



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Electrónica

Fecha: 13 de febrero de 2024.

Autores: Alejandra Gómez Parra.

Nombre del Proyecto de Grado: Implementación de un módulo de suelo para el monitoreo remoto de cultivos de alto rendimiento.

Director:

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, hemos verificado que la estudiante indicada arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.



LUIS EDUARDO TOBÓN LLANO



SIMÓN PLATA EASTMAN

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar el título de Ingeniero Electrónico.

Camilo Rocha

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias

[Handwritten signature]

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Carrera Ingeniería Electrónica

[Handwritten signature]

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Trabajo de Grado

L. A. J. Plata E.

Ing. Simón Plata Eastman
Co-Director Trabajo de Grado

[Handwritten signature]

Ing. Natalia Polo Moreno
Jurado 1

Manuel V. Valencia

Ing. Manuel Vicente Valencia Diaz
Jurado 2



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**
Ingeniería Electrónica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

Implementación de un módulo de suelo para el
monitoreo remoto de cultivos de alto rendimiento

Alejandra Gómez Parra

Director

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

Codirector

Simón Plata Eastman

13 de febrero de 2024

Santiago de Cali, 13 de febrero de 2024

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Implementación de un módulo de suelo para el monitoreo remoto de cultivos de alto rendimiento”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

Alejandra Gómez Parra

Alejandra Gómez Parra

Santiago de Cali, 13 de febrero de 2024

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Implementación de un módulo de suelo para el monitoreo remoto de cultivos de alto rendimiento”, realizado por Alejandra Gómez Parra, estudiante de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Trabajo de Grado



Simón Plata Eastman
Co-Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

A mis padres y hermana, su amor es la fuerza que siempre me motiva a cumplir mis objetivos y no abandonarlos ante cualquier dificultad. Agradezco profundamente el esfuerzo y la entrega dedicados a mi formación, brindándome las herramientas necesarias para alcanzar el éxito.

A mis profesores, Simón Plata y Luis Eduardo Tobón, quienes con su compromiso y paciencia fueron una guía valiosa en mi formación académica y forjaron las bases de mi futuro profesional.

Al equipo de desarrollo del proyecto PhenoAgro del instituto de investigación en Ciencias ÓMICAS, Natalia Polo, Victor Ortega y Eduardo Ramírez, cuya orientación y apoyo constante contribuyeron significativamente en la realización del proyecto de grado.

A mis compañeros y amigos, con quienes compartí risas, lágrimas, desafíos y logros. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este capítulo llamado vida universitaria.

Glosario

Símbolos

°C Unidad de medición de la temperatura (Grados centígrados)

Acrónimos y Abreviaturas

<i>ÓMICAS</i>	Optimización Multiescala In-silico de Cultivos Agrícolas Sostenibles
<i>MPPC</i>	Módulo de planta, potencia y comunicaciones
<i>FAO</i>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
<i>SA</i>	Seguridad alimentaria
<i>IA</i>	Inseguridad alimentaria
<i>IoT</i>	Internet of Things (Internet de las cosas)
<i>OPS</i>	Organización Panamericana de la Salud
<i>WFP</i>	World Food Programme (Programa Mundial de Alimentos)
<i>UNICEF</i>	United Nations Children's Fund (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia)
<i>OMS</i>	Organización Mundial de la Salud
<i>FIDA</i>	Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola
<i>AP</i>	Agricultura de precisión
<i>GPS</i>	Global Position System (Sistema de Posicionamiento Global)
<i>OSI</i>	Open Systems Interconnection (Interconexión de Sistemas Abiertos)
<i>HTP</i>	High-Throughput Phenotyping (Fenotipado de alto rendimiento)
<i>SENA</i>	Servicio Nacional de Aprendizaje Colombiano
<i>IP</i>	Ingress Protection (Protección de ingreso)
<i>PIC</i>	Programmable Interrupt Controller (Controlador de interrupciones programable)
<i>VDC</i>	Voltaje de la corriente directa
<i>mA</i>	Miliamperio
<i>mm</i>	Milímetro
<i>USD</i>	Dólar estadounidense
<i>COP</i>	Peso colombiano
<i>ms</i>	Milisegundo
<i>m</i>	Metro
<i>UPDI</i>	Unified Program and Debug Interface (Interfaz unificada de programación y depuración)
<i>SPI</i>	Serial Peripheral Interface (Interfaz periférica en serie)
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)
<i>VIH</i>	Voltage Input High (Voltaje de entrada alto)
<i>VIL</i>	Voltage Input Low (Voltaje de entrada bajo)
<i>CAN</i>	Controller Area Network (Red de área de la controladora)

<i>UART</i>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)
<i>USART</i>	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter (Transmisor-Receptor Síncrono y Asíncrono Universal)
<i>TTL</i>	Transistor-transistor logic (Lógica transistor a transistor)
<i>CAP</i>	Centro de automatización de procesos
<i>PVC</i>	Polyvinyl chloride (Policloruro de vinilo)
<i>SLS</i>	Selective Laser Sintering (Sinterizado selectivo por láser)
<i>GND</i>	Ground (Tierra)
<i>VCC</i>	Voltaje de corriente continua
<i>HEX</i>	Hexadecimal
<i>uA</i>	Microamperios
<i>BOM</i>	Bill Of Materials (Lista de materiales)
<i>ODS</i>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<i>TRL</i>	Technology Readiness Levels (Niveles de madurez tecnológica)

Términos

<i>Gateway</i>	Dispositivo que actúa como punto de entrada o salida para conectar una red con otra. Su función principal es facilitar la comunicación entre redes que utilizan diferentes protocolos de comunicación.
<i>LoRa</i>	Tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo de energía y largo alcance. Se usa en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) para transmitir datos entre dispositivos a distancias significativas.
<i>RS485</i>	Estándar de interfaz para la transmisión de datos en serie. Tiene la capacidad de permitir la comunicación de datos a largas distancias y en entornos ruidosos.
<i>Modbus</i>	Protocolo de comunicación que sigue un modelo maestro/esclavo, donde un dispositivo maestro inicia y controla la comunicación, y uno o más dispositivos esclavos responden a las solicitudes del maestro.
<i>CAN</i>	Estándar de comunicación donde varios dispositivos comparten un solo canal de comunicación.

Resumen

El monitoreo de variables agrícolas puede mejorar la tecnificación y disminuir el tiempo en los procesos de medición, facilitando a los agricultores el control de sus cultivos, incrementando la productividad y mejorando la calidad de los productos. El instituto de investigación en Ciencias ÓMICAS - iÓMICAS presentó PhenoAgro como una plataforma de fenotipado de alto rendimiento con el fin de optimizar la adquisición de datos de plantas individuales y grandes parcelas de cultivo, dicha plataforma se compone de los siguientes módulos: módulo de planta, potencia y comunicaciones o MPPC, módulo de variables atmosféricas (pluviosidad, radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad atmosférica), módulo de movimiento (voltaje y corriente de motores, posición lineal, posición radial) y módulo de variables de suelo (pH, conductividad, nitrógeno, potasio, fósforo, temperatura y humedad del suelo).

En este trabajo se propone un módulo de bajo costo, alta resolución y cobertura para la medición de variables agrícolas en cultivos de alto rendimiento, para ello, se realizó el diseño e implementación de un módulo de monitoreo remoto para medir variables de suelo como la temperatura y la humedad, utilizando equipos livianos, de fácil instalación, mantenimiento y dotando al dispositivo de protección completa contra polvo y chorros de agua. El sistema está ubicado en el nivel 5 en cuanto a los niveles de preparación tecnológica, que consta de la validación de componentes y subsistemas en un entorno relevante, por esta razón, se prueba en el instituto ÓMICAS ubicado en la Pontificia Universidad Javeriana de la ciudad de Cali. El proyecto se encuentra orientado en el segundo objetivo de desarrollo sostenible denominado *hambre cero*, el cual plantea poner fin al hambre y mejorar la nutrición promoviendo una agricultura más sostenible y garantizando la seguridad alimentaria. El módulo propuesto es compatible con el MPPC de la plataforma PhenoAgro para visualizar la información en la plataforma web.

PALABRAS CLAVE: PhenoAgro, tecnificación, ÓMICAS, fenotipado, agronómico, resolución, MPPC, seguridad alimentaria.

Abstract

The monitoring of agricultural variables can improve technological processes and reduce time in measurement, facilitating farmers to control their crops, increasing productivity and improving products quality. The research institute in OMICS Sciences - iÓMICAS presented PhenoAgro as a high-performance phenotyping platform in order to optimize the data acquisition of individual plants and large crop plots, this platform is composed of the following modules: plant, power and communications module or MPPC, atmospheric variables module (rainfall, solar radiation, wind speed and direction, temperature and atmospheric humidity), motion module (motor voltage and current, linear position, radial position) and soil variables module (pH, conductivity, nitrogen, potassium, phosphorus, soil temperature and humidity).

This work proposes a low cost, high resolution and coverage module for the measurement of agricultural variables in high yield crops. For this purpose, the design and implementation of a remote monitoring module for the measurement of soil variables such as temperature and humidity. The module uses light equipment, easy installation, maintenance and providing with complete protection against dust and water jets. The system is located at level 5 in terms of TRL (Technology Readiness Levels), which consists of the validation of components and subsystems in a relevant environment; for this reason, it is being tested at the ÓMICAS institute located at the Pontificia Universidad Javeriana in the city of Cali. The project is oriented to the second sustainable development goal called *zero hunger*, which aims to end hunger and improve nutrition by promoting a more sustainable agriculture and ensuring food security. The proposed module is compatible with the MPPC of the PhenoAgro platform to visualize the information on the web platform.

KEYWORDS: PhenoAgro, technification, ÓMICAS, phenotyping, agronomic, resolution, MPPC, food safety.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	2
2.1. Formulación	3
3. Justificación	4
4. Objetivos	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos Específicos	5
5. Marco de Referencia	6
5.1. Áreas Temáticas	6
5.2. Marco Teórico	6
5.2.1. Conceptos relevantes	7
5.2.2. Métodos de medición	8
5.3. Trabajos Relacionados	9
6. Materiales y Métodos	11
6.1. Diseño	12
6.1.1. Revisión de especificaciones, requerimientos y limitaciones	12
6.1.2. Selección de componentes y proveedores	14
6.1.3. Sensores de humedad de suelo	14
6.1.4. Sensores de temperatura de suelo	16
6.1.5. Diseño de diagramas esquemáticos	18
6.1.6. Diseño de PCB	19
6.1.7. Diseño de firmware	20
6.2. Implementación	22
6.2.1. Implementación del firmware	22
6.2.2. Ensamble del prototipo	23
6.3. Evaluación	24
6.3.1. Análisis de fallas	25
6.3.2. Demostraciones y pruebas	25
7. Prototipo final	31
8. Conclusiones	36

Índice general	10
<hr/>	
9. Recomendaciones	37
10. Anexos	38
Anexos	38
Anexo 1 – Esquemáticos en LTspice y cuadro comparativo	38
Anexo 2 – Especificaciones sensores	39
Anexo 3 – Cotizaciones	39
Anexo 4 – Ficha informativa INSTASOIL	40
Bibliografía	41

Índice de figuras

2.1. Primera versión de Gateway del proyecto PhenoAgro. Fuente: Elaboración propia.	3
6.1. Proceso de diseño módulo variables de suelo. Fuente: Elaboración propia.	11
6.2. Diseño módulo variables de suelo. Fuente: Elaboración propia.	13
6.3. Sensor de humedad de suelo FC-28. Fuente: Dualtronica.	15
6.4. Sensor de humedad de suelo SEN0193. Fuente: Zamux Electrónica.	15
6.5. Sonda de temperatura de suelo THERM200. Fuente: Alphaomega Electronics.	17
6.6. Sonda de temperatura de suelo DS18B20. Fuente: Naylamp Mechatronics.	17
6.7. Diagrama esquemático. Fuente: Elaboración propia.	19
6.8. Diseño de PCB en KiCad. Fuente: Elaboración propia.	20
6.9. Máquina de estados. Fuente: Equipo de desarrollo PhenoAgro.	21
6.10. PCB con los componentes soldados.	23
6.11. Recubrimiento de la electrónica con resina epóxica.	23
6.12. Ensamble del prototipo.	24
6.13. Prueba 1. Sensores en suelo húmedo.	26
6.14. Prueba 2. Sensores en suelo seco.	26
6.15. Prueba 3. Sensores en agua sin hielo.	27
6.16. Mediciones en Microchip Studio.	27
6.17. Mediciones en Arduino.	28
6.18. Prueba 4. Sensores en agua con hielo.	28
6.19. Calibración sensor humedad de suelo V1.0. Fuente: DFROBOT.	29
6.20. Curva de calibración sensor humedad. Fuente: Elaboración propia.	30
7.1. Módulo de suelo conectado al MPPC de PhenoAgro.	31
7.2. Medición temperatura y humedad de suelo. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.	31
7.3. Módulo de suelo conectado al MPPC Tripas de PhenoAgro.	32
7.4. Vista de la plataforma. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.	32
7.5. Ubicación MPPC Cambridge. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.	33
7.6. Información módulo de energía. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.	33
7.7. Gráfica de tendencia temperatura de suelo. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.	34
7.8. Gráfica de tendencia temperatura de suelo. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.	34
10.1. Esquemático caso 1 ($V_{IH} = 2.2V$).	38
10.2. Esquemático caso 2 ($V_{IL} = 0.8V$).	38
10.3. Esquemático caso 3 ($V_{IL} = 1.5V$).	39
10.4. Ficha informativa plataforma INSTASOIL. Fuente: INSTACROPS.	40

Índice de cuadros

6.1. Criterios de selección sensor humedad de suelo. Fuente: Elaboración propia.	14
6.2. Especificaciones sensor humedad SEN0193. Fuente: DFROBOT.	16
6.3. Criterios de selección sensor temperatura de suelo. Fuente: Elaboración propia.	16
6.4. Especificaciones sensor temperatura DS18B20. Fuente: Naylamp Mechatronics.	18
6.5. Protocolo PhenoAgro. Fuente: Equipo de desarrollo PhenoAgro.	21
6.6. Mediciones de temperatura y humedad en suelo húmedo.	25
6.7. Mediciones de temperatura y humedad en suelo seco.	26
6.8. Mediciones de temperatura y humedad en agua sin hielo.	27
6.9. Mediciones de temperatura y humedad en agua con hielo.	28
6.10. Relación humedad y salida del sensor.	29
7.1. Costos del prototipo. Fuente: Elaboración propia.	35
7.2. Corriente consumida por la PCB. Fuente: Elaboración propia.	35
10.1. Comparación valor simulado vs cálculos teóricos. Fuente: Elaboración propia.	39

Introducción

Los principales retos de la humanidad para los próximos 50 años serán la energía, el agua, la alimentación, el medio ambiente y la pobreza. La agricultura mundial juega un papel importante para garantizar la seguridad alimentaria y suministrar energía limpia de forma sostenible. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la seguridad alimentaria se da cuando todas las personas tienen acceso físico, social y económico a suficientes alimentos nutritivos para llevar una vida saludable y activa [1].

