



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería electrónica

Fecha: 25-07-2023

Autores: Juan David Ordoñez Zambrano y Rusbelt Palomino Mina

Nombre del Proyecto de Grado:

Diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de macronutrientes NPK en un cultivo de piña en Santander de Quilichao.

Director: Juan Manuel Nogales Viedman

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director(a) del Proyecto de Grado

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. HERNAN CAMILO ROCHA NIÑO
Decano de la Facultad de Ingeniería

[Handwritten signature]

ING. LUIS EDUARDO TOBON LLANO
Director Carrera Ingeniería Electrónica.

Juan Manuel NOGALES V

ING. JUAN MANUEL NOGALES VIEDMAN
Director(a) Trabajo

Alexander Martínez A.

ING. ALEXANDER MARTÍNEZ
Jurado 1

Daniel F. Murcia

ING. DANIEL FERNANDO MURCIA
Jurado 2

Santiago de Cali, Julio 26 de 2023

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Hernan Camilo Rocha Niño

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Cali.

Cordial Saludo.

Por medio de la presente informo que he dirigido el Trabajo de grado titulado “ Diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de macronutrientes NPK de un cultivo de piña en Santander de Quilichao ”, realizado por los estudiantes de Ingeniería Electrónica, Juan David Ordoñez Zambrano (cod: 8943577) y Rusbelt Palomino Mina (cod: 8943678), para el cual certifico que se han realizado las correcciones sugeridas.

Atentamente,



Dr. Juan Manuel Nogales Viedman



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Diseño e implementación de un sistema para el
monitoreo de macronutrientes NPK de un cultivo de
piña en Santander de Quilichao

Juan David Ordoñez Zambrano
Rusbelt Palomino Mina

Director: Dr. Juan Manuel Nogales Viedman

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ingeniería Electrónica
Trabajo de Grado

Julio 18 de 2023

Santiago de Cali, Julio 18 de 2023

Señores

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Cali.

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos presentarle el Trabajo de grado titulado “Diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de macronutrientes NPK de un cultivo de piña en Santander de Quilichao” .

Esperamos 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,



Juan David Ordoñez Zambrano

Código: 8943577



Rusbelt Palomino Mina

Código: 8943678

Santiago de Cali, Julio 18 de 2023

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

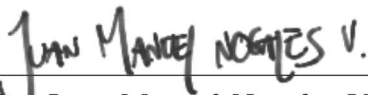
Facultad de Ingeniería y Ciencias

Cali.

Cordial Saludo.

Por medio de la presente certifico que el Trabajo de grado titulado “Diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de macronutrientes NPK de un cultivo de piña en Santander de Quilichao”, realizado por los estudiantes de Ingeniería Electrónica, Juan David Ordoñez Zambrano (cod: 8943577) y Rusbelt Palomino Mina (cod: 8943678), se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,


Dr. Juan Manuel Nogales Viedman

*Dedico este trabajo de grado a Dios,
por ser mi guía y fuente de sabiduría.
A mis padres, por su amor incondicional y
apoyo constante. Y a mi amada esposa Natalia
y mi hijo Juan Daniel, por inspirarme a alcanzar
mis metas y ser mi mayor motivación.*

Juan David Ordoñez Z.

*Dedico este trabajo de grado con todo mi corazón a mis
amados padres. Su constante apoyo, amor incondicional y valores
han sido la base sólida que me ha impulsado a llegar hasta este punto.
A pesar de no contar con educación superior, ustedes han sido mi ejemplo
y guía en cada paso de este camino. Este logro es gracias a su inquebrantable
dedicación y sacrificio. Les agradezco de todo corazón por ser mis pilares y
por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este trabajo es un tributo a su amor,
sabiduría y confianza en mí. Gracias, mamá y papá, por todo lo que han hecho por mí.*

Rusbelt Palomino Mina.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a Dios por su guía y bendiciones durante toda nuestra vida y proceso académico; también a nuestros padres y familiares, por su apoyo incondicional y amor inquebrantable. Al Profesor Juan Manuel Nogales deseamos agradecer por su dirección y orientación experta, que ha sido fundamental en el desarrollo de este trabajo; y a todos aquellos que nos brindaron su ayuda y colaboración, lo cual nos permitió terminar con éxito esta importante etapa.

Resumen

Teniendo en cuenta que una mala gestión de los planes de fertilización puede afectar negativamente no solo a las plantas, sino también al suelo de un cultivo, en este trabajo de grado se presenta el diseño e implementación de un sistema de agricultura de precisión de bajo costo para el monitoreo de niveles de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en un cultivo de piña. El sistema consta de cinco nodos sensores y un nodo Gateway. Los nodos sensores utilizan sondas calibradas para medir los niveles de NPK y envían los datos al nodo Gateway a través de un módulo transceptor. Una base de datos en Firebase recibe, organiza y almacena las medidas y los valores de NPK pueden consultarse en tiempo real mediante una aplicación móvil desarrollada en App Inventor.

Las pruebas de funcionamiento e implementación se llevaron a cabo en un cultivo de piña ubicado en la vereda Quinamayó de Santander de Quilichao, Cauca. Los resultados de las pruebas confirmaron la calibración exitosa de las sondas y el correcto funcionamiento del sistema. Una encuesta realizada para evaluar el desempeño de la aplicación móvil y del sistema en general reveló que la aplicación es fácil de usar y los agricultores se mostraron satisfechos con el sistema de monitoreo.

Palabras claves: Nitrógeno, Fósforo; Potasio; cultivo de piña, red de sensores inalámbrica, agricultura de precisión.

Abstract

Taking into account that poor management of fertilization plans can negatively affect not only plants but also the soil of a crop, this thesis presents the design and implementation of a low-cost precision agriculture system for monitoring Nitrogen (N), Phosphorus (P), and Potassium (K) levels in a pineapple crop. The system consists of five sensor nodes and one Gateway node. The sensor nodes use calibrated probes to measure NPK levels and transmit the data to the Gateway node through a transceiver module. A Firebase database receives, organizes, and stores the measurements, and NPK values can be accessed in real-time through a mobile application developed in App Inventor.

The functionality and implementation tests were carried out in a pineapple crop located in the Quinamayó area of Santander de Quilichao, Cauca. The test results confirmed the successful calibration of the probes and the proper functioning of the system. A survey conducted to evaluate the performance of the mobile application and the system in general revealed that the application is user-friendly, and the farmers expressed satisfaction with the monitoring system.

Keywords: Nitrogen; Phosphorus; Potassium; pineapple crop; wireless sensor network; precision agriculture.

