.mx/telemetria.php>.
- [39] Alcaldía Municipal de San Mateo en Boyacá, «Geografía,» 10 07 2023. [En línea]. Available: <http://www.sanmateo-boyaca.gov.co/municipio/geografia>.
- [40] I. A. M. Silva, «Cultivo de café: cómo es, proceso y factores que influyen,» AgroTendencia, 2019. [En línea]. Available: <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos/el-cultivo-de-cafe/>.
- [41] Vivero Flores y frutos, «Factores Ambientales para un Mejor Café,» 17 dic 2022. [En línea]. Available: <https://floresyfrutos.com/product/planta-de-cafe-castillo/>.
- [42] CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CAFÉ, «Guía técnica para el cultivo de café,» Octubre 2020. [En línea]. Available: [http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2021/icafeagueiatecnica2020min\\_change\\_m eta.pdf](http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2021/icafeagueiatecnica2020min_change_m eta.pdf).
- [43] R. Aguilar-González, M. Cárdenas-Juárez, J. C. Rodríguez-Ortiz y M. J. Romero-Méndez, «Monitoreo de Temperatura Mediante Red de Sensores para Mejorar el Uso del Agua en la Agricultura.,» *Terra Latinoamericana*, n° e1626, p. 41, 16 02 2024.
- [44] CICAPE, «Guía técnica para el Cultivo de Cafe,» 2018 Marzo 12. [En línea]. Available: <https://infoagronomo.net/guia-tecnica-cultivo-de-cafe-pdf/>.
- [45] ETC, «DHT11 Datasheet,» Alldatasheet.com, [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1440068/ETC/DHT11/328/5/DHT11.html>.
- [46] Aosong Electronics Co.,ltd, «DHT22 Datasheet,» Alldatasheet.com, [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132459/ETC2/DHT22/109/1/DHT22.html>.
- [47] Sensirion, «SHT31 Datasheet - Version 3,» Alldatasheet.com, 8 2016. [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/897975/ETC2/SHT31/94/1/SHT31.html>.
- [48] Bosch, «BME280 Datasheet - Version 1.6,» Alldatasheet.com, 09 2018. [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132060/BOSCH/BME280/173/1/BME280.html>.

- [49] Silicon Labs, «SI7021 Datasheet - Version 1.1,» Alldatasheet.com, 2015. [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/791426/SILABS/SI7021/215/1/SI7021.html>.
- [50] Handson Technology, «AHT10 High-Precision Digital Temperature & Humidity Sensor Module,» robu.in, 01 2021. [En línea]. Available: <https://robu.in/wp-content/uploads/2021/01/AHT10.pdf>.
- [51] L. Llamas, «Detector de lluvia con Arduino y sensor FC-37 o YL-83,» Luis LLamas - Ingeniería, informática y diseño, 2024. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-lluvia/>.
- [52] BYTHEWAY, «Sensor Detector De Lluvia Agua Fc-37 Arduino,» Mercado Libre, [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-474177121-sensor-detector-de-lluvia-agua-fc-37-arduino-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-474177121-sensor-detector-de-lluvia-agua-fc-37-arduino-_JM).
- [53] e-Gizmo Mecatronix Central, «Rain Drop Sensor - Version 1.0,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.e-gizmo.net/oc/kits documents/Rain drops sensor/Rain Drop sensor.pdf>.
- [54] Cirkít Designer, «Humidity YL-69,» [En línea]. Available: <https://docs.cirkitdesigner.com/component/983b91b0-610d-47cb-8b80-a246d92e3608/humidity-yl-69>.
- [55] DFROBOT, «SEN0193 Datasheet,» Digi-Key, 2017. [En línea]. Available: <https://www.digikey.jp/htmldatasheets/production/2071177/0/0/1/sen0193.html>.
- [56] V. Dr. Cherlinka, «Sensores De Humedad Del Suelo: ¿Para Qué Sirven?,» EOS DATA ANALYTICS, 21 05 2024. [En línea]. Available: <https://eos.com/es/blog/sensores-de-humedad-del-suelo/#:~:text=Sensores%20De%20Humedad%20Del%20Suelo%20En%20Agricultura%20De%20Precisi%C3%B3n,requieren%20mucho%20mano%20de%20obra>.
- [57] Astromet, «Pluviómetro manual de 40 litros,» Astromet, 2024. [En línea]. Available: <https://www.astromet.es/wp-content/uploads/2020/11/d2145-pluviometro-lectura-directa.jpg>.
- [58] ONAC, «Pagina Oficial: ONAC,» [En línea]. Available: <https://onac.org.co/>.
- [59] Z. Xi, «The comparison of decentralized and centralized structure of network communication in different application fields,» Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.atlantispress.com/proceedings/msie-19/125933251>.
- [60] Espressif Systems, «ESP32 Datasheet - Version 3.0,» Alldatasheet.com, 2019. [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1148023/ESPRESSIF/ESP32/564/1/ESP32.html>.
- [61] Espressif, «esp32\_datasheet\_en,» 09 2024. [En línea]. Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).
- [62] Espressif, «ESP8266EX - Datasheet,» 06 2023. [En línea]. Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf).