Hoy en día, el mundo físico y el mundo virtual se encuentran conectados con el fin de facilitar la vida de las personas, dando lugar al concepto de Agricultura 4.0 o Agricultura digital, un conjunto de tecnologías centradas en la digitalización de procesos agrícolas. El Agro 4.0 emplea redes de sensores, métodos informáticos de alto rendimiento, computación en la nube y sistemas con el fin de contribuir al aumento de los índices de productividad, al uso eficiente de insumos, mejorar la calidad del trabajo y reducir el impacto medioambiental [2] [3].

Sin duda, el objetivo no solo es producir mayor cantidad de alimentos, sino garantizar que los cultivos sean saludables y con desarrollo de variedades locales, logrando un crecimiento económico sostenible. Un ejemplo exitoso del uso de este conjunto de tecnologías es la industria de la caña de azúcar, Cenicaña, que transformó sus procedimientos de siembra y cosecha en cinco departamentos ayudando a mejorar la productividad del campo colombiano. “Actualmente, producimos 225.000 millones de kilos de caña al año, gracias al trabajo de 2.750 productores, repartidos en 14 ingenios y 167 zonas agroecológicas, las cuales abarcan 50 municipios del territorio colombiano”, reveló Freddy Garcés Obando, director general de Cenicaña [4].

El problema central consiste en que actualmente los sistemas usados para medir y monitorear cultivos tienen costos elevados, baja resolución espacial y baja cobertura, debido a que son de difícil mantenimiento, carecen de infraestructura, el número de dispositivos de sensado es bajo y los costos de implementación y escalamiento son altos. Por estas razones, se plantea un módulo de bajo costo, alta resolución y cobertura para la medición de variables de suelo como temperatura y humedad en cultivos de alto rendimiento con el fin de conocer el estado y evolución de los mismos con la posibilidad de visualizar la información de forma remota y mejorar la productividad.

Este documento sigue un orden específico: inicia con la descripción del problema a abordar, su justificación y el impacto del proyecto. Luego, establece el propósito general y los objetivos específicos para lograrlo. Se presenta un marco de referencia que incluye áreas temáticas, marco teórico y trabajos relacionados. Después se detallan los materiales y métodos utilizados, seguidos de los resultados obtenidos a partir de pruebas. Finalmente, se presentan las conclusiones en respuesta a los objetivos y recomendaciones que logran mejorar la problemática, además de información complementaria en el apartado de anexos.

Planteamiento del Problema

La seguridad alimentaria (SA) hace referencia a que todas las personas tienen acceso físico, social y económico a suficientes alimentos seguros y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimentarias para alcanzar un estilo de vida saludable y activo (EC-FAO Food Security, 2008). Garantizar la seguridad alimentaria es uno de los objetivos de Desarrollo Sostenible, el objetivo 2 "*hambre cero*" plantea poner fin al hambre y mejorar la nutrición [5].

La incertidumbre que tiene una persona respecto a la posibilidad de obtener los alimentos necesarios para el consumo diario se conoce como inseguridad alimentaria (IA). En Latinoamérica, existen entre 60 y 65 millones de personas que sobreviven en un estado de IA grave, donde la persona no consume alimentos durante un día o más. En el año 2019, 191 millones de personas estuvieron afectadas por IA moderada, sin disponer de recursos suficientes para llevar a cabo una vida saludable, situación que ha empeorado con el aumento de 13,2 millones de personas con subalimentación [6].

En el año 2021, Colombia se ubicó en el puesto 52 del índice de seguridad alimentaria, principalmente afectada por factores como la degradación del suelo, la escasez de agua, el cambio climático y la explosión demográfica. Hacia el año 2050 se espera un aumento de la población mundial de hasta 9.700 millones de personas, es por ello que se requiere aumentar la producción de alimentos un 50%. En una población que va en crecimiento cada vez hay menos tierra apta para cultivar, por lo tanto, existe la necesidad de aumentar la producción de alimento ocupando menos hectáreas de tierra bajo condiciones restrictivas como el cambio climático o nuevas plagas sin afectar el ambiente y en un periodo de tiempo reducido [1].

Partiendo del principio anterior, iÓMICAS busca desarrollar e implementar estrategias científico-tecnológicas con el fin de mejorar las variedades agrícolas, aportar a la SA y a la producción sostenible a nivel mundial, utilizando información biológica, robótica, sensórica, biología computacional y experimental, para entender el comportamiento de los cultivos a estreses bióticos (plagas) y abióticos (altas temperaturas) y producir plantas que se adapten a las condiciones medioambientales actuales [1]. Hoy en día, los sistemas utilizados para mediciones y monitoreo de cultivos utilizan materiales costosos que son de difícil mantenimiento, carecen de infraestructura y tienen un bajo número de dispositivos de sensado.

En síntesis, la principal dificultad reside en que el proceso actual de medición de variables de cultivo como temperatura y humedad es costoso, de baja resolución espacial y baja cobertura, debido a los altos costos de implementación y escalamiento de la estación central (Gateway), un sistema que procesa información captada por sí misma y por estaciones satélites.

PhenoAgro es una plataforma de dispositivos IoT interconectados que busca lograr una gestión eficiente en actividades agrícolas a nivel de cultivo, midiendo variables críticas y conociendo el estado y evolución de los cultivos con la posibilidad de visualizar la información remotamente. Con el monitoreo de variables como la precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad en aire y suelos, se puede determinar el estado de un cultivo en tiempo real identificando rasgos fenotípicos, estableciendo condiciones particulares del cultivo y mejorando su productividad.

El presente proyecto plantea el desarrollo de un módulo de bajo costo, alta resolución y cobertura para medir variables de suelo como temperatura y humedad en cultivos de alto rendimiento con el objetivo de conocer la evolución de los cultivos permitiendo al usuario visualizar la información remotamente y mejorar la productividad estableciendo condiciones particulares de riego, nutrición, corte y cosecha. En la figura 2.1 se presenta una de las primeras versiones del Gateway de PhenoAgro ubicado en el instituto Ómicas.



Figura 2.1: Primera versión de Gateway del proyecto PhenoAgro. Fuente: Elaboración propia.

2.1. Formulación

Con esta investigación, se desea aprender sobre la implementación de un módulo de suelo para el monitoreo remoto de cultivos de alto rendimiento, por ello, ha surgido la siguiente pregunta de investigación la cual se busca responder con el proyecto: ¿Cómo se realiza la medición de variables de suelo como temperatura y humedad para cultivos de alto rendimiento en el instituto de investigación en Ciencias ÓMICAS ubicado en la ciudad de Cali?

Justificación

Las variables agrícolas como temperatura y humedad juegan un papel de gran importancia en las investigaciones sobre PhenoAgro, con el estudio de estas variables es posible determinar el estado general de muchos cultivos de alto rendimiento, además el comportamiento y la respuesta de los cultivos a estreses bióticos (plagas) y abióticos (altas temperaturas, pocos nutrientes) permite realizar estudios sobre el estado del cultivo en tiempo real y de forma remota [1] [7].

Las mediciones que se deben realizar para desplegar la información deseada, pueden resultar costosas debido a la cantidad y al tipo de materiales utilizados en la implementación del sistema, actualmente, este sistema presenta resultados de baja resolución espacial con una corta cobertura de sensado, pues el número de dispositivos es pequeño a causa de sus altos costos y poca infraestructura. Por otro lado, estudios recientes han demostrado que el sector agrícola colombiano se perfila como uno de los sectores más productivos y competitivos del país, gracias a los avances respecto al desarrollo científico - tecnológico y al acceso a recursos productivos y financieros (procolombia, 2017) [7] [8]. Debido a lo anterior, implementar un módulo de monitoreo remoto y en tiempo real para la medición de variables de suelo en cultivos de alto rendimiento tendrá un fuerte impacto en el mejoramiento de la productividad de tales cultivos, brindando un aumento en la tecnificación de los procesos de medición de variables y disminuyendo el gasto excesivo en recursos como agua y fertilizantes.

Realizar la implementación de una estación central en una zona de mayor extensión, se necesitaría del empleo de más recursos para ofrecer al usuario mayor cobertura y un servicio completo, esto conlleva a un aumento considerable de costos los cuales tendría que asumir por completo el usuario, por lo tanto, con el presente proyecto se busca implementar un modelo más económico y viable, que contribuya de la misma manera que el sistema actual, mejorando la calidad de los productos y aportando a la seguridad alimentaria. Con el monitoreo de las variables agrícolas se pueden disminuir el tiempo de los procesos de medición y las pérdidas por plagas presentes en los cultivos [9].

Objetivos

4.1. Objetivo General

Desarrollar un módulo de bajo costo, alta resolución y cobertura para la medición de variables de suelo como temperatura y humedad en cultivos de alto rendimiento.

4.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar un módulo de monitoreo remoto para la medición de variables agrícolas (temperatura y humedad) en cultivos de alto rendimiento.
2. Implementar un módulo de monitoreo remoto para la medición de variables agrícolas (temperatura y humedad) en cultivos de alto rendimiento.
3. Evaluar el funcionamiento del módulo diseñado para la medición y monitoreo en tiempo real de variables críticas (temperatura y humedad) en cultivos de alto rendimiento.

Marco de Referencia

5.1. Áreas Temáticas

- Smart agriculture
- Agricultural engineering
- Internet of Things
- Radio transceivers

5.2. Marco Teórico

Durante los últimos años, la seguridad alimentaria es uno de los temas más importantes en la agenda económica mundial (Nande, Pérez, Martínez, Rangel, 2019). Existen factores como el crecimiento de la población mundial, la urbanización progresiva y el cambio climático, que generan preocupación respecto a la posibilidad de garantizar la seguridad alimentaria a escala mundial (Marzeda-Mlynarska, 2019). Garantizar la seguridad alimentaria y nutricional, constituye uno de los elementos transversales y fundamentales para certificar el cumplimiento de los 17 ODS de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (FAO, OPS, WFP y UNICEF, 2018), (FAO, 2018) [5].

Colombia cuenta con el documento Conpes 113 de 2008, que estableció la Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional, la cual tiene como objetivo “Garantizar que toda la población colombiana disponga, acceda y consuma alimentos de manera permanente y oportuna, en suficiente cantidad, variedad, calidad e inocuidad”. Dicha Política está dirigida a toda la población colombiana y, para su cumplimiento, se requiere de la realización de acciones que contribuyan a la disminución de desigualdades sociales y económicas, asociadas a la inseguridad alimentaria y nutricional en la población en condiciones de vulnerabilidad [10].

El instituto ÓMICAS de Cali dirige el proyecto PhenoAgro, se trata de una plataforma de dispositivos IoT georeferenciados que permite el control de variables del suelo y el ambiente en función de la información acerca del estado y evolución de cultivos de alto rendimiento obtenida remotamente y en tiempo real, con el fin de mejorar la productividad y la optimización de recursos [11], ayudando a garantizar el acceso no sólo a alimentos suficientes, sino también nutritivos que constituyan una dieta saludable para la población (FAO, FIDA, UNICEF, WFP Y OMS, 2019).

5.2.1. Conceptos relevantes

Para llevar a cabo el diseño del módulo de suelo destinado al monitoreo remoto de cultivos de alto rendimiento, es pertinente abordar conceptos relevantes sobre el tema, tales como:

Variables agrícolas

Las variables agrícolas son variables que intervienen significativamente en el éxito o fracaso del rendimiento y calidad de los cultivos. Conocer el comportamiento de las variables agrícolas permite determinar la técnica más adecuada en cada etapa de los procesos de cultivo y supervisión, haciendo uso eficiente y sostenible de los recursos requeridos. Sin duda, los avances tecnológicos han permitido la adquisición, análisis y transmisión de la información de variables ambientales como: temperatura ambiente, luminosidad, humedad y pH del suelo, brindando un apoyo a los agricultores en el control de sus cultivos visualizando de forma remota y en tiempo real la información de los datos recopilados en la red [12].

Agricultura de precisión

La Agricultura de precisión (AP) se define como un conjunto de procedimientos y procesos que tienen como objetivo optimizar espacial y temporalmente el ciclo de vida de los cultivos haciendo uso de las tecnologías de GPS (Global Position System), sensores, satélites e imágenes aéreas para evaluar con mayor precisión el estado del suelo y la producción de los cultivos, es decir, es el proceso de colocar el producto y cantidad adecuada, en el lugar y momento adecuado. En la AP, luego de la adquisición de los datos, procede al análisis e interpretación de los mismos, estableciendo un procedimiento de actuación de acuerdo a las necesidades del usuario [13].

LoRa

LoRa es una tecnología de comunicación inalámbrica que emplea modulación en radiofrecuencia logrando comunicaciones a largas distancias (kilómetros), además, es un sistema sólido frente a las interferencias y consume menor potencia en comparación con el WiFi. Por otro lado, LoRaWAN es una especificación de redes encargada de unir diferentes dispositivos LoRa manejando canales y parámetros de conexión como el canal, ancho de banda y cifrado de datos [14].