Índice general

1. Introducción	1
2. Contextualización del proyecto	3
2.1. Definición del problema de investigación	3
2.2. Justificación del problema	5
2.3. Objetivos	7
2.3.1. Objetivo General	7
2.3.2. Objetivos Específicos	7
2.4. Marco Teórico	8
2.4.1. Generalidades del Cultivo de Piña	8
2.4.2. Fertilización	12
2.4.3. Antecedentes	13
2.4.4. Sensores comerciales	18
2.4.5. Programación extrema XP	19
2.4.6. Red de sensores inalámbricos	20
3. Materiales y métodos	22
3.1. Descripción Cultivo de Piña	22
3.2. Requerimientos	23
3.2.1. Requerimientos funcionales	23
3.2.2. Requerimientos técnicos	23
3.3. Solución propuesta	24
3.3.1. Nodos sensores	25
3.3.2. Nodo gateway	25
3.3.3. Base de datos	26
3.3.4. Visualización	26
3.4. Diseño de la red de sensores de NPK	27
3.4.1. Diseño de nodos sensores	27
3.4.2. Nodo gateway	33
3.5. Diseño de alimentación independiente	34
3.6. Base de datos en plataforma de IoT	36
3.7. Desarrollo de interfaz de visualización	38
4. Resultados y discusión	40
4.1. Selección de componentes y plataformas	40

4.1.1.	Dispositivos microcontroladores	40
4.1.2.	Dispositivos de transmisión y recepción	42
4.1.3.	Dispositivos de alimentación independiente	43
4.1.4.	Plataforma IoT para el almacenamiento	45
4.1.5.	Plataforma para la interfaz de visualización	46
4.2.	Construcción de dispositivos	47
4.2.1.	Diagrama del sistema con componentes	48
4.2.2.	Montajes y pruebas en protoboard	48
4.2.3.	Diseño de PCBs	57
4.2.4.	Cajas protectoras	60
4.3.	Desarrollo de la Aplicación móvil	62
4.3.1.	Recolección de información	62
4.3.2.	Diseño realizado	63
4.4.	Pruebas	66
4.5.	Análisis de resultados	66
4.6.	Análisis de costos	76
5.	Conclusiones	79
6.	Trabajos futuros	81
6.1.	Integración de sensores adicionales	81
6.2.	Transición a un sistema embebido	81
6.3.	Diseño cajas protectoras certificadas	82
6.4.	Implementación de algoritmos avanzados de análisis de datos	83
	Bibliografía	85
7.	Anexos	90
7.1.	Anexo 1 - Información proporcionada por los agricultores	90
7.2.	Anexo 2 - Código para el spline cúbico	92
7.3.	Anexo 3 - Esquemáticos y modelo 3D de los circuitos	93
7.4.	Anexo 4 - Diseño y construcción de cajas	95
7.5.	Anexo 5 - Código para visualización de histórico	97
7.6.	Anexo 6 - Código para el módulo Wifi ESP8266	101
7.7.	Anexo 7 - Código para el nodo sensor	108
7.8.	Anexo 8 - Código para el nodo gateway	115
7.9.	Anexo 9 - Encuesta de Evaluación del Sistema de Monitoreo de NPK en el Cultivo de Piña	119
7.10.	Anexo 10 - Resultados de las encuestas	120

7.11. Anexo 11 - Manual de usuario del sensor NPK meter tester 127

Índice de figuras

2.1. Piña Cayena Lisa	9
2.2. Piña Perolera	10
2.3. Piña Manzana	10
2.4. Piña Gold MD2	11
2.5. Arquitectura de una red de sensores inalámbricos. Elaboración propia	21
3.1. Imagen satelital ubicación cultivo de piña	23
3.2. Diagrama de relación entre los subsistemas de la solución propuesta	24
3.3. Diagrama de flujo de datos de la solución propuesta	27
3.4. Diagrama de bloques de un nodo sensor	30
3.5. Soil NPK Tester Meter RS485 Precision Soil Fertility Nutrient tester for Agriculture	31
4.1. Arduino nano	41
4.2. Modulo HL-69.	42
4.3. Modulo transceptor NRF24L01.	43
4.4. Bateria recargable de 3.7 V 18650.	44
4.5. Panel solar 5 V – 100 mA.	45
4.6. Diagrama del sistema detallado.	48
4.7. Diagrama de conexiones para calibración de la sonda. Elaboración propia.	49
4.8. Medición de NPK en diferentes muestras de tierra.	49
4.9. Medición de N en diferentes muestras de tierra	51
4.10. Medición de P en diferentes muestras de tierra.	51
4.11. Medición de K en diferentes muestras de tierra.	52
4.12. Gráfica de spline cúbico para medición de Nitrógeno.	53
4.13. Gráfica de spline cúbico para medición de Fósforo.	53
4.14. Gráfica de spline cúbico para medición de Potasio.	54
4.15. Diagrama de la red de sensores inalámbricos. Elaboración propia.	55
4.16. Diagrama de conexión entre Arduino nano y módulo NRF24L01. Elaboración propia.	55
4.17. Estructura de la base de datos en Realtime Database	56
4.18. Estructura de la base de datos en Firestore Database	57
4.19. Diseño de PCB de la sonda	57
4.20. Diseño de PCB del nodo sensor	58
4.21. Diseño de PCB del nodo Gateway	58

4.22. Montaje de componentes en PCB de un nodo sensor.	59
4.23. Montaje de componentes en PCB de nodo Gateway.	59
4.24. Montaje de componentes en PCB de la sonda.	60
4.25. Nodo Gateway en su caja	61
4.26. Nodo sensor y sonda en sus cajas	61
4.27. Diagrama de casos de uso de la aplicación móvil.	63
4.28. Pantalla Histórico de la aplicación móvil.	64
4.29. Pantallas de la aplicación móvil.	65
4.30. Pruebas de las sondas.	67
4.31. Montaje en protoboard de un nodo de la red de sensores inalámbrica.	68
4.32. Pruebas de los nodos de transmisión y recepción en protoboard.	69
4.33. Resultados de pruebas de transmisión y recepción en protoboard.	69
4.34. Nodos sensores instalados en el cultivo para prueba de funcionamiento.	70
4.35. Capacitación a los agricultores sobre el funcionamiento del sistema.	71
4.36. Datos cargados en la base de datos Real Time.	71
4.37. Datos cargados en la base de datos Firestore.	72
4.38. Consulta de NPK para la zona 2 del cultivo de piña.	72
4.39. Consulta del histórico de datos.	73
4.40. Pruebas de funcionamiento del sistema en el cultivo.	73
4.41. Pruebas de panel solar en ubicación final del nodo sensor.	74
4.42. Ubicación final del nodo Gateway.	75
7.1. Esquemático de conexiones de un nodo sensor	93
7.2. Modelo 3D de la PCB del nodo sensor	93
7.3. Esquemático de conexiones de un nodo Gateway.	94
7.4. Modelo 3D de la PCB del nodo Gateay	94
7.5. Boceto nodo gateway y nodo sensor	95
7.6. Diseño caja protectora del nodo sensor	96
7.7. Diseño caja protectora del nodo gateway	96
7.8. Diseño caja protectora de la sonda del sensor	97