- [63] Arduino, «Arduino® UNO R3,» 23 10 2024. [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>.
- [64] STMicroelectronics, «STM32F103x8 - Datasheet,» 09 2023. [En línea]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>.
- [65] Espressif Systems, «ESP8266 Datasheet - Version 1.3,» Alldatasheet.com, 2017. [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132995/ESPRESSIF/ESP8266/566/1/ESP8266.html>.
- [66] Umaker group, «COMPARATIVA ENTRE LOS MÓDULOS ESP32 Y ESP8266,» 2024. [En línea]. Available: <https://umakergroup.com/comparativa-entre-esp32-y-esp8266/#:~:text=El%20ESP32%20tiene%20m%C3%A1s%20GPIO,m%C3%BAltiples%20funciones%20al%20mismo%20pin.&text=Diagrama%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20pines%20de%201%20kit%20ESP8266%20ESP%2D12E%20NodeMCU..>
- [67] Raspberry, «Raspberry PI 4 model B Datasheet - Version 1.1,» 03 2024. [En línea]. Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>.
- [68] Lenovo, «ThinkPad X131e - Datasheet,» 06 2014. [En línea]. Available: [https://psref.lenovo.com/syspool/Sys/PDF/withdrawnbook/ThinkPad\\_X131e\\_WE.pdf](https://psref.lenovo.com/syspool/Sys/PDF/withdrawnbook/ThinkPad_X131e_WE.pdf).
- [69] Shenzhen Nanxiangzi Technology Co., «FCC ID 2AZCT-T95,» FCC.io, 18 04 2021. [En línea]. Available: <https://fccid.io/2AZCT-T95>.
- [70] PHP, «¿Qué es PHP?,» 15 11 2024. [En línea]. Available: <https://www.php.net/manual/es/intro-whatis.php>.
- [71] G. Morantes, G. Rincón y N. Pérez, «MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA ESTIMAR CONCENTRACIÓN DE PM1,» *Revista internacional de contaminación ambiental*, pp. 179-194, 21 08 2020.
- [72] CSB, «Datasheet GP645,» 07 2024. [En línea]. Available: <https://csb-battery.com/wp-content/uploads/2024/07/CSB-Datasheet-GP645-%E2%80%93053124.pdf>.
- [73] The Weather Channel, «Tiempo mensual-San Mateo, Boyacá,» 31 10 2024. [En línea]. Available: <https://weather.com/es-CO/tiempo/mensual/l/ec2e44d0e6f2962610b974a92cddceb9d48c86b4e653007ad7d44036be5b1922>.
- [74] AccuWeather, «San Mateo - October weather,» 31 10 2024. [En línea]. Available: <https://www.accuweather.com/es/co/san-mateo/107646/october-weather/107646?year=2024>.

## Anexos

<https://drive.google.com/drive/folders/1VIRb6Cxi9i7YGtATnNRZJr6LoihSqbhq>