Protocolo RS485

RS485 es un estándar de comunicaciones utilizado en aplicaciones de adquisición y control de datos. Permite incluir varios dispositivos RS485 en el mismo bus, lo que hace posible que varios nodos se conecten entre sí. Su principal función es transportar una señal a través de dos cables. Uno de los cables transmite la señal original y el otro transporta su copia inversa. El protocolo RS-485 está ubicado en el primer nivel del modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos) y fue creado para ampliar las capacidades físicas de la interfaz RS-232 [15].

5.2.2. Métodos de medición

Humedad: Se considera humedad de suelo a la cantidad total de agua que hay en los poros del suelo o en su superficie. El porcentaje de humedad depende de factores como el clima, el tipo de terreno y las plantas que en él habitan. Los valores de humedad son importantes de conocer en un sistema agrícola, con ello se puede establecer la frecuencia de los riegos y la cantidad de agua aplicada para cada especie de planta [16]. Por ejemplo, en la etapa de desarrollo, los cultivos de arroz necesitan la mayor disponibilidad de agua, mientras que en el periodo de maduración, la cantidad de agua deberá disminuir con el fin de restringir el crecimiento y acumular sacarosa [17].

Métodos para medir humedad del suelo

- Sensores de bloques de yeso: responden a variaciones de humedad del suelo dependiendo de la profundidad en que éstos son colocados en el suelo al momento de medir la resistencia eléctrica, la cual aumenta a medida que va disminuyendo la humedad del suelo.
- Sensores que miden la constante dieléctrica del suelo: el agua tiene una constante dieléctrica alta, aproximadamente 78, por lo tanto, los altos contenidos de agua en un sensor de capacitancia son indicados por constantes dieléctricas con medidas más altas.
- Tensiómetro: instrumento que mide la tensión del suelo, también conocida como potencial hídrico del suelo, midiendo la resistencia que el suelo ejerce sobre el movimiento del agua.
- Sondos de neutrones: técnica utilizada para medir el contenido total de agua en el suelo por volumen.

Temperatura: La temperatura es una propiedad física que indica el grado de frío o calor de los cuerpos o del entorno. La temperatura del suelo depende de la cantidad de radiación neta que llegue a la superficie terrestre, que, a su vez depende de factores como la pendiente del suelo, la cubierta vegetal, la compactación, la humedad y la intensidad de la radiación solar [18].

La medición de la temperatura es indispensable para el cálculo del estrés hídrico de las plantas, siendo este una respuesta desarrollada para que puedan sobrevivir en condiciones climáticas difíciles (Moreno, 2008). Con la medición de la temperatura se conoce implícitamente el estado de la planta, determinando las horas más aptas para el riego. También, juega un papel importante para el proceso de germinación y crecimiento de los cultivos, puesto que condiciona los procesos microbianos y ejerce influencia sobre los procesos bióticos y químicos que ocurren en el suelo [13].

Métodos para medir temperatura del suelo

- Sondos de Fibra Óptica: las sondas miden la temperatura del suelo a diferentes profundidades y soportan entornos hostiles y temperaturas extremas.
- Sensores de temperatura de suelo: se entierran a diferentes profundidades en el suelo y proporcionan lecturas precisas y continuas.

- Termómetros infrarrojos: miden la radiación infrarroja emitida por un objeto. Se apunta directamente al suelo para obtener lecturas sin necesidad de contacto físico.
- Sistemas de imágenes térmicas: permiten visualizar la temperatura superficial del suelo y son útiles para obtener datos en áreas extensas y estudiar patrones térmicos.

5.3. Trabajos Relacionados

Al mantener un control sobre las variables agrícolas se puede fomentar una gestión más sostenible y responsable de los recursos naturales, contribuyendo a la conservación del suelo, agua y biodiversidad. En *The ÓMICAS alliance, an international research program on multi-omics for crop breeding optimization* se muestra una estrategia para impulsar la investigación en plantas y crear soluciones tecnológicas que contribuyan a mejorar la productividad y la sostenibilidad agrícola. En el proyecto 4 se está desarrollando una nueva plataforma de fenotipado de alto rendimiento (HTP), donde, a nivel del suelo, la unidad central *PhenoAgro* integra la comunicación mediante una red LoRa inalámbrica, el procesamiento de datos en la nube y sensores diseñados con el objetivo de analizar la evolución espacio-temporal de las variables del suelo, la planta y la atmósfera [19].

En *Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields* se propone una revisión actualizada de las aplicaciones de IoT para los campos agroindustrial y ambiental, explorando áreas de aplicación, tendencias, arquitecturas y desafíos en estos campos. El IoT puede evaluar variables de campo como el estado del suelo, condiciones atmosféricas y biomasa de plantas o animales. También, se puede utilizar para controlar variables como la temperatura, la humedad, la vibración y los golpes durante el transporte del producto (Pang et al., 2015) [3].

A continuación, se presentan alternativas relacionadas con la medición de variables agrícolas destinadas al monitoreo de cultivos. Estas iniciativas abordan la implementación de tecnologías innovadoras y métodos de medición avanzados, brindando soluciones precisas para optimizar las condiciones que afectan al crecimiento y rendimiento de los cultivos.

Kit vertical de agricultura inteligente IoT: Libelium y Beecham Research, son compañías que desarrollaron un kit que consiste en el monitoreo de parámetros ambientales como: humedad del suelo, temperatura, humedad de las hojas, presión atmosférica y radiación solar, con el fin de mejorar la calidad del vino controlando la cantidad de azúcar en las uvas (Libelium, 2017) [12].

Red Tecnoparque Colombia: es un programa de innovación tecnológica del SENA, que tiene como objetivo implementar una red de sensores inalámbricos con la tecnología de Libelium para el monitoreo de cultivos de plátano en el área de Lembo (Santa Rosa de Cabal) y así, investigar nuevas variedades de plátano, conocer la proyección de la cosecha, reducir el uso de fertilizantes y caracterizar los tipos de suelo, clima y cultivos [20].

Instacrops: es una plataforma de desarrollo de Hardware IoT y Software para la agricultura. Utiliza técnicas de inteligencia artificial y procesamiento de imágenes con el fin de recopilar información sobre parámetros claves de cultivos en una misma plataforma, detectando problemas de agua, riego, plagas y enfermedades. Esta plataforma brinda diversos beneficios al agricultor: Big Data y Asesoría Virtual, Tecnología Plug and Play, Monitorización y control remoto [21].

Arable: es un sistema que combina datos meteorológicos, de plantas y de suelo/irrigación con modelado avanzado y aprendizaje automático para obtener información sobre cultivos en tiempo real, optimizar la productividad, sostenibilidad y rentabilidad. El agricultor puede acceder a los datos en cualquier lugar con una aplicación móvil y puede personalizar permisos, preferencias, alertas por calor, lluvia, crecimiento, etcétera [22].

Materiales y Métodos

Para la elaboración del proyecto, se hizo uso de la metodología cuantitativa, donde el objeto de análisis es una realidad observable, medible y que se puede percibir de manera precisa, como lo es el caso de la medición de variables agrícolas. La investigación con metodología cuantitativa se divide en las siguientes fases:

- Fase 1. Delimitación conceptual.
- Fase 2. Planificación y diseño.
- Fase 3. Aplicación empírica.
- Fase 4. Proceso analítico.
- Fase 5. Documentación.

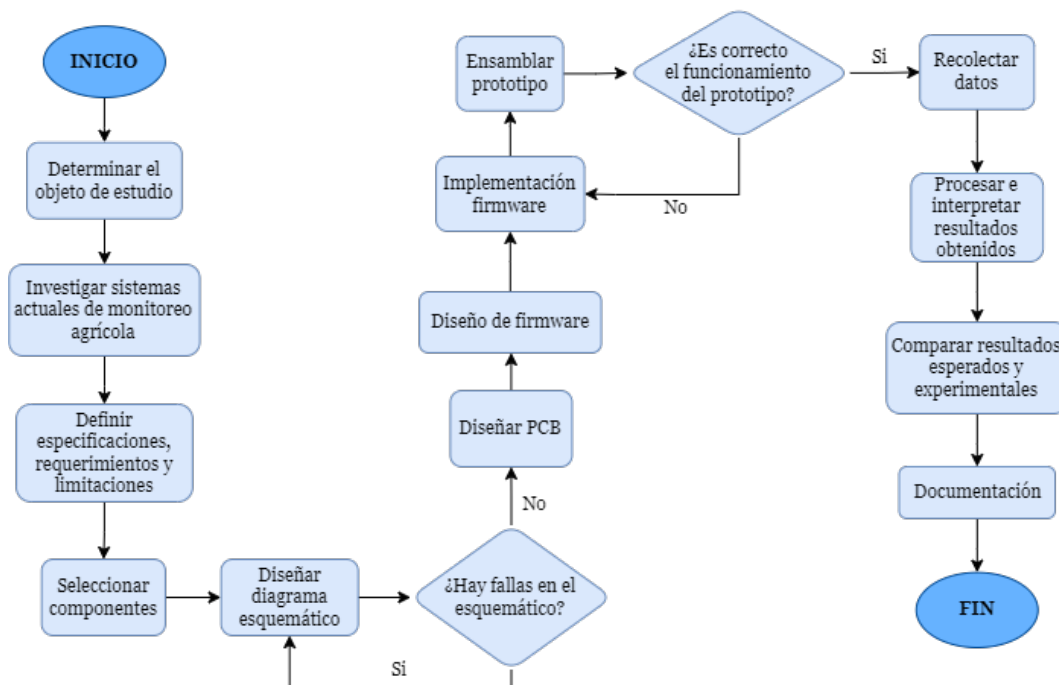


Figura 6.1: Proceso de diseño módulo variables de suelo. Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de la figura 6.1 muestra los pasos esenciales a seguir durante el ciclo de diseño, desde la concepción inicial que es identificar el objeto de estudio con el fin de abordar y resolver una problemática específica, hasta la evaluación final cumpliendo con unos objetivos definidos.

6.1. Diseño

El primer objetivo consiste en el diseño de un módulo de monitoreo remoto para la medición de variables agrícolas como la temperatura y la humedad en cultivos de alto rendimiento. Para este apartado se tuvieron en cuenta la fase 1 y 2.

Fase 1: Delimitación conceptual

En la primera fase se debe determinar el objeto de estudio con el propósito de solucionar o encontrar respuesta a alguna problemática. Una vez se tenían claros los objetivos fue pertinente investigar los sistemas de monitoreo actuales para la medición de variables agrícolas, construyendo así el marco teórico, que incluye conceptos relevantes, métodos de medición de temperatura y humedad de suelo y trabajos relacionados con el tema.

Fase 2: Planificación y diseño

En este punto se define la estrategia empleada para la resolución del problema, en este caso, se recurre al diseño experimental, donde se interviene en el estudio y no se utilizan datos encontrados por terceros. Trabajar con una muestra muy extensa implica un gran volumen de información para recolectar, procesar e interpretar, por lo tanto, se determina el instituto ÓMICAS como el lugar para recolectar los datos.

6.1.1. Revisión de especificaciones, requerimientos y limitaciones

Se pretende desarrollar un módulo que tenga bajo costo, alta resolución y alta cobertura para la medición de variables de suelo como temperatura y humedad con el propósito de que sea compatible con el módulo de planta, potencia y comunicaciones de PhenoAgro. Se espera que el proyecto esté ubicado en el nivel 5 en cuanto a los niveles de preparación tecnológica, que consta de la validación de componentes y subsistemas en un entorno relevante. El instituto ÓMICAS será el lugar dónde se van a realizar las pruebas para que la plataforma de fenotipado capture información relevante y así, verificar su correcto funcionamiento. De acuerdo con las limitaciones del sistema, este se alimenta con un voltaje de 6V brindado por el MPPC a través del protocolo RS-485 y los sensores y componentes se alimentan con 5V. La PCB consume en promedio 9.7965 mA (ver cuadro 7.2). Como se mencionó anteriormente, el número de variables a medir son 2, temperatura de suelo y humedad de suelo, los sensores son resistentes a corrosión y el sensor de humedad tiene recubrimiento con resina para evitar daño en sus componentes. A continuación los requerimientos del sistema:

Requerimientos Funcionales

- Se debe disponer de un módulo de potencia y comunicaciones que sirva como enlace central entre la estación satélite y la nube.
- El módulo debe medir temperatura y humedad del suelo.
- Se deben destinar unos puertos de expansión para futuros sensores.
- El módulo de suelo debe comunicarse con otros módulos a través del estándar de comunicaciones RS485.

Requerimientos No-Funcionales

- El módulo de suelo debe tener un costo inferior a 100 USD.
- El equipo debe soportar condiciones ambientales desfavorables.
- El equipo debe ser liviano, de fácil instalación y mantenimiento.
- El color del dispositivo no puede ser arbitrario y debe ser visible para el usuario.
- Los sensores deben ser a prueba de agua y resistentes a la corrosión.
- Grado de protección IP64. El dispositivo debe estar totalmente protegido de elementos sólidos como polvo y arena, de igual manera, deberá tener protección contra un chorro de agua.

La figura 6.2 presenta un diagrama de bloques del módulo de variables de suelo, desde la distribución de energía hasta el bus de comunicación (RS485).