Índice de cuadros

2.1. Composición nutricional para 100 g de piña. Fuente: USDA.	5
3.1. Criterios y especificaciones de los microcontroladores	28
3.2. Criterios de selección del transeptor	29
3.3. Especificaciones del sensor	31
3.4. Niveles recomendados de NPK	32
3.5. Rangos de valores para los macronutrientes	33
3.6. Criterios de selección de la base de datos	37
3.7. Criterios de selección de la plataforma de desarrollo App movil	39
4.1. Matriz de selección de los microcontroladores	41
4.2. Matriz de selección de los dispositivos transmisión y recepción	42
4.3. Consumo de los dispositivos en modo activo	43
4.4. Consumo de los dispositivos en modo sleep	44
4.5. Características de paneles solares	44
4.6. Matriz de selección de los paneles solares	45
4.7. Matriz de selección de la base de datos.	46
4.8. Matriz de selección de la plataforma de diseño de la APP.	46
4.9. Mediciones de NPK para 25 muestras de tierra.	50
4.10. Comparación de mediciones entre las sondas y el sensor NPK tester	67
4.11. Porcentajes de error de las mediciones	68
4.12. Tabla de Recursos Humanos y Costos	76
4.13. Tabla de Componentes y Precios	77

Introducción

El proceso de fertilización de los cultivos es una de las prácticas que requiere mayor trabajo en una plantación, pues el rendimiento y productividad dependen de este proceso [1]. Cada vez se necesitan nuevas tecnologías que permitan optimizar los procesos de un cultivo: redes de sensores, comunicación inalámbrica, almacenamiento en la nube, inteligencia artificial, entre otras herramientas. La implementación de estas tecnologías mejora el uso de los recursos destinados a la agricultura, pues logran desarrollar lo que se conoce como agricultura de precisión.

En la fertilización de un cultivo, la agricultura de precisión permite administrar los nutrientes del suelo, y así saber en dónde y cuándo se necesitan [2]. Sin embargo, es necesario el uso de sensores que puedan dar información sobre el estado de los macronutrientes en tiempo real. Los sensores deben ir acompañados por sistemas que permitan recopilar y analizar la información para que pueda ser usada por los agricultores para mejorar sus métodos de fertilización. Tales sistemas de recomendación ayudan a identificar las cantidades necesarias de fertilizantes para que el cultivo tenga mayor rentabilidad.

En este trabajo, se propone desarrollar un sistema de monitoreo de nutrientes para un cultivo de piña ubicado en la vereda Quinamayó del municipio de Santander de Quilichao. Actualmente, en esta zona se utilizan técnicas tradicionales y poco eficientes para llevar a cabo la planificación y fertilización del cultivo. Además, los sensores más modernos para la medición de los macronutrientes del suelo tienen costos elevados, lo que los hace poco asequible para los pequeños y medianos agricultores de esta zona.

El primer capítulo presenta una “Contextualización del proyecto” donde se detalla la importancia de los macronutrientes Nitrógeno (N), Fosforo (P), Potasio (K) en el cultivo de piña, así como las limitaciones y desafíos actuales para su monitoreo. El segundo capítulo se denomina “Materiales y métodos” y detalla la metodología utilizada en el diseño e implementación del sistema de monitoreo. Posteriormente, se presenta el capítulo de “Resultados y discusión” donde se presentan los hallazgos obtenidos en el proceso de diseño y construcción de los componentes del sistema. Finalmente, en la sección de “Conclusiones”, se resumen los principales hallazgos del estudio y se destacan las implicaciones prácticas y potenciales aplicaciones del sistema de monitoreo propuesto. También, se mencionan posibles

recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en el sistema.

Contextualización del proyecto

2.1. Definición del problema de investigación

En la industria agrícola, la fertilización adecuada es un factor crucial para el éxito en la producción de piña. La cantidad y el tipo de nutrientes que la planta recibe pueden afectar su crecimiento, su producción de frutos y su calidad. Sin embargo, es importante tener en cuenta que también es necesario no sobre-fertilizar los suelos, debido a que esto puede generar daños permanentes sobre el suelo. Por ejemplo, provocar una acumulación de nutrientes en este, puede conllevar a producir efectos negativos en la calidad del suelo y, finalmente, en la salud de las plantas. Por lo tanto, es fundamental utilizar técnicas de monitoreo para garantizar una fertilización adecuada y evitar la sobre-fertilización, asegurándose de que las plantas reciban la cantidad correcta de nutrientes en el momento adecuado, sin causar daños permanentes a los suelos cultivados.

Una de las características más importantes que se consideran en este proyecto es que la piña es una fruta tropical que se ha hecho cada vez más atractiva comercialmente a nivel global. Uno de sus mayores beneficios reside en los nutrientes que esta puede aportar a la dieta humana y su capacidad para adaptarse a condiciones ásperas de clima, suelo e inclusive a largos tiempos de sequía [3], lo que, si bien puede garantizar la supervivencia de la planta, no nos permite garantizar la calidad del fruto que dará.

Además, según la FAO, para el año 2017 “la piña representaba una producción anual de más de 26,4 millones de toneladas anuales, y un mercado creciente que moviliza más de 14.900 millones de dólares en todo el mundo” [4], de los cuales para el año en mención Colombia contribuyó con cerca de 11 millones de dólares en exportaciones de piña [5]. En Colombia, uno de los principales departamentos productores de piña es el departamento del Cauca, el cual en 2018 contribuyó con el 7% de la producción nacional, ocupando el cuarto lugar [6]. En el departamento del Cauca, la mayor producción se encuentra en la zona norte, en el municipio de Santander de Quilichao y sus alrededores. Esto gracias a sus condiciones climáticas. Según datos de la administración del municipio, el cultivo de piña ocupa el tercer lugar de los cultivos más importantes que aportan a la economía, ocupando el 9.73% del área sembrada transitoria y permanente del municipio.