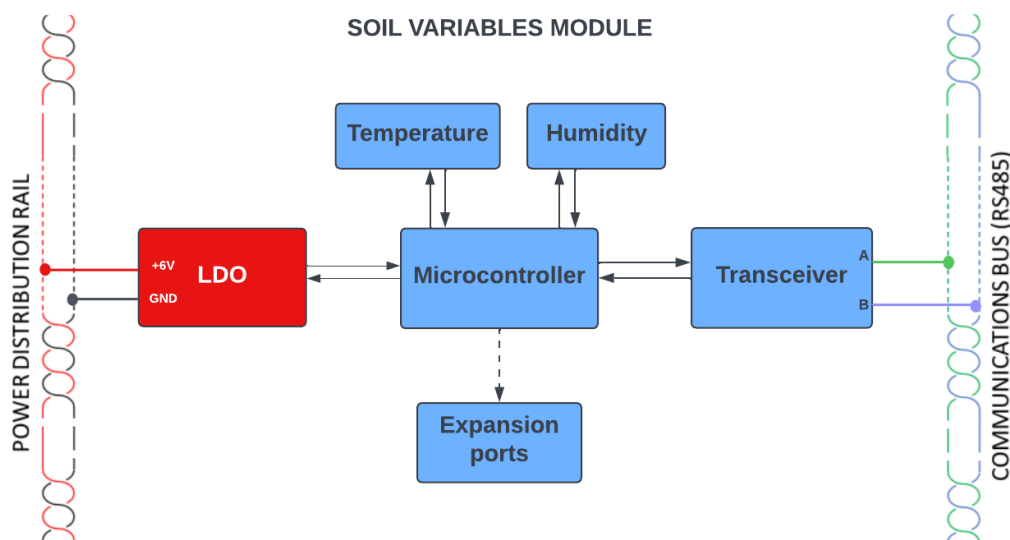


Figura 6.2: Diseño módulo variables de suelo. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Selección de componentes y proveedores

Durante la selección de los sensores para el módulo de suelo, se encontraron diversas opciones con la misma funcionalidad, pero que, según sus características particulares, se seleccionaron los dos sensores con la calificación más alta de acuerdo a unos criterios asignados. En el anexo 2 se adjunta un link donde se describen las características de sensores tenidos en cuenta en esta selección.

6.1.3. Sensores de humedad de suelo

El monitoreo de la humedad del suelo es crucial para una gestión efectiva de los recursos hídricos en la agricultura, por lo que fue pertinente realizar un análisis comparativo de sensores disponibles en el mercado. En el cuadro 6.1 se muestran las calificaciones obtenidas por cada sensor de humedad de acuerdo con 4 criterios, donde 0 es la calificación más baja y 5 la calificación más alta:

- **1. Precio:** bajo costo.
- **2. Voltaje de alimentación:** que se pueda alimentar con 5V.
- **3. Protocolo de comunicación:** RS485 - Salida analógica.
- **4. Material:** resistente a corrosión.

Criterio	S1 (FC-28)	S2 (MP-508C)	S3 (FST100-2006)	S4 (VH400)	S5 (SEN0193)
1	5	1	1	1	4
2	5	1	5	5	5
3	5	5	5	5	5
4	0	5	5	5	5
Total	15	12	16	16	19

Cuadro 6.1: Criterios de selección sensor humedad de suelo. Fuente: Elaboración propia.

El Sensor de humedad de suelo FC-28 fue uno de los más destacados en cuanto a su precio, mide la humedad del suelo por medio de 2 electrodos resistivos como se observa en la figura 6.3. Es compatible con placas de desarrollo como Arduino, PIC, ESP8266, NodeMCU, NodeMCU-32. Su funcionamiento se basa en la medición de la resistencia entre estos electrodos insertados en el suelo, la cual varía en función de la humedad presente. El electrodo se conecta a una tarjeta de acondicionamiento (YL-38) que proporciona una salida digital y analógica [23].

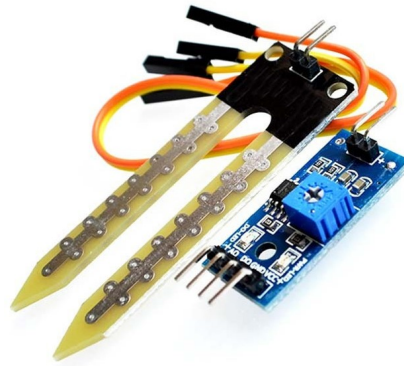


Figura 6.3: Sensor de humedad de suelo FC-28. Fuente: Dualtronica.

Uno de los requerimientos del sistema es que los sensores deben ser resistentes a la corrosión, ya que, el campo es el entorno en el que serán usados por lo que esta fue una de las razones para descartar los sensores de humedad de suelo resistivos. Se escogió el sensor de humedad de suelo capacitivo SEN0193, que cuenta con protección anticorrosión y es de bajo costo [24], aunque el sensor FC-28 también es de bajo costo no puede proporcionar este tipo de protección, además necesita de un componente adicional, el módulo (YL-38). El sensor de la figura 6.4, emplea un método de medición capacitiva para evaluar los niveles de humedad del suelo, a diferencia de la detección resistiva típica en otros sensores. El sensor SEN0193 está fabricado con un material resistente a la corrosión, garantizando una mayor durabilidad. Este sensor incluye un regulador de voltaje integrado que permite su conexión en un rango de 3.3 a 5.5 VDC.



Figura 6.4: Sensor de humedad de suelo SEN0193. Fuente: Zamux Electrónica.

Las especificaciones del sensor de humedad de suelo elegido se presentan en el cuadro 6.2:

ESPECIFICACIONES	VALOR
Referencia	SEN0193
Rango de medición	0% - 100 %
Protocolo de comunicación	Salida analógica
Corriente de funcionamiento	5 mA
Interface	PH2.0-3P
Dimensiones	98mm x 23mm
Peso	15 g
Voltaje de salida	0 - 3 VDC
Material	Resistente a corrosión
Voltaje de alimentación	3.3 V - 5.5 V
Precio	5,50 USD

Cuadro 6.2: Especificaciones sensor humedad SEN0193. Fuente: DFROBOT.

6.1.4. Sensores de temperatura de suelo

El control de variables como la temperatura y la humedad es de vital importancia para comprender los patrones climáticos locales, los ciclos de crecimiento de las plantas y las necesidades de irrigación. En el cuadro 6.3 se muestran las calificaciones obtenidas por cada sensor de temperatura de acuerdo con 4 criterios, donde 0 es la calificación más baja y 5 la calificación más alta:

- **1 Precio:** bajo costo.
- **2 Voltaje de alimentación:** que se pueda alimentar con 5V.
- **3 Protocolo de comunicación:** 1-Wire.
- **4 Material:** cubierta de acero inoxidable.

Criterio	S1 (THERM200)	S2 (DS18B20)	S3 (TEROS12)	S4 (WET-2SENSOR)
1	1	5	0	0
2	5	5	5	4
3	5	5	4	4
4	3	5	5	5
Total	14	20	14	13

Cuadro 6.3: Criterios de selección sensor temperatura de suelo. Fuente: Elaboración propia.

En el mercado se encuentran productos como el TEROS 12 y WET-2 Sensor, ambos ofrecen mediciones precisas de temperatura, humedad y conductividad eléctrica del suelo, sin embargo, estos sensores fueron descartados debido a que sobrepasan el presupuesto. Por otro lado, se encuentran las sondas de las figuras 6.5 y 6.6, que cuentan con un voltaje de operación de 5V, el cual es el voltaje con el cual funcionan todos los componentes del sistema, pero, de nuevo el precio y el material (acero inoxidable) fueron factores decisivos para escoger la sonda DS18B20 para medir la temperatura del suelo en este proyecto [25] [26].



Figura 6.5: Sonda de temperatura de suelo THERM200. Fuente: Alphaomega Electronics.

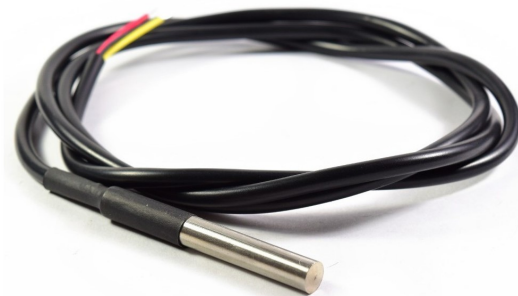


Figura 6.6: Sonda de temperatura de suelo DS18B20. Fuente: Naylamp Mechatronics.

Las especificaciones del sensor de temperatura seleccionado se presentan en el cuadro 6.4:

ESPECIFICACIONES	VALOR
Referencia	DS18B20
Protocolo de comunicación	1-wire
Corriente de reposo	1 mA
Voltaje de alimentación	3.0 V - 5.5 V
Rango de medición	(-55)°C a (+125)°C
Precisión	±0.5°C (-10)°C a (+85)°C
Longitud de cable	1 m
Resolución	9 - 12 bits
Material	Cubierta de acero inoxidable
Tiempo de estabilización	<750 ms
Precio	1,90 USD

Cuadro 6.4: Especificaciones sensor temperatura DS18B20. Fuente: Naylamp Mechatronics.

6.1.5. Diseño de diagramas esquemáticos

La realización del esquemático permite visualizar detalladamente la configuración y conexiones eléctricas empleadas en el diseño. En primer lugar, se escogió el componente que regularía el voltaje, el regulador AP2120, el cual disminuye los 6V DC que llegan junto con la comunicación RS485 proveniente del MPPC de la plataforma PhenoAgro del instituto ÓMICAS, a 5V DC. En segundo lugar, se escogió el microcontrolador ATtiny404 para ejecutar las tareas y el transceptor THVD1400 para emitir la señal. También, se encuentran las conexiones del sensor de humedad de suelo y el sensor de temperatura de suelo. Los componentes y conexiones mencionados hasta el momento corresponden al primer diseño del diagrama esquemático, posteriormente se añadieron dos puertos de expansión con amplificadores LM321, un puerto libre para 1-wire, un conector SPI y un conector UPDI para la respectiva programación del microcontrolador. Cabe destacar que se integraron diodos schottky como el BAT54S para proteger en caso de sobretensión y capacitores de Bypass para minimizar y eliminar el ruido.

En la figura 6.7 se presentan las conexiones eléctricas para el posterior diseño de PCB.

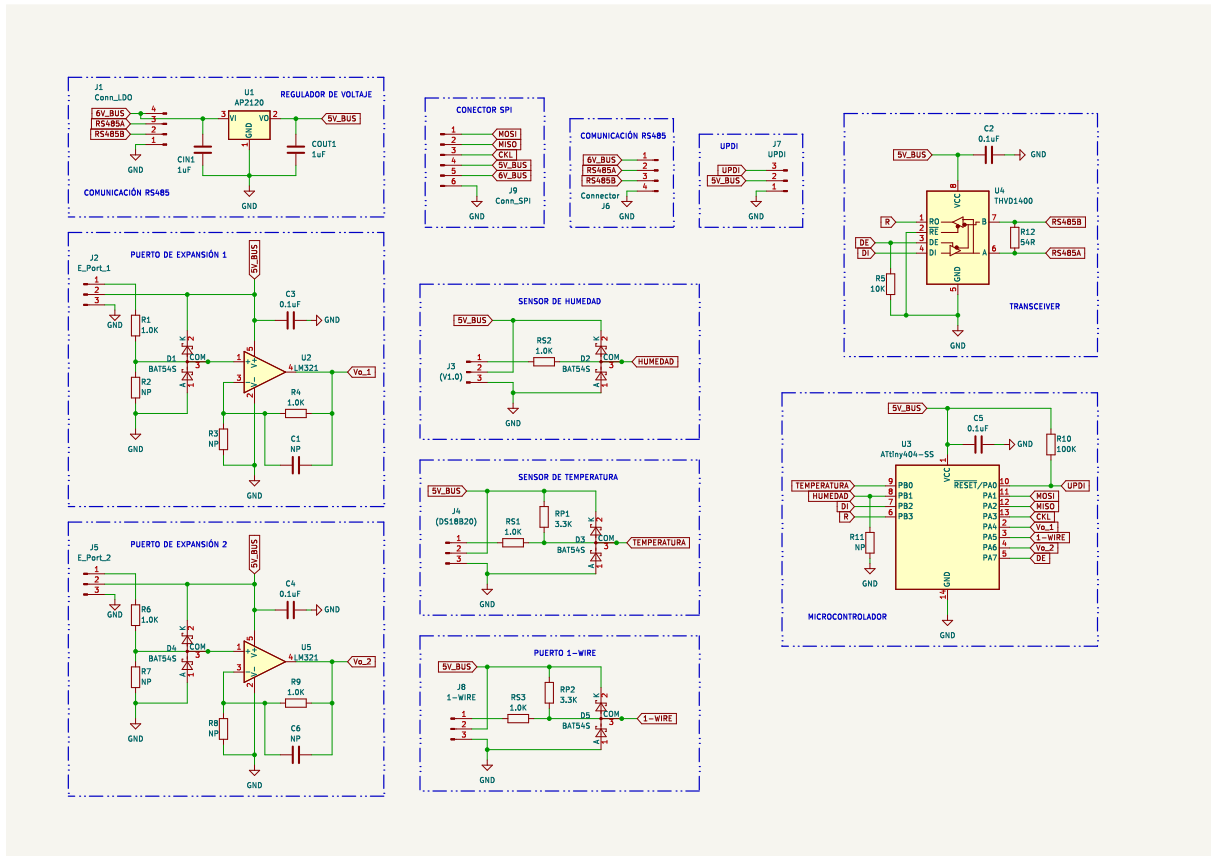


Figura 6.7: Diagrama esquemático. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, para el sensor de temperatura DS18B20, se utilizó la herramienta de simulación de circuitos electrónicos, LTspice. De acuerdo con características eléctricas como el voltaje de entrada alto (V_{IH}) y voltaje de entrada bajo (V_{IL}), se simularon 3 casos diferentes para la posterior comparación entre simulación y los cálculos teóricos. El anexo 1 contiene los esquemáticos realizados en LTspice, así como también una tabla comparativa de los resultados obtenidos en la simulación y en los cálculos usando la ley de corriente de kirchhoff.

6.1.6. Diseño de PCB

El apartado anterior especifica los componentes electrónicos, sensores y conexiones eléctricas, para luego iniciar el proceso de diseño de PCB teniendo en cuenta el contexto del proyecto. Se abordaron aspectos como la disposición eficiente de componentes y el enrutamiento de trazas. Los componentes fueron ubicados estratégicamente de manera que se maximice el rendimiento del circuito y se optimice el espacio disponible. Del mismo modo, se trazaron rutas precisas y eficientes para conectar estos componentes, procurando evitar interferencias entre trazas, minimizar la interferencia electromagnética y asegurar que la corriente fluya de manera óptima para el funcionamiento

adecuado del circuito. En los extremos izquierdo y derecho de la placa se encuentran los conectores para la comunicación RS485, haciendo posible que varios nodos se conecten entre sí, ya que, el módulo de suelo irá conectado al MPPC de la plataforma PhenoAgro. En la figura 6.8 se puede ver el diseño de la placa en la herramienta KiCad.

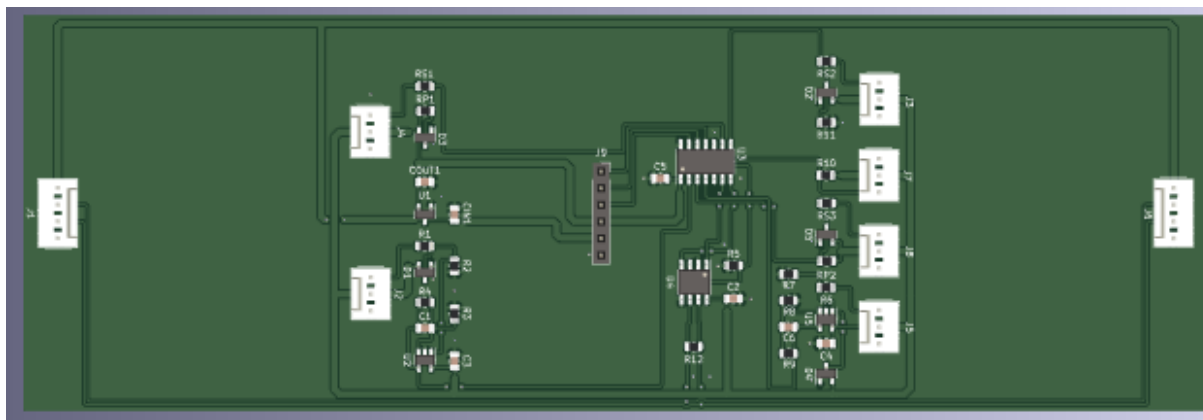


Figura 6.8: Diseño de PCB en KiCad. Fuente: Elaboración propia.

6.1.7. Diseño de firmware

Antes del diseño del firmware del sistema se crearon los códigos específicos para el sensor de temperatura de suelo DS18B20 y para el sensor de humedad de suelo V1.0 utilizando el entorno de desarrollo ARDUINO IDE, evitando el uso de librerías preexistentes con el objetivo de profundizar el entendimiento sobre los procesos inherentes a cada sensor. Posteriormente, se adaptan los códigos de los sensores a Microchip Studio, una plataforma de desarrollo integrado que ofrece herramientas para escribir, compilar, depurar y programar código para una variedad de dispositivos de Microchip, como el microcontrolador ATtiny 404 escogido para este proyecto.

El diseño del firmware se construye a partir del proyecto PhenoAgro del instituto de investigación en Ciencias Ómicas, el cual está basado en el protocolo Modbus y el protocolo CAN, siendo Modbus un protocolo de comunicación de maestro/esclavo que transfiere datos en tiempo real entre dispositivos conectados a través de distintos tipos de líneas de comunicación, en este caso, RS-485. Por su parte, CAN es un protocolo de comunicación serial enfocado en la transmisión de información entre diferentes dispositivos electrónicos como sensores, actuadores y controladores.

El protocolo de este proyecto está compuesto de un encabezado “Header” con un tamaño de 3 bytes: el primero pertenece al byte de sincronización, el segundo byte está compuesto de tres parámetros: Message_Type (Master_Request/Slave_Response), Command_Type (Read) y Module_ID (MVS: módulo variables de suelo). El tercer byte está destinado para Variable_ID la cual puede ser temperatura de suelo o humedad de suelo. El cuarto byte está destinado para la longitud “Length”, y “Data” será el dato de temperatura o humedad ubicado en el quinto y sexto byte. El cuadro 6.5 presenta la posición de los parámetros, posición que se debe tener en cuenta tanto al

momento de decodificar la información como al momento de hacer el envío de la misma.

Byte 1	Byte 2			Byte 3
Bit 1 ... Bit 8	Bit 9 - Bit 10	Bit 11 - Bit 12	Bit 13 ... Bit 16	Bit 17 ... Bit 24
Byte Sync	Message_Type	Command_Type	Module_ID	Variable_ID
Header				

Byte 4	Byte 5	Byte 6
Bit 25 ... Bit 32	Bit 34 ... Bit 41	Bit 42 ... Bit 49
Length	Data	

Cuadro 6.5: Protocolo PhenoAgro. Fuente: Equipo de desarrollo PhenoAgro.

Para el módulo de suelo se plantea una máquina de estados como la que se muestra en la figura 6.9 para modelar el comportamiento del sistema y estructurar la lógica del programa de una manera clara. Puesto que el módulo diseñado es compatible con el MPPC del instituto Ómicas, se va a mantener en el estado “Waiting_Sync” mientras espera el byte de sincronización (0xAA) para pasar al segundo estado “Validate_Header” y validar los parámetros correspondientes a “Message_Type”, “Command_Type” y “Module”, de lo contrario seguirá esperando el valor correcto del byte de sincronización. Si la información en el segundo estado es válida, pasará inmediatamente al tercer estado “Validate_Var”, donde determina si el byte que ingresa corresponde a la variable temperatura o humedad, si no es la variable esperada regresa al estado “Waiting_Sync”, si la variable es válida pasa al cuarto estado “Send_Response” y procede a enviar la información que corresponde al Header, Length y Data.

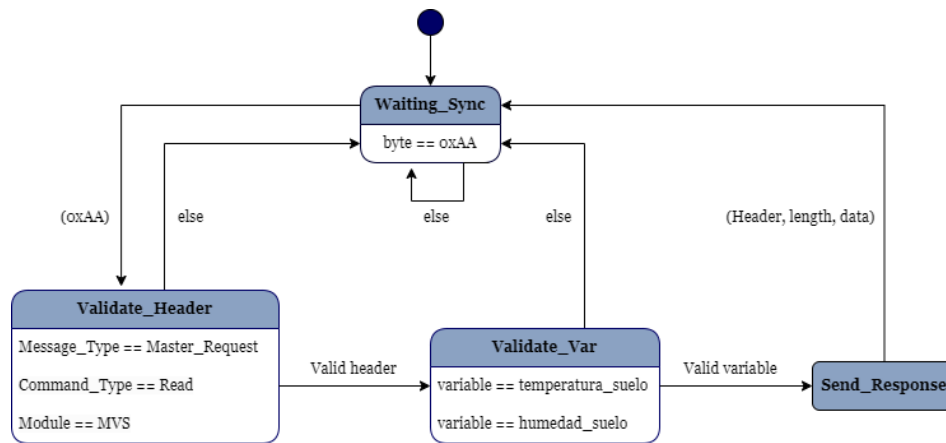


Figura 6.9: Máquina de estados. Fuente: Equipo de desarrollo PhenoAgro.

6.2. Implementación

El segundo objetivo consiste en la implementación de un módulo de monitoreo remoto para la medición de variables agrícolas (temperatura y humedad) en cultivos de alto rendimiento. A este apartado le corresponde la fase 3 de la metodología.

Fase 3: Aplicación empírica

La etapa de implementación comprende la construcción del firmware en la plataforma Microchip Studio a partir de la información suministrada en el cuadro 6.5 y la figura 6.9, también, se hace el ensamble del prototipo de forma que quede listo para ser conectado al módulo de potencia y comunicaciones y se puedan realizar pruebas.

6.2.1. Implementación del firmware

Teniendo claro el protocolo, cómo debe recibirse la información y cómo debe enviarse, se crean diferentes funciones en Microchip Studio las cuales serán utilizadas dentro de la máquina de estados. La función *initUART* inicializa la configuración de la interfaz UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), habilitando el receptor y el transmisor para permitir la comunicación. A diferencia de UART, USART puede realizar un proceso de comunicación en serie tanto síncrono como asíncrono, en este caso, se configuró la interfaz USART en modo asíncrono. También, se encuentran las funciones *read_Byte* y *send_Byte* encargadas de leer y enviar un byte a través de USART. Como el envío es de varios bytes, se crea la función *send_Bytes* con el fin de organizar la información en el orden que se muestra en el cuadro 6.5 para el posterior envío.

Dentro de la máquina de estados se describe el comportamiento del sistema, en ella se utilizan las funciones mencionadas anteriormente, esto implica transformar el contenido de la figura 6.9 en código. Dependiendo de la información recibida pasará al siguiente estado, sea *Waiting_Sync*, *Validate_Header*, *Validate_Var* o *Send_Response*. En el estado *Validate_Var* se ubican los códigos de los sensores de temperatura y humedad de suelo, dependiendo de la variable recibida hará las funciones correspondientes. En ARDUINO IDE también se creó un código que configura la comunicación con un dispositivo remoto, recibe datos de sensores (temperatura o humedad), y muestra la información correspondiente en el puerto serie. La lógica para identificar si la variable medida es temperatura o humedad se basa en el valor del byte recibido. Si la variable no es reconocida, se envía cero como respuesta. Para ensayar la comunicación y la correcta configuración de USART, se utilizó un módulo arduino TTL a RS485 para facilitar la transmisión y recepción de datos de dispositivos conectados a la red RS485 y probar si se lograba recibir y enviar un byte, después se verificó que la información llegó completa y en el orden correcto.

6.2.2. Ensamble del prototipo

En este proyecto se utilizaron componentes de montaje superficial los cuales fueron soldados en el Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. La PCB fue fabricada por la compañía Microcircuitos ubicada en la misma ciudad y tiene una longitud de 60mm x 180mm. Respecto a la adquisición de los componentes para el ensamble de la PCB, estos fueron conseguidos con Mouser Electronics, un proveedor internacional, los sensores se consiguieron a través de Electrónica I+D, un proveedor nacional. En el anexo 3 se adjunta un link que contiene las tablas donde se amplía la información de compra de componentes, sensores y fabricación de PCB. La placa final es la que se muestra en la figura 6.10.

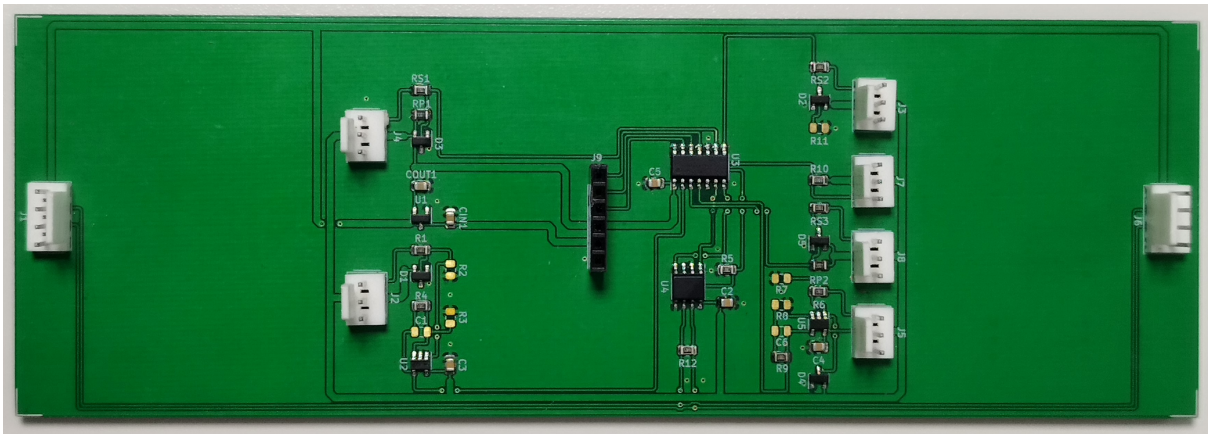


Figura 6.10: PCB con los componentes soldados.

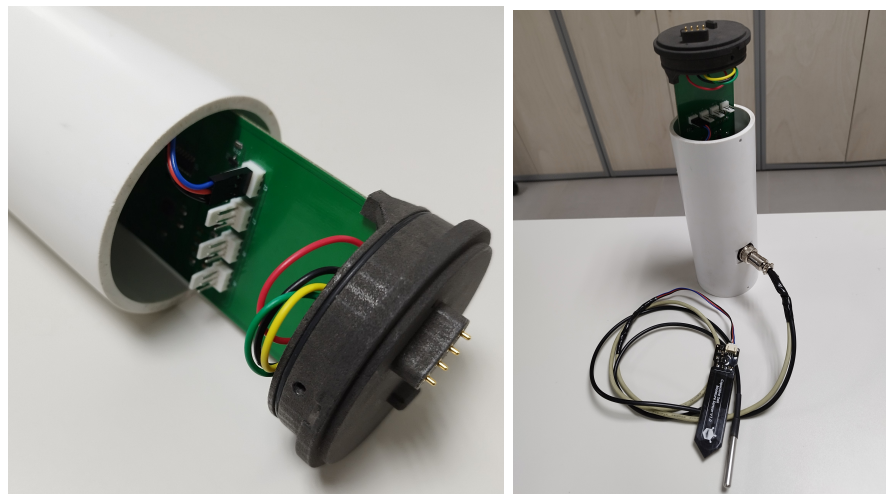
Como los componentes del sensor de humedad no son impermeables, se hizo un recubrimiento de esta zona con resina epóxica (ver figura 6.11), un polímero termoestable que se endurece al mezclarse con un catalizador, transformando la resina en un material sólido y duradero con propiedades aislantes y resistentes.



Figura 6.11: Recubrimiento de la electrónica con resina epóxica.

La tarjeta se ubica dentro de un tubo de PVC y encaja en una tapa de material nylon 12 fabricada en una impresora 3D con la técnica SLS (Sinterizado selectivo por láser). La conexión de la tapa

a la tarjeta está en el siguiente orden (VCC-RS485A-RS485B-GND). Los sensores se conectan a la tarjeta a través de un conector de 4 pines, siendo humedad el conector J3 y temperatura el conector J4, ambos en el siguiente orden (DATOS-VCC-GND). El ensamble del prototipo se puede ver en la figura 6.12.