Luego de que los agricultores de la zona manifestaran que el método de fertilización que están utilizando actualmente no resulta efectivo, los investigadores de esta tesis vieron una opción de aportar con un desarrollo ajustado al presupuesto de estos pequeños productores. Principalmente, se identificó que no hay un mecanismo para calcular la cantidad de nutrientes que se le está aplicando a cada planta. En particular, uno de los métodos utilizados por ellos es dispensar abonos foliares por medio de una bomba manual. Es decir, una persona se encarga de aplicar los fertilizantes a cada zona. Otros agricultores cuentan con sistemas un poco más desarrollados, los cuales utilizan una motobomba y canales de riego para aplicar los nutrientes al cultivo. Finalmente, otra metodología es usar planes de fertilización, es decir, los agricultores de la zona se basan en un estudio de suelo realizado antes de sembrar el cultivo y programan días de fertilización al cual le realizan modificaciones apoyados en la experiencia en caso de crearlas necesarias.

Estos planes de fertilización no son adecuados ya que no tienen en cuenta posibles cambios en los niveles de NPK del suelo debido a factores naturales o artificiales, por lo cual no se sabe con certeza si todas las zonas necesitan la misma cantidad de nutrientes. Estos planes inadecuados afectan directamente el rendimiento del cultivo y, por ende, la productividad y economía del agricultor [1]. Los métodos convencionales no cuentan con herramientas para saber si a cada planta se le aplicó la cantidad de nutrientes que necesita o por lo menos que cada lote obtenga la misma cantidad de abono. Por lo tanto, la solución propuesta debe estar dentro del marco de la agricultura de precisión, pues sugiere mejorar la eficiencia en el uso de recursos destinados al proceso de fertilización del cultivo de piña. En esta investigación sobre el proceso de fertilización en cultivos de piña, en especial, se pretende abordar técnicas que permitan monitorear los macronutrientes del suelo de tal forma que los agricultores tengan una alternativa con la que puedan saber donde aplicar los nutrientes a sus cultivos de forma más eficiente.

Se ha realizado una consulta entre algunos agricultores de piña de la zona de las posibles problemáticas de los cultivos, permitiendo identificar un problema común del cual surge la siguiente pregunta: ¿Cómo monitorear los macronutrientes de los cultivos de piña en el municipio de Santander de Quilichao tal que los agricultores optimicen sus recursos en el proceso de fertilización?

Resumiendo, el proceso de fertilización es una de las prácticas más importantes del cultivo, pues de ella depende el aumento de la productividad [3]. En la zona no hay herramientas que permitan realizar una mejor gestión de la fertilización. Esta propuesta se presenta un diseño de sistema de monitoreo de los macronutrientes del cultivo de piña, el cual use sensores de NPK de forma que se pueda identificar cuando una zona del cultivo necesite fertilización o el caso contrario, que no requiera más nutrientes. Además, haciendo uso de tecnologías del internet de las cosas (IoT), los agricultores tienen una interfaz que les permite visualizar esta

información de forma fácil, intuitiva y en tiempo real. Esta herramienta pretende ayudar a los agricultores a planificar mejor la fertilización y a su vez disminuir los costos del proceso.

2.2. Justificación del problema

Para el 2030 se estima un aumento del 60% de la demanda mundial de alimentos [7]. Es necesario reducir el impacto ambiental que genera la agricultura y aumentar la capacidad de suplir las necesidades alimentarias mundiales, se requiere implementar técnicas que ayuden a optimizar el uso de los recursos tanto naturales como químicos. Debido a esto ha surgido una solución desde la ingeniería conocida como agricultura de precisión que facilita a los agricultores herramientas que les permitan gestionar mejor su cultivo en todas las etapas.

En Colombia, la producción y el consumo de piña ha ido incrementando en los últimos años y se espera que lo siga haciendo debido a la implementación de nuevas tecnologías que impactan positivamente la producción y el rendimiento de los cultivos [8]. Uno de los aspectos más destacables de la piña es su alto valor nutricional. Es una fuente excelente de vitaminas, carotenoides y fitonutrientes, además, es libre de grasas y colesterol, es rica en calcio, potasio, fósforo, silicio, magnesio y cobre. Estas propiedades la hacen atractiva a nivel nutricional para el mercado nacional e internacional.

A continuación, en la tabla 2.1 se presenta la composición nutricional de la piña basada en una porción comestible de 100 gramos, según datos del Servicio de investigación agropecuaria del Departamento de Agricultura de Estados Unidos [9].

Vitaminas		Nutrientes		Minerales	
Vitamina C, ácido ascórbico total (mg)	47.8	Energía (kcal)	50	Calcio (mg)	13
Vitamina B1, tiamina (mg)	0.079	Agua (g)	86	Hierro (mg)	0.29
Vitamina B2, riboflavina (mg)	0.032	Alcohol (g)	0	Magnesio (mg)	12
Vitamina B3, niacina (mg)	0.5	Proteínas (g)	0.54	Fósforo (mg)	8
Vitamina B6 (mg)	0.112	Hidratos de carbono (g)	13.12	Potasio (mg)	109
Vitamina B9, ácido fólico (µg)	18	Azúcares (g)	9.85	Sodio (mg)	1
Vitamina A, RAE (µg)	3	Fibra dietética total (g)	1.4	Zinc (mg)	0.12
Vitamina A, IU (µg)	58	Grasas (g)	1.12	Cobre (mg)	0.11
Caroteno, beta (µg)	35	Ácidos grasos saturados (g)	0.009	Selenio (µg)	0.1
Caroteno, beta (µg)	0	Ácidos grasos monoinsaturados (g)	0.013		
Criptoxantina, beta (µg)	0	Ácidos grasos poliinsaturados (g)	0.04		
Licopeno (µg)	0	Colesterol (mg)	0		
Luteína + zeaxantina (µg)	0				
Vitamina E (alfa-tocoferol) (µg)	0.02				
Vitamina D (D2 + D3)	0				
Vitamina K (filoquinona) (µg)	0.7				

Tabla 2.1: Composición nutricional para 100 g de piña. Fuente: USDA.

Adicionalmente, la piña es atractivamente comercial debido a su bajo precio medio de exportación, por lo cual es la fruta tropical que se exporta en mayor cantidad según la FAO.