(a) PCB con la tapa que conecta al MPPC. (b) Ensamble PCB y sensores.

Figura 6.12: Ensamble del prototipo.

6.3. Evaluación

El tercer objetivo consiste en la evaluación del funcionamiento del módulo diseñado para la medición y monitoreo en tiempo real de variables críticas (temperatura y humedad). Las fases 4 y 5 tienen lugar en este apartado.

Fase 4: Proceso analítico

Partiendo de los datos recolectados, estos se procesan e interpretan con el fin de identificar si la información se encuentra dentro de los límites de temperatura y humedad óptimos para el correcto desarrollo del cultivo y determinar si la planta necesita ser regada o si se debe elevar o bajar la temperatura.

Fase 5: Documentación

La documentación comprende redactar las actividades realizadas en la elaboración del prototipo. En el presente documento se encuentran cada uno de los procesos llevados a cabo para el desarrollo final del módulo de suelo, materiales utilizados, diseño electrónico, ensamble, diseño de PCB, diseño de firmware, entre otros.

6.3.1. Análisis de fallas

Al implementar la máquina de estados en Microchip Studio hacía falta una última condición cuando se está en el estado `Validate_Var`. Esta condición ayuda a garantizar que el sistema pueda manejar casos inesperados o datos incorrectos. Si por alguna razón se recibe un identificador de variable que no coincide con las variables esperadas (temperatura del suelo o humedad del suelo), entonces el código asigna el valor de 0 a la variable y vuelve al primer estado `Waiting_Sync` mientras espera un dato correcto.

Durante la conexión del módulo de suelo con el módulo de planta, potencia y comunicaciones no se estaba teniendo en cuenta la lectura de 3 bytes antes de iniciar con la lectura del byte de sincronización. La falla se debía a que el código del MPPC diseñado por el equipo de desarrollo PhenoAgro hace un reflejo de bytes, por ende, el código de Arduino adaptado para el módulo de suelo debe incluir la lectura de los 3 bytes antes del byte de sincronización (0xAA). Cuando no se tenían en cuenta estas lecturas, la información obtenida en el monitor serial de Arduino era incompleta.

En cuanto a las conexiones físicas, una conexión incorrecta de un sensor o del programador en la PCB puede tener consecuencias negativas. Las pistas de la PCB están diseñadas para ciertos valores de voltaje y corriente, exceder estos límites puede causar cortocircuitos, daños en las vías de cobre u otros problemas. Es de suma importancia revisar el diagrama esquemático antes de conectar cualquier elemento. También, se debe medir continuidad para verificar si todas las conexiones del circuito están establecidas correctamente. En una de las pruebas el módulo dejó de enviar datos y al revisar todas las conexiones uno de los cables ubicados dentro del tubo estaba suelto.

6.3.2. Demostraciones y pruebas

Para verificar el correcto funcionamiento de los sensores de humedad y temperatura de suelo se hicieron pruebas sin conectar el MPPC. Las pruebas se realizaron en 4 entornos diferentes: suelo húmedo, suelo seco, agua sin hielo, agua con hielo.

1. Suelo húmedo: Para esta prueba se insertaron los sensores en un recipiente con tierra mojada. Los datos fueron equivalentes tanto en Microchip Studio como en Arduino, en este último se puede ver el resultado en sistema hexadecimal y decimal.

Suelo húmedo	Microchip Studio	Arduino (HEX)
Humedad	30.85 %	134 = 308
Temperatura	22.75°C	E3 = 227

Cuadro 6.6: Mediciones de temperatura y humedad en suelo húmedo.

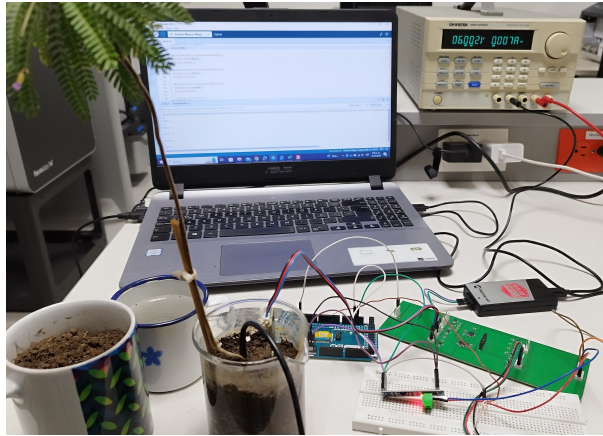


Figura 6.13: Prueba 1. Sensores en suelo húmedo.

2. Suelo seco: En esta prueba se insertaron los sensores de humedad y temperatura en un recipiente con tierra seca, adicionalmente, el recipiente fue puesto en el microondas para comprobar que la temperatura aumenta y que la humedad disminuye en comparación con el suelo húmedo. Los datos fueron equivalentes en Microchip Studio y en Arduino (ver el cuadro 6.7).

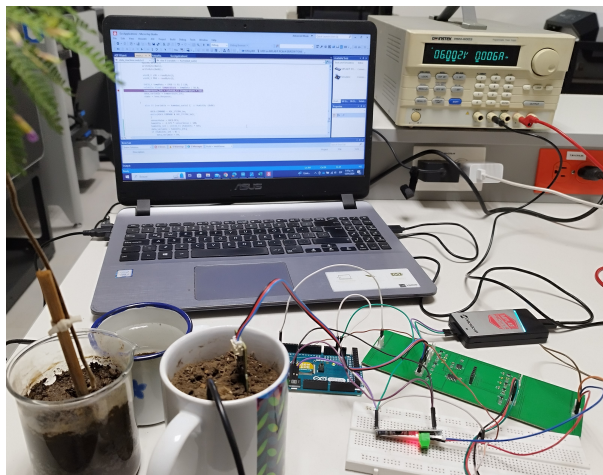


Figura 6.14: Prueba 2. Sensores en suelo seco.

Los resultados fueron los siguientes:

Suelo seco	Microchip Studio	Arduino (HEX)
Humedad	10%	0A = 10
Temperatura	38.31°C	17E = 382

Cuadro 6.7: Mediciones de temperatura y humedad en suelo seco.

3. Agua sin hielo: Otra de las demostraciones fue introducir los sensores de temperatura y humedad en un recipiente con agua, esto para confirmar que la temperatura disminuye y que la humedad aumenta en comparación con el suelo húmedo y el suelo seco. En el cuadro 6.9 se presentan los resultados de las mediciones y las figuras 6.17 y 6.16 muestran algunas imágenes de como se ven los datos en cada plataforma.

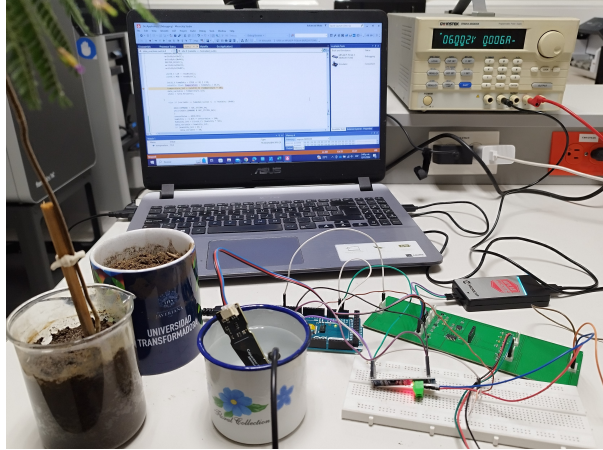


Figura 6.15: Prueba 3. Sensores en agua sin hielo.

Agua sin hielo	Microchip Studio	Arduino (HEX)
Humedad	42.65 %	1AA = 426
Temperatura	20.93°C	D2 = 210

Cuadro 6.8: Mediciones de temperatura y humedad en agua sin hielo.

Watch 1		Watch 1	
Name	Value	Name	Value
temperature	20,9375	humidity	42,65

(a) Temperatura.

(b) Humedad.

Figura 6.16: Mediciones en Microchip Studio.

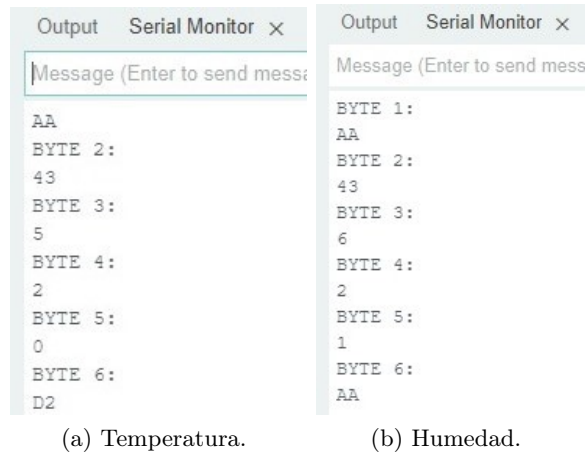


Figura 6.17: Mediciones en Arduino.

4. Agua con hielo: Para la cuarta demostración se dejaron los sensores dentro del recipiente con agua y se añadieron algunos cubos de hielo para verificar que la temperatura disminuye en comparación con la prueba 3 donde el agua estaba a temperatura ambiente. Por su parte la humedad se mantuvo en un valor cercano al obtenido anteriormente.

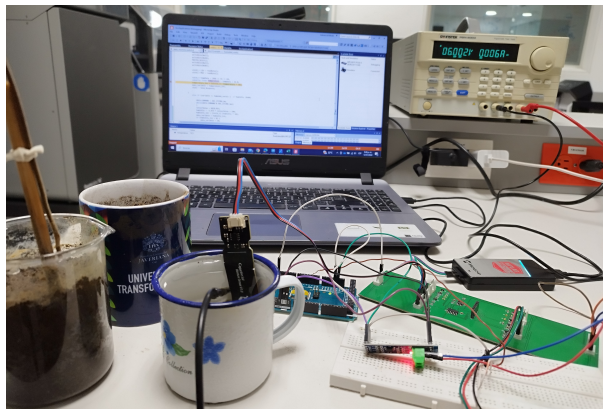


Figura 6.18: Prueba 4. Sensores en agua con hielo.

El siguiente cuadro muestra los datos obtenidos en la cuarta prueba:

Agua con hielo	Microchip Studio	Arduino (HEX)
Humedad	41.17%	19B = 411
Temperatura	10.5°C	69 = 105

Cuadro 6.9: Mediciones de temperatura y humedad en agua con hielo.

■ Calibración del sensor

Los valores de salida del sensor de humedad V1.0 están relacionados con la profundidad de inserción del mismo y qué tan apretado esté el suelo a su alrededor (ver figura 6.19). El rango de detección del sensor se divide en 3 secciones: seco [520 - 430], húmedo [430 - 350] y agua [350 - 260]. Existe una relación inversa entre el valor de salida del sensor y la humedad del suelo, por lo tanto, se define 50 % como el valor para un suelo inundado de agua y 10 % para suelo seco [24]. En el cuadro 6.10 están los valores de salida obtenidos en Microchip Studio.

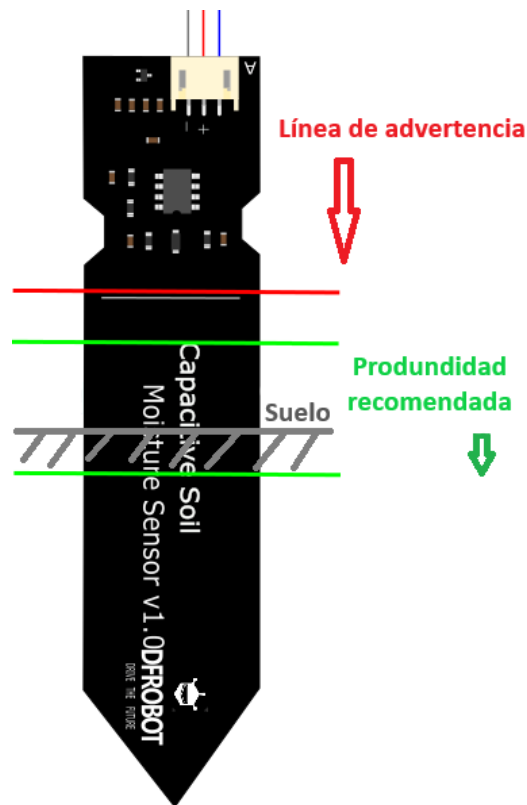


Figura 6.19: Calibración sensor humedad de suelo V1.0. Fuente: DFROBOT.

Porcentaje humedad	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Salida del sensor	126	110	96	80	67

Cuadro 6.10: Relación humedad y salida del sensor.

Al graficar la curva de calibración con los valores anteriores se puede ver un comportamiento lineal entre la variable medida y la respuesta del sensor. El valor de humedad está dado por la ecuación mostrada en la figura 6.20, siendo x la salida del sensor.

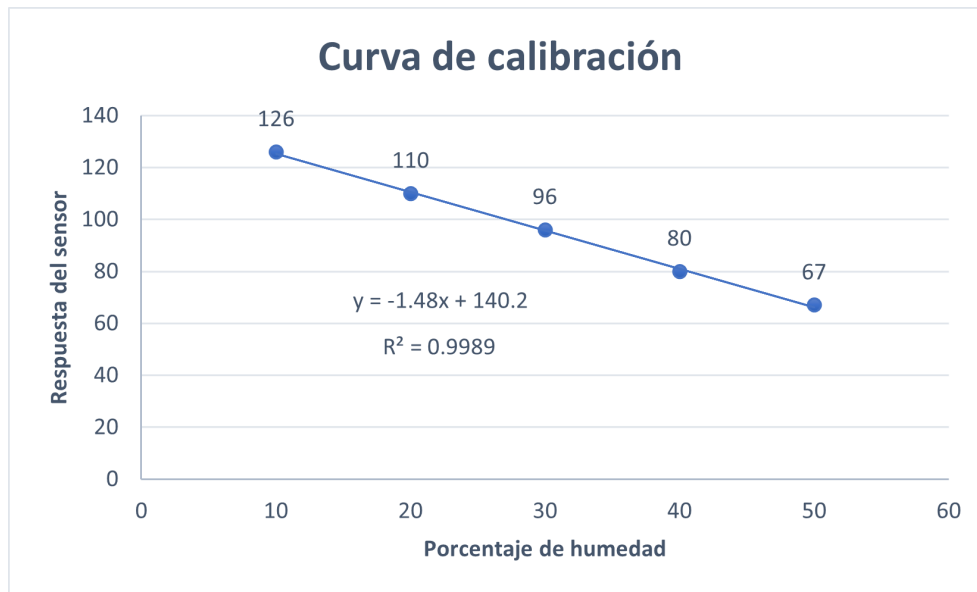


Figura 6.20: Curva de calibración sensor humedad. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, se hicieron mediciones de suelo con el sensor de temperatura DS18B20 y los valores fueron similares a las mediciones tomadas por el módulo de suelo del proyecto PhenoAgro, el cual utiliza un sensor más robusto, por lo que no fue necesaria una calibración para el sensor DS18B20.

Prototipo final

Al garantizar el buen funcionamiento del prototipo en el plan de pruebas, se procedió a conectar el módulo de suelo con el MPPC denominado *Tripas* (ver figura 7.1) y así validar la comunicación a través del protocolo RS485.

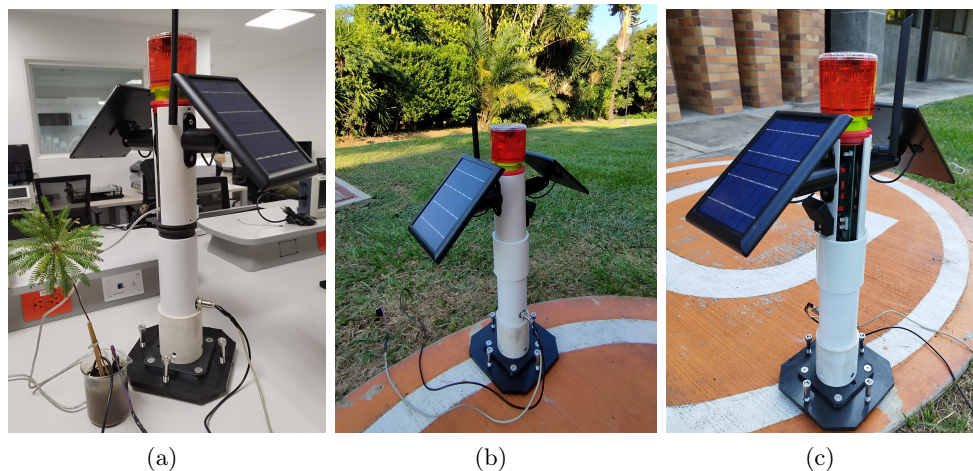


Figura 7.1: Módulo de suelo conectado al MPPC de PhenoAgro.

El prototipo final logra la comunicación con el módulo de potencia del instituto de investigación en Ciencias Ómicas diseñado por el equipo de desarrollo de PhenoAgro y es capaz de medir variables como temperatura de suelo y humedad de suelo, adicionalmente, la información puede verse de forma online en la plataforma web de PhenoAgro. Primero, se hicieron pruebas de conexión con el MPPC *Tripas* y los resultados fueron los siguientes:



Figura 7.2: Medición temperatura y humedad de suelo. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.



Figura 7.3: Módulo de suelo conectado al MPPC Tripas de PhenoAgro.

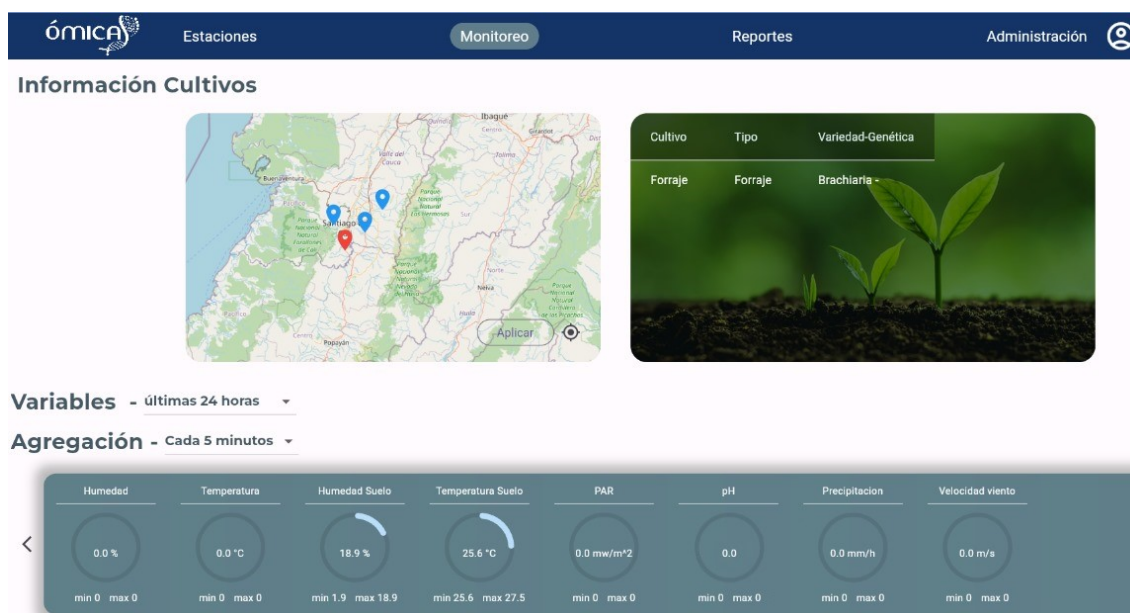


Figura 7.4: Vista de la plataforma. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.

En la figura 7.5 se seleccionó la estación que se desea monitorear, en este caso, el módulo de suelo se conectó al MPPC denominado *Cambridge*, donde la latitud y la longitud es igual a (0,0) debido a que la prueba se hizo dentro de los laboratorios de iOmicas en los cuales hay jaula de Faraday, una estructura diseñada para bloquear la entrada o salida de campos electromagnéticos (ondas de radio, señales de teléfonos móviles), por esta razón la ubicación no corresponde a la región donde se hizo la prueba.



Figura 7.5: Ubicación MPPC Cambridge. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.

La figura 7.6 contiene información sobre la energía del MPPC Cambridge: Voltaje y Corriente de la batería, Corriente de las celdas y el Voltaje StepUp. Se realizó una prueba que duró 20 horas aproximadamente y el módulo aún tenía 76 % de batería (ver figura 7.5).

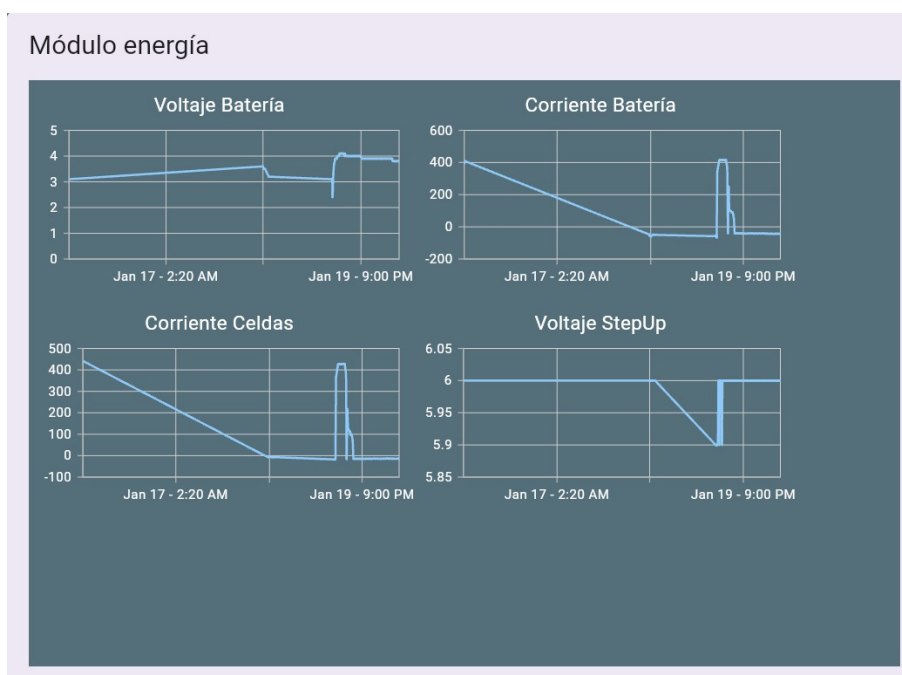


Figura 7.6: Información módulo de energía. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.

Al seleccionar cualquier variable se muestra una gráfica de tendencia a medida que va tomando datos, al escoger la variable temperatura de suelo la gráfica a mostrar a lo largo del tiempo es la gráfica b de la figura 7.7.

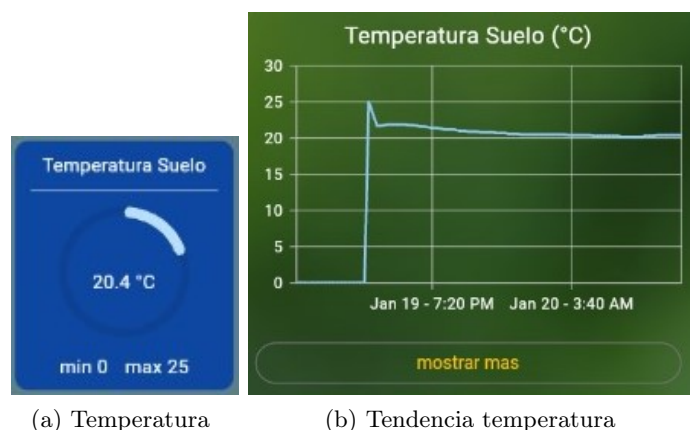


Figura 7.7: Gráfica de tendencia temperatura de suelo. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.

Al dar click en el botón *mostrar mas* se despliega la siguiente gráfica con información más detallada:

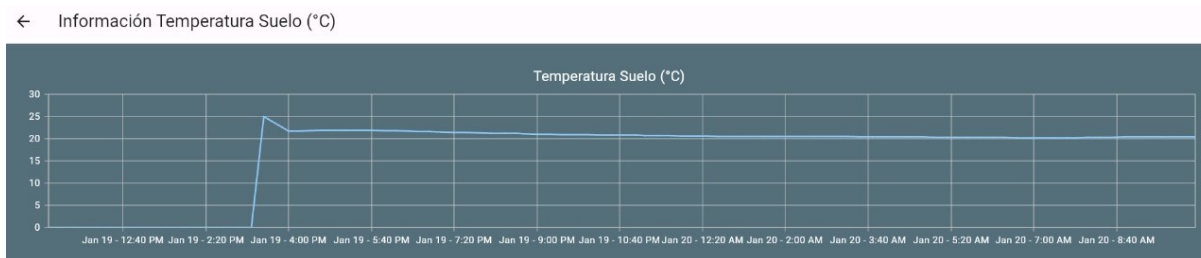


Figura 7.8: Gráfica de tendencia temperatura de suelo. Fuente: Plataforma web de PhenoAgro.

En la investigación de productos con funcionalidades similares y que estén disponibles en el mercado se encontró INSTACROPS, que tiene como misión mantener a los agricultores informados acerca de las necesidades de sus cultivos, para tomar decisiones oportunas con el fin de optimizar recursos y maximizar el rendimiento de sus cosechas. Esta compañía desarrolló la plataforma INSTASOIL, el anexo 4 muestra una ficha con información relevante de la misma. El costo de esta plataforma es de \$793 USD, es decir, \$3.100.000 COP aproximadamente [21]. El prototipo de módulo de suelo diseñado e implementado tiene un costo aproximado de \$64 USD y, agregando el valor del módulo de planta, potencia y comunicaciones costaría \$564 USD aproximadamente.

La plataforma diseñada para monitoreo remoto y en tiempo real de variables de suelo es rentable para los usuarios y es fácil de ensamblar. Los sensores utilizados para medir la temperatura del suelo (DS18B20) y la humedad del suelo (V1.0) fueron escogidos a partir de 4 criterios (precio,

voltaje de alimentación, protocolo de comunicación y material). El protocolo por el cual el módulo de suelo se conecta al MPPC es el protocolo RS485, este módulo de potencia cuenta con una autonomía aproximada de 2.5 días sin usar sus paneles solares. Es importante resaltar que al replicar la plataforma los costos pueden bajar, ya que, hay productos como la resina que contiene grandes cantidades y sirve para varios prototipos, el tubo de PVC se compra por metros (saldría más barato) y el Transceiver RS485 ya no se necesitaría debido a que se compró para realizar pruebas de comunicación. A continuación el cuadro de costos para el desarrollo del prototipo del módulo de suelo:

Producto	Precio (COP)	Precio (USD)
Sensor temperatura suelo	\$37.700	\$9.45
Sensor humedad suelo	\$10.400	\$2.61
PCB	\$120.000	\$30.07
Transceiver RS485	\$5.000	\$1.27
Resina	\$27.000	\$6.83
Conector 4 pines	\$12.000	\$3.04
Tubo PVC	\$6.300	\$1.6
BOM	\$36.403	\$9.13
Total	\$254.803	\$64

Cuadro 7.1: Costos del prototipo. Fuente: Elaboración propia.

■ Consumo de corriente

A partir del diagrama esquemático de la figura 6.7 y las hojas de datos de los componentes es posible calcular el consumo de corriente de la tarjeta. Cabe destacar que la conexión de componentes como el sensor de temperatura de suelo y el sensor de humedad de suelo no consumen corriente. En el cuadro 7.2 se encuentran los valores típicos y máximos de algunos componentes.