Esta fruta para el año 2020 tuvo una producción mundial de 3,1 millones de toneladas, lo cual a pesar de tener una disminución del 7,9% con respecto al 2019, sigue siendo un número importante que representa el potencial comercial de la piña en la economía mundial. Cabe resaltar que dicha disminución se debe a problemas asociados a la pandemia del Covid-19.

En Colombia, los diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas del país hacen que las tierras colombianas sean ideales para la producción de piña de tipo exportación, especialmente, en los departamentos de Santander, Risaralda, Cauca, Valle del Cauca, Cesar y Casanare [10]. No obstante, uno de los aspectos que se han visto descuidados en este tipo de cultivos convencionales es la sostenibilidad del terreno del cultivo.

Las técnicas de fertilización transmitidas a través de generaciones no tienen ningún rigor científico. Por ejemplo, algunos agricultores aún suelen creer que al aplicar fertilizantes en exceso van a mejorar el rendimiento del cultivo, desconociendo que la sobre-fertilización causa un grave impacto ambiental y, a largo plazo, daña el terreno [11].

En esta región, los agricultores de piña parten de un único análisis de suelo previo a la siembra con el cual estiman cuáles serán los valores nutricionales del cultivo hasta el momento de la cosecha. También, en algunos campos más sofisticados, se encontró que cuentan con estudios de laboratorio con muestras de tierra y foliares tomados del cultivo, pero no se realizan con frecuencia y, por tanto, no arrojan resultados en tiempo real. A partir de estos pocos análisis, los agricultores programan sus abonos periódicamente, sin embargo, estos métodos no resultan eficientes dado a que no se tienen en cuenta las posibles pérdidas o ganancias de nutrientes que puede tener el cultivo debido diferentes fenómenos de la naturaleza durante el crecimiento de las plantas [12]. Como consecuencia, los agricultores en ocasiones aplican fertilizante sin tener información de lo que el cultivo necesita realmente.

En especial, los fertilizantes utilizados en el cultivo que son de origen industrial perjudican la sostenibilidad del terreno si se aplica una cantidad en exceso. Además, debido a que los fertilizantes nitrogenados, entre otros son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero [11], podrían afectar también el medio ambiente. Por tal motivo, es importante el desarrollo de sistemas que permitan monitorear los nutrientes aplicados a los cultivos.

Los agricultores necesitan un sistema capaz de dar información en tiempo real de los nutrientes presentes en el cultivo, el cual les permitiría tener un mejor control de los fertilizantes aplicados al cultivo y una mejor gestión del mismo. Actualmente, el mercado ofrece herramientas y sensores para la implementación de sistemas de monitoreo sofisticados. Sin

embargo, se identificó que los sensores más completos para la implementación de estos sistemas tienen precios elevados que superan los COP\$ 300.000 llegando a COP\$ 8'500.000 (precios obtenidos en tiendas virtuales como Amazon [13], Alibaba [14], Aliexpress [15] y EBay [16]). Por lo que implementar sistemas de monitoreo con este tipo de sensores se hace poco asequible para agricultores pequeños y medianos, pues un cultivo requiere de al menos cuatro sensores de estos para implementar el monitoreo según afirman los agricultores.

En este trabajo se estudia el caso del cultivo de piña en la vereda Quinamayó de Santander de Quilichao, donde no se cuenta con técnicas que permitan saber el estado nutricional del suelo a lo largo del crecimiento de las plantas. Pues el proceso de fertilización actual de estos cultivos se lleva a cabo siguiendo los métodos convencionales.

Por lo tanto, con el sistema de monitoreo propuesto se espera establecer cuáles son los umbrales de los valores nutricionales cuando el cultivo requiere aumentar la fertilización. En palabras de los agricultores, este sistema le permite generar planes de fertilización más eficientes que ayudan a optimizar el uso de los fertilizantes. En consecuencia, la optimización de la fertilización tiene el potencial de mejorar el rendimiento de los cultivos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia de la agronomía de nitrógeno [17]. Por tanto, los agricultores podrían mejorar la productividad [18] y desempeño de sus cultivos y, a la vez, contribuir al cuidado del medio ambiente, aspecto que resulta de suma importancia para los suelos de los cultivos [11].

2.3. Objetivos

Con el fin de atender la problemática identificada y para llevar a cabo el proyecto de grado se establecen los siguientes objetivos:

2.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema que permita monitorear zonas que requieren fertilización de macronutrientes (NPK) presentes en los suelos de los cultivos de piña, mediante el uso de técnicas de bajo costo para pequeños y medianos agricultores.

2.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar a través de la revisión del estado del arte las técnicas que nos permitan diseñar un sistema de bajo costo para monitorear los macronutrientes NPK en el suelo del cultivo de piña.

- Diseñar un sistema de medición y monitoreo de bajo costo que cumpla con las necesidades especificadas por los agricultores, utilizando tecnologías innovadoras de bajo costo para mejorar la producción y la eficiencia en los cultivos.
- Implementar prototipos del diseño en campo con el fin de recoger información acerca de la facilidad de uso y el funcionamiento del diseño mediante capacitación a los usuarios y comparación con el método utilizado por los agricultores actualmente. En este objetivo se brindó acompañamiento en el uso de los prototipos a los agricultores.
- Adaptar el diseño del sistema de monitoreo para su implementación final en el cultivo de piña, teniendo en cuenta los resultados de la capacitación y pruebas del prototipo.
- Evaluar a través de una encuesta el funcionamiento del sistema final durante un periodo de prueba a cargo de los agricultores. En este objetivo no hay acompañamiento a los agricultores.

2.4. Marco Teórico

2.4.1. Generalidades del Cultivo de Piña

La piña es una fruta tropical perteneciente al grupo de las Bromelias, originaria de la Amazonia y conocida también como Ananás Comosus por su nombre científico. Esta fruta altamente comercial forma parte de las cuatro principales frutas tropicales del mundo, ya que ocupa el segundo lugar en esta clasificación [19]. La piña se produce principalmente en Costa Rica, Filipinas, Tailandia y Ecuador. Esta fruta tiene una gran demanda a nivel mundial debido a sus propiedades nutricionales beneficiosas para una dieta saludable, así como a su bajo precio en comparación con otras frutas tropicales. Existen múltiples variedades de piña producidas en todo el mundo, cada una de las cuales tiene diferentes propiedades nutricionales y requisitos de producción.

Variedades

En todo el mundo se conocen tres variedades botánicas principales de la planta de piña tropical, estas son: Sativus, que no tiene semillas; Comosus, que tiene la capacidad de formar semillas capaces de germinar; y Lucidus, que permite una recolección más fácil del fruto debido a que sus hojas no tienen espinas.

Además, estas variedades se dividen en subvariedades, algunas de las cuales se emplean en los cultivos de nuestro país. Entre las más destacadas se encuentran: Cayena Lisa, Perolera, Manzana y Gold MD2.

- **Cayena Lisa:** esta variedad de piña se caracteriza principalmente por tener un tamaño mediano, hojas largas y anchas de color verde oscuro, así como una forma peculiar ovalada y gruesa. Además, presenta características brácteas (escamas) generalmente en tonos marrón tostado cobrizo. La Cayena Lisa tiene una pulpa de tonalidades amarillas, un excelente sabor dulce suavemente acidulado y un olor aromático. Es importante destacar que esta variedad debe ser recolectada en su punto óptimo para el consumo, ya que no madura fuera de la planta [20]. Ver figura 2.1



Figura 2.1: Piña Cayena Lisa

- **Perolera:** esta es la variedad de piña más común en el país. Se caracteriza por el gran tamaño de la planta, con hojas cortas y medianas de color verde oscuro, así como por sus bordes lisos y generalmente por su forma casi cúbica. Además, presenta características brácteas (escamas) en tonos generalmente anaranjados y amarillos tostados. La Piña Perolera también es conocida por el color amarillo de su pulpa, muy similar al amarillo de sus brácteas. Esta variedad se utiliza ampliamente en la agroindustria debido a su alto contenido de jugo [21]. Ver figura 2.2



Figura 2.2: Piña Perolera

- **Manzana:** esta variedad es una modificación de la variante Perolera, la cual no tiene espinas en sus hojas. Al igual que la variante anterior, se caracteriza por el gran tamaño de la planta, y en este caso también por el reducido tamaño de sus hojas y el distintivo color verde grisáceo de las mismas. Además, comparte una forma y tamaño similar a la Perolera, así como brácteas (escamas) en tonos rojos oscuros y amarillos. A diferencia de las otras variantes, esta variedad tiene una pulpa de color amarillo un poco más opaco que las demás, y es menos tolerante a la manipulación y el transporte [20]. Ver figura 2.3



Figura 2.3: Piña Manzana

- **Gold MD2:** esta variante también es conocida como piña Gold, Golden u Oro miel en algunas partes del país. Se destaca principalmente por su dulce sabor, ya que contiene una mayor concentración de azúcares que otras variedades, lo cual le otorga un buen sabor y aroma. Al mismo tiempo, es conocida por el tamaño pequeño y mediano de sus hojas. Aunque el fruto de esta variante es más pequeño en comparación con otras, su tamaño uniforme y el color amarillo brillante tanto de sus brácteas (escamas) como de su pulpa le otorgan una gran aceptación a nivel mundial para su consumo [20]. Ver figura 2.4



Figura 2.4: Piña Gold MD2

Eco-fisiología

La eco fisiología de la piña se refiere a las formas en que la planta de la piña, una fruta tropical, se adapta a su entorno para sobrevivir y prosperar. Las plantas de piña son nativas de América del Sur y están adaptadas para crecer en ambientes cálidos y húmedos con mucha luz solar [22].

Las plantas de piña también pueden tolerar una amplia gama de tipos de suelo, incluidos suelos arenosos y arcillosos. Pueden crecer tanto en suelos ácidos como alcalinos, y pueden tolerar altos niveles de sal en el suelo. Esto les permite crecer en una variedad de entornos diferentes.

Otros aspectos importantes relacionados con la eco-fisiología de la planta de piña es su capacidad para tolerar la sequía. Pues la planta obtiene la mayor parte de su agua y nutrientes del suelo, pero también puede absorber humedad y nutrientes a través de sus hojas, lo que se conoce como absorción foliar. Las plantas de piña pueden almacenar agua en sus hojas,

lo que les permite sobrevivir durante largos períodos de tiempo sin agua. Por otra parte, sus sistemas de raíces poco profundas, les permite absorber rápidamente el agua y nutrientes que están presentes en el suelo [22]. Las plantas de piña pueden tolerar temperaturas de hasta 38°C, lo que les permite crecer en ambientes tropicales cálidos. También son capaces de tolerar altos niveles de luz, que es necesaria para la fotosíntesis y el crecimiento.

En general, la eco-fisiología de la piña implica una serie de adaptaciones que permiten que la planta tolere la sequía, las altas temperaturas y una amplia gama de tipos de suelo. Estas adaptaciones permiten que las plantas de piña crezcan y produzcan frutos en una variedad de ambientes diferentes sin garantizar la calidad del fruto.

2.4.2. Fertilización

El proceso de fertilización es quizás el más importante en la agricultura actual, ya que en gran medida la productividad del cultivo y la calidad de los frutos dependen de este [1]. Este proceso debe realizarse con cuidado especial, ya que una mala gestión de los fertilizantes podría afectar tanto el desarrollo del cultivo como la economía del agricultor. El proceso consiste en aplicar la cantidad necesaria de nutrientes al cultivo para ayudarlo a tener un mejor rendimiento. Para lograrlo, es necesario contar con el conocimiento previo del estado nutricional del cultivo, ya que los tipos de fertilizantes y los planes de fertilización dependen de la presencia de nutrientes en el suelo del cultivo.

Importancia de la fertilización

El constante incremento de la población mundial en los últimos años se ha convertido en un constante reto para la agricultura, puesto que ahora es necesario proporcionar una cantidad mayor de alimentos conservando la calidad. Para cumplir con el reto de incrementar la producción agrícola y poder abastecer la población en crecimiento, existen dos opciones posibles: aumentar las superficies de cultivo o proporcionar fuentes de nutrientes adicionales a los suelos.

Esta última opción se puede llevar a cabo mediante el uso de fertilizantes minerales, cuya aplicación racional se ha demostrado [1] que su uso contribuye en el incremento de las producciones agrícolas y, por consiguiente, en la producción de alimentos y fibras, ya que los fertilizantes proveen nutrientes que los cultivos necesitan.

En definitiva, la importancia de la fertilización en los cultivos se basa en que esta asegura la calidad y productividad de los cultivos, evita tener que incrementar las superficies cultivadas para suplir las necesidades alimenticias y por último su aplicación controlada aporta a la sostenibilidad del suelo [23].