Componente	Valor típico	Valor máximo	Unidades
LM321	0.09	0.16	mA
THVD1400	0.627	0.641	mA
AP2120	0.025	0.05	mA
ATtiny 404	9	9	mA
Total	9.742	9.851	mA
Promedio	9.7965		mA

Cuadro 7.2: Corriente consumida por la PCB. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Actualmente, los sistemas utilizados para medición de variables agrícolas son costosos y limitados en su alcance. Es en este contexto que se desarrolló un módulo de suelo que busca abordar aquellas limitaciones al ofrecer una alternativa más asequible, práctica y escalable. Al replicar esta plataforma en múltiples ubicaciones, se logra una mayor resolución y cobertura.

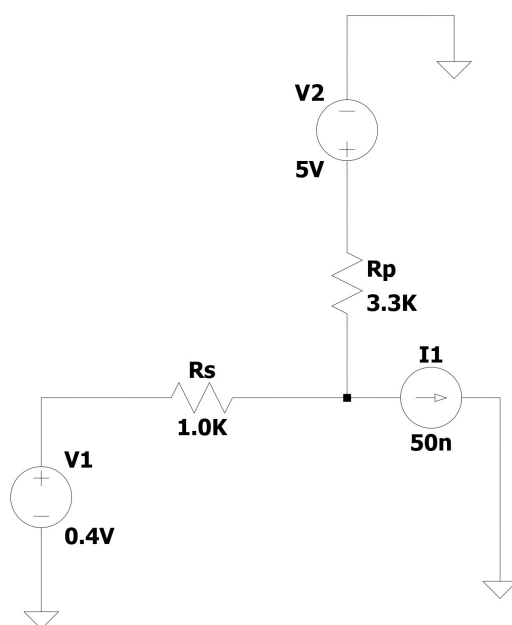
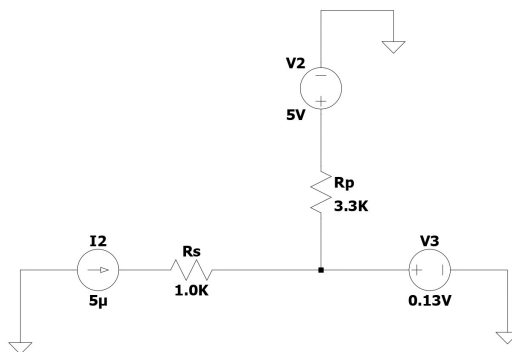
La concepción del diseño del módulo se formuló considerando que se debían destinar unos puertos de expansión para añadir futuros sensores. Desde la selección de los sensores y componentes se tuvo en cuenta que no debían sobrepasarse en costos, dando lugar a un prototipo con un valor de \$64 USD. Debido a que el módulo de suelo necesita de un módulo de potencia y comunicaciones, la PCB fue diseñada para que los módulos se puedan comunicar a través del estándar de comunicaciones RS485, específicamente con el MPCC del proyecto PhenoAgro. La implementación del módulo inició con la tarea de soldar los componentes en la PCB. Se logró la transmisión y recepción de los datos. Tanto los requerimientos funcionales como los No-Funcionales se cumplieron con éxito: grado de protección IP64, sensores a prueba de agua y resistentes a la corrosión, dispositivo visible para el usuario, es liviano, práctico, de fácil instalación y mantenimiento.

La evaluación del módulo diseñado ha confirmado su funcionalidad con el objetivo de conocer el estado y la evolución de los cultivos visualizando las mediciones de humedad de suelo y temperatura de suelo en la plataforma web de PhenoAgro con un tiempo de muestreo de 15 minutos. Proporcionar información sobre variables agrícolas convierte a la tecnología en una herramienta indispensable para el éxito y la sostenibilidad de los agricultores, los cuales pueden tomar decisiones que optimicen el rendimiento de sus cultivos. Además, mediante programas o iniciativas gubernamentales, se puede brindar la oportunidad a agricultores de todos los tamaños y recursos para beneficiarse de estas herramientas, permitiéndoles competir en el mercado y mejorar su productividad. Con sistemas de medición más asequibles, incluso personas con pequeñas huertas o terrenos pueden aprovechar estas tecnologías para mejorar sus prácticas agrícolas y obtener mejores resultados en sus cultivos.

Recomendaciones

- La plataforma web podría mostrar únicamente las mediciones de los sensores conectados, esto permitirá a los usuarios visualizar solo las variables relevantes según el sensor conectado en ese momento, evitando valores cero para las variables no medidas debido a la falta de sensores, es decir, que no muestre dichas variables. En la figura 7.4 se puede ver que sólo aparecen mediciones para humedad de suelo y temperatura de suelo, las demás variables tienen un valor de cero.
- Para mejorar la funcionalidad del módulo de suelo, se propone la implementación de un sistema de control que envíe notificaciones o alarmas al agricultor en caso de que la temperatura o la humedad del suelo se encuentren fuera de los rangos ideales para el cultivo específico. Esto permitiría una acción oportuna para preservar los cultivos.
- Existe la posibilidad de ampliar la versatilidad del sistema permitiendo la conexión de más sensores para medir diversas variables agrícolas, dado que la PCB tiene algunos puertos libres. Además, se podría considerar la opción de reemplazar los sensores existentes por modelos más robustos si se desea obtener mediciones mucho más precisas.
- La implementación de un sistema de riego automático a la plataforma puede aumentar el ahorro de agua y energía para minimizar el daño ambiental, de esta manera se previene el deterioro de los cultivos, asegurando condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Anexo 1 – Esquemáticos en LTspice y cuadro comparativo

Figura 10.1: Esquemático caso 1 ($V_{IH} = 2.2V$).Figura 10.2: Esquemático caso 2 ($V_{IL} = 0.8V$).

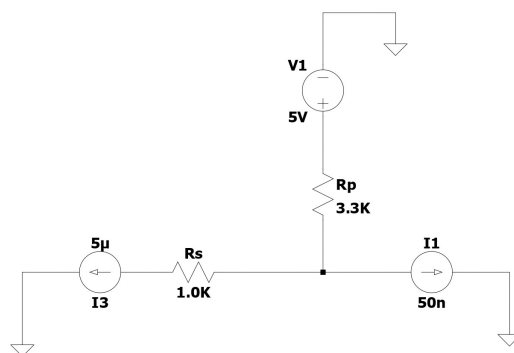


Figura 10.3: Esquemático caso 3 ($V_{IL} = 1.5V$).

VALOR SIMULACIÓN	VALOR CÁLCULOS TEÓRICOS
Caso 1	
$I_{rp} = 5.05 \mu A$	$I_{rp} = 5.05 \mu A$
$I_{rs} = 5 \mu A$	$I_{rs} = 5 \mu A$
$V_x = 4.98 V$	$V_x = 4.98 V$
Caso 2	
$I_{rp} = 1.35 mA$	$I_{rp} = 1.35 mA$
$I_{rs} = 5.0 \mu A$	$I_{rs} = 5 \mu A$
$V_y = 0.135 V$	$V_y = 0.135 V$
Caso 3	
$I_{rp} = 1.0 mA$	$I_{rp} = 1.0 mA$
$I_{rs} = 0.9 mA$	$I_{rs} = 1.0 mA$
$V_x = 1.39 V$	$V_x = 1.4 V$

Cuadro 10.1: Comparación valor simulado vs cálculos teóricos. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2 – Especificaciones sensores.

Características sensores de humedad y temperatura de suelo.

Anexo 3 – Cotizaciones.

Tablas cotizaciones y BOM.

Anexo 4 – Ficha informativa INSTASOIL

INSTASOIL
Estándar/Temp/Plus



Optimiza hasta en un **35%** el consumo de agua en tus riegos.



Con InstaSoil podrás monitorear la humedad de suelo de tu cultivo, para gestionar el tiempo y frecuencia de riego en forma eficiente.

¿QUÉ MIDE?

Parámetros/Formato	Estándar (*)	Temp	Plus
Humedad de suelo	X	X	X
Temperatura de suelo	X	X	X
Consumo de agua	X	X	X
Conductividad eléctrica	X	X	X
Temperatura ambiente		X	X
Humedad relativa (HR)		X	X
Presión barométrica		X	X
Punto de rocío		X	X
Horas frío		X	X
Porciones de frío		X	X
Días grado		X	X
DPV		X	X
pH de suelo			X

(*) Producto sin sensor atmosférico.



BENEFICIOS

- Optimización del consumo de agua y energía.
- Entrega de reportes periódicos personalizados.
- Aumento de la rentabilidad de tus cultivos.
- Uso eficiente de recursos humanos.



instacrops.com

contacto@instacrops.com

 INSTA SOIL

 INSTA WEATHER

 INSTA FLOW

 INSTA WELL

 SKY CROPS

 CROP ADVISOR

 INSTA BOX

Figura 10.4: Ficha informativa plataforma INSTASOIL. Fuente: INSTACROPS.

Bibliografía

- [1] M. Quimbaya, “Aportes del proyecto Ómicas para consolidar la seguridad alimentaria nacional,” *Comunicación personal con Luis Eduardo Tobón*, 2022.
- [2] S. M. F. S. Massruhá and M. d. A. Leite, “Agro 4.0-rumo à agricultura digital.” 2017.
- [3] J. M. Talavera, L. E. Tobón, J. A. Gómez, M. A. Culman, J. M. Aranda, D. T. Parra, L. A. Quiroz, A. Hoyos, and L. E. Garreta, “Review of iot applications in agro-industrial and environmental fields,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 142, pp. 283–297, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917304155>
- [4] Cenicaña, “Agroindustria 4.0 con inteligencia artificial.” Sep 2022. [Online]. Available: <https://www.cenicana.org/agroindustria-4-0-con-inteligencia-artificial-que-es/>
- [5] R. Ramírez, P. Vargas, and O. Cárdenas, “La seguridad alimentaria: una revisión sistemática con análisis no convencional,” *Revista Espacios*, vol. 41, no. 45, pp. 319–328, 2020.
- [6] O. W. y. U. FAO, FIDA, “Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en américa latina y el caribe,” *Licencia: CC BY-NC-SA*, vol. 30, 2020.
- [7] C. ÓMICAS, “Phenoagro - plataforma iot georeferenciada para el análisis y la caracterización de cultivos, a través de la medición en tiempo real de variables críticas,” *Comunicación personal con Luis Eduardo Tobón*, 2022.
- [8] Artedínámico, “Medición de humedad,” *Equipos y laboratorio de Colombia*, 2022. [Online]. Available: <https://www.equipoyslaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/medicion-de-humedad>
- [9] D. O. Prieto Poveda, “La tecnificación como herramienta para incrementar la productividad agropecuaria en colombia,” B.S. thesis, Fundación Universidad de América, 2019.
- [10] I. C. de Bienestar Familiar, “Política de seguridad alimentaria y nutricional,” 2021. [Online]. Available: <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/politica-seguridad-alimentaria>
- [11] Reddi, “Innovación tecnológica con el mundo empresarial.” [Online]. Available: <https://reddicolombia.com/>
- [12] S. I. O. Duque, “Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos.” *Revista vector*, vol. 12, pp. 51–60, 2017.
- [13] G. P. Castaño Esquivel *et al.*, “Monitoreo de la temperatura superficial de la lechuga en un cultivo urbano empleando el sensor amg8833,” 2018.

- [14] M. Cardenas, D. González, and C. Retamal, “Protocolo lora para implementación de redes iot en smart cities.” Dec 2018. [Online]. Available: http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv//elo323.ipd438/2s18/projects/reports/RetamalCardenasGonzalez/Informe_Lora.pdf
- [15] O. Weis, “Guía de la comunicación rs485,” Oct 2021. [Online]. Available: <https://www.eltime.com/es/article/rs485-communication-guide/>
- [16] proain, “La humedad del suelo y como monitorearla,” Sep 2021. [Online]. Available: <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/la-humedad-del-suelo-y-como-monitorearla>
- [17] J. M. Enciso, D. Porter, and X. Périès, “Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego,” *University of Texas System, Austin, TX*, 2007.
- [18] D. S. G. Araque, M. C. V. Sarmiento, and J. P. Corredor, “Caracterización de temperatura y humedad de suelos agrícolas,” *Letras ConCiencia TecnoLógica*, no. 16, pp. 24–31, 2017.
- [19] A. Jaramillo-Botero, J. Colorado, M. Quimbaya, M. C. Rebolledo, M. Lorieux, T. Ghneim-Herrera, C. A. Arango, L. E. Tobón, J. Finke, C. Rocha, F. Muñoz, J. J. Riascos, F. Silva, N. Chirinda, M. Caccamo, K. Vandepoele, and W. A. Goddard, “The Ómicas alliance, an international research program on multi-omics for crop breeding optimization,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.992663>
- [20] L. ES, “Libelium mejora la producción y agricultura sostenible en los cultivos de plátano en colombia gracias a las redes de sensores,” Sep 2016. [Online]. Available: <https://www.libelium.com/es/casos-exito/libelium-mejora-la-produccion-y-agricultura-sostenible-en-los-cultivos-de-platano-en-colombia-gracias-a-las-redes-de-sensores/>
- [21] INSTACROPS, “Plataforma de desarrollo de hardware iot y software para la agricultura.” [Online]. Available: <https://www.instacrops.com/>
- [22] ARABLE, “Inteligencia total de cultivos. un sistema sencillo.” [Online]. Available: <https://www.arable.com/>
- [23] N. Mechatronics, “Sensor de humedad de suelo fc-28,” 2023. [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/47-sensor-de-humedad-de-suelo-fc-28.html>
- [24] DFRobot, “Capacitive soil moisture sensor sen0193.” [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- [25] A. Electronics, “Therm200 sensor de temperatura del suelo (-40°C a 85°C),” 2023. [Online]. Available: <https://www.alphaomega-electronics.com/es/sensores-y-sondas/2088-therm200-sensor-de-temperatura-del-suelo-40-c-a-85-c.html>

- [26] N. Mechatronics, "Sensor de temperatura digital ds18b20," 2023. [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/16-sensor-de-temperatura-digital-ds18b20.html>