Macronutrientes

Los tres principales macronutrientes que requieren la gran mayoría de cultivos para su óptimo desarrollo son el Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Cada uno de estos aporta al desempeño de diferentes propiedades de los cultivos como por ejemplo la coloración, el tamaño y sabor de los frutos, el desarrollo de raíces y tallos fuertes, entre otros. A continuación, se explica cómo afectan estos macronutrientes a los cultivos:

- **Nitrógeno:** el Nitrógeno juega un papel clave en el desarrollo de las plantas. Aporta al crecimiento de tallos y brotes, además de incrementar la producción de frutos y follaje, debido a que influye en la formación de aminoácidos, purinas y pirimidinas, y se utiliza en funciones de regulación [24]. Sin embargo, cuando hay un exceso de este nutriente, se crea una relación desequilibrada entre hojas y tallos que debilita a la planta, la hace vulnerable a enfermedades y modifica el sabor de los frutos [25].
- **Fósforo:** el Fósforo resulta importante en la composición del ADN y el ARN de las plantas. Forma parte de los ácidos nucleicos y de los lípidos de las membranas [24]. Por lo tanto, este nutriente contribuye a la producción de brotes, raíces, floración y lignificación. La ausencia de fósforo en el suelo retrasa el crecimiento y la expansión de las raíces, lo que ocasiona un subdesarrollo de las plantas y frutos pequeños. El exceso de este nutriente puede bloquear la absorción de micronutrientes como el calcio, hierro, magnesio, cobre y zinc, que garantizan un buen fruto [25].
- **Potasio:** este mineral desempeña un papel importante en las actividades fisiológicas de las plantas. Participa en el mantenimiento de la homeostasis, el transporte, la señalización y los procesos metabólicos de las plantas [24]. El potasio contribuye al aumento del tamaño de los frutos y mejora su sabor. También influye en el color y fragancia de las flores. Otra importante contribución del potasio es su capacidad para brindar resistencia a plagas y enfermedades en las plantas. Sin embargo, un exceso de potasio puede causar deficiencias en la absorción de micronutrientes como el calcio o el magnesio, los cuales son importantes para tener un fruto de calidad y proteger de enfermedades a la planta [25].

2.4.3. Antecedentes

Los procesos actuales para medir los macronutrientes presentes en los cultivos se basan principalmente en el análisis químico de muestras tomadas de diferentes áreas del cultivo y enviadas a un laboratorio. Sin embargo, la medición in situ y/o en tiempo real de nutrientes se está volviendo cada vez más importante para reducir costos y acelerar los análisis nutricionales realizados en los cultivos. Algunas investigaciones se han dedicado a desarrollar

prácticas que permitan medir el NPK y otras propiedades importantes de formas diferentes a las convencionales, facilitando así la medición in situ en diversos cultivos. A continuación, se presentan algunas de las investigaciones que persiguen objetivos similares a los propuestos en este trabajo:

- En 2017, Masrie y otros [26] proponen el desarrollo de un transductor óptico para medir y detectar la presencia de nutrientes NPK en el suelo. Para determinar los valores de NPK lo hacen mediante la absorción de luz de cada nutriente, en donde el transductor óptico se implementa como un sensor de detección que consta de tres LED como fuente de luz y un fotodiodo como detector de luz. Este sistema utiliza un microcontrolador Arduino para el control de la fuente de luz y la pantalla LCD. Además, permite la recolección y análisis de los datos para saber la cantidad de nutrientes que se agregará al suelo para aumentar su fertilidad. Utilizar un transductor óptico para medir y detectar la presencia de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en el suelo es un enfoque potencialmente viable ya que el uso de la absorción de luz para medir ciertos componentes químicos es una técnica común en varios campos. Sin embargo, el éxito de este sistema dependerá de varios factores, como la precisión y sensibilidad del transductor óptico, la calidad de los LED y el fotodiodo utilizado y el rendimiento del microcontrolador Arduino (lo cual a su vez incrementa el costo de producción). Lo que nos hace descartar esta opción ya que no se cumplirían algunos de los requerimientos (costo y facilidad de uso) del sistema.
- En 2017, Shylaja y Veena [27] implementaron un sistema para agricultura de precisión que permitía monitorear los valores de los nutrientes N, P y K a través de una aplicación móvil que mostraba los valores de NPK y daba recomendaciones de fertilización al agricultor. El sistema consiste en el uso de un probador de fertilidad del suelo con el cual calculaban los valores de NPK en función de la salida del probador. Los autores transmitieron los datos del voltaje de deflexión analógica, después de ser digitalizado en un microcontrolador, a una base de datos en la nube. El sistema fue capaz de presentar el estado de NPK al agricultor y al mismo tiempo dar sugerencias por medio de la aplicación. La implementación de una red de sensores inalámbricos para monitorear de forma remota la fertilidad del suelo y proporcionar recomendaciones para fertilizantes y cultivos tiene el potencial de ser una herramienta útil para los agricultores. El uso de la tecnología IoT para recopilar información en tiempo real sobre las condiciones del suelo y proporcionar recomendaciones para mejorar la fertilidad del suelo puede ayudar a los agricultores a tomar decisiones más informadas y potencialmente aumentar el rendimiento agrícola. Sin embargo, el éxito de este sistema dependerá de varios factores, como la precisión y confiabilidad de los sensores utilizados, el desempeño de la red inalámbrica y la efectividad del sistema de software para analizar los datos del

suelo y brindar recomendaciones. También será importante considerar el costo y la viabilidad de implementar dicho sistema, así como los posibles desafíos o limitaciones.

- En 2018, Sánchez [12] desarrolló un método indirecto para estimar nivel de Nitrógeno presente en el suelo basado en algoritmos de aprendizaje de máquina entrenado a partir de observaciones de los parámetros presentes en el suelo de conductividad eléctrica, humedad y temperatura, para así poder correlacionar estos parámetros a diferentes niveles de NPK. Estos parámetros fueron medidos con sensores comerciales. El desarrollo de un sistema para monitorear y medir los niveles de Nitrógeno en el suelo utilizando algoritmos y sensores de aprendizaje automático puede ser una herramienta útil para optimizar el rendimiento de los cultivos y minimizar las pérdidas. Los métodos indirectos para medir los niveles de Nitrógeno pueden proporcionar mediciones in situ en tiempo real a un costo menor y con menos dependencia de las condiciones del suelo en comparación con los métodos directos. Sin embargo, el éxito de este sistema depende de diversos factores, como la precisión, el rendimiento de los algoritmos de aprendizaje automático y la disponibilidad de datos suficientes para entrenar y validar el modelo. También será importante considerar el costo de implementar y mantener dicho sistema.
- En 2018, Masrie y otros [28] diseñaron un sensor óptico integrado que detectaba los principales nutrientes del suelo Nitrógeno, Fósforo y Potasio cuyo principio de funcionamiento se basaba en la ley de Beer-Lambert. El diseño se basó en el uso de diodos LED que emitían luz hacia una muestra de tierra contenida en un recipiente transparente que se encontraba sobre un fotodiodo. Este elemento se encargaba de percibir la luz emitida por los LED que atravesaba la muestra de tierra. Los resultados obtenidos muestran que el sensor óptico fue capaz de detectar los macronutrientes y además se obtuvo una relación significativa entre la luz emitida y las muestras de NPK tomadas de diferentes terrenos. La implementación de un sensor óptico para detectar la presencia y la intensidad de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en el suelo tiene enfoque viable. Tanto usar la absorción de luz para medir la concentración de estos nutrientes, como el utilizar un LED y fotodiodos como parte del sistema sensor son un enfoque común. A pesar de ello, el éxito de este sistema dependerá de factores, como la precisión y la sensibilidad del sensor, el rendimiento de los circuitos de acondicionamiento y amplificación de la señal y la eficacia del software utilizado.
- En 2018, Ghanshala y otros [29] proponen un sistema de riego automático enlazado a un sistema de monitoreo de nutrientes, temperatura, y la humedad del suelo y aire. El sistema consta de paneles solares, nodos sensores (cada nodo de sensor es una colección de sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de humedad del aire, sensor de pH del suelo y un sensor NPK METOS con Arduino como unidad de procesamiento), un módulo inalámbrico Zigbee, un motor y rociadores de agua. Todo el sistema está

conectado de forma inalámbrica y por medio del módulo ESP8266Wi-Fi, los datos son enviados a un nodo de sincronización o la puerta de enlace, después los datos recopilados del nodo de sincronización se envían a la nube a través de Internet. Una vez en la nube, los datos son analizados y pueden ser accedidos por el agricultor a través de una aplicación Android. Dependiendo de la información arrojada por el informe, el agricultor puede monitorear el crecimiento de su cultivo y el nivel de nutrientes del suelo. El sistema propuesto implica el uso de sensores para medir varios parámetros del suelo, como los niveles de nutrientes, la humedad y la temperatura. Los algoritmos de aprendizaje automático se utilizan para analizar los datos y proporcionar información útil a los agricultores, como recomendaciones para fertilizantes y riego. Este sistema tiene el potencial de mejorar el rendimiento de los cultivos y la utilización de los recursos, pero su éxito dependerá de factores como la precisión y confiabilidad de los sensores, el rendimiento de la red inalámbrica y la efectividad de los algoritmos de aprendizaje automático.

- En 2020, Rani y Ganeshkumar [18] proponen un sistema IoT que permite medir los nutrientes presentes en el suelo y basado en esto enviar una alerta vía SMS al agricultor sobre la cantidad de fertilizante que se utilizará durante el cultivo. El sistema cuenta con el diseño de un sensor NPK que hace la detección de nutrientes basado en el principio colorimétrico y en la ley de Lambert utilizando 4 diodos de luz (LED) de diferentes colores, una resistencia dependiente de la luz (LDR) y cuatro resistencias más. El dispositivo, también incluye una unidad de microcontrolador, un sistema de análisis basado en reglas difusas para decidir las proporciones de NPK en el suelo y un sistema de información automatizado por medio de SMS. El análisis de datos del sensor NPK se realiza por medio del método de computación de borde que permite que el análisis de datos se haga a través de internet en un servidor para permitir tener un dispositivo de menor tamaño en campo. El sistema propuesto utiliza colorimetría y lógica difusa para detectar deficiencias de nutrientes en el suelo y brindar recomendaciones para fertilizantes. Este enfoque se usa comúnmente en IoT agrícola. Sin embargo, el éxito depende de factores como la sensibilidad del sensor NPK y la precisión, el rendimiento de la red inalámbrica y la base de datos en la nube, y la eficacia de los algoritmos de lógica difusa.
- En 2020, Madhumathi [2] y otros desarrollaron un sistema de agricultura de precisión el cual tomaba mediciones de los nutrientes NPK y otros aspectos importantes de los cultivos como el pH, la temperatura y la humedad que luego almacenaban en la nube. Posteriormente mostraba al agricultor a través de una aplicación móvil el estado de las variables medidas y recomendaciones para la irrigación y fertilización del cultivo. Para realizar las mediciones hicieron uso de sensores y probadores comerciales. En el

caso de la medición de NPK utilizaron un probador de fertilidad de suelo analógico y un conversor análogo digital, los valores de NPK se obtenían a partir de la medición del probador, para cada nutriente se aplicaba una fórmula en función de la medición del probador. En conclusión, el sistema diseñado cumplió con la finalidad de medir las variables de humedad, temperatura, pH, N, P y K in situ y en tiempo real. Con esta información, se pudieron dar recomendaciones a los agricultores para optimizar la producción de sus cultivos. El uso de una aplicación móvil para el análisis de datos y recomendaciones para fertilizantes y riego es un enfoque común en el campo del IoT agrícola. Sin embargo, el éxito de este sistema dependerá de varios factores, como la precisión y confiabilidad de los sensores utilizados, el rendimiento de la red inalámbrica y la base de datos en la nube, y la efectividad de los algoritmos de software para analizar e interpretar los datos de los sensores.

- En 2021, M. Khaydukova y otros [24] propusieron un sistema multisensorial potenciométrico para la cuantificación simultánea de los tres macronutrientes N, P y K. El sistema conformado por 26 sensores potenciométricos fue capaz de estimar cuantitativamente tanto el NPK como el pH y la conductancia eléctrica de las muestras de suelo. Se construyó un modelo para cada parámetro. Los valores de los parámetros fueron estimados mediante los métodos tradicionales de análisis de suelos. Enfatizaron que la principal ventaja del sistema propuesto fue la sencillez y rapidez del procedimiento de medición, pues el análisis puede realizarse en el campo y no requiere de reacciones químicas. El desarrollo de un sistema multisensor potenciométrico como se describe en el pasaje tiene el potencial de ser un enfoque viable para determinar simultáneamente los niveles de Nitrógeno, Fósforo y Potasio en muestras de suelo. Se demostró que el sistema tiene una alta correlación con los parámetros específicos y pudo medir con precisión estos nutrientes, junto con el pH y la conductividad, en una breve duración de la medición de solo 8 minutos. Además, el procedimiento no requirió el uso de ningún reactivo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la viabilidad de cualquier sistema como este depende en última instancia de una variedad de factores, incluida la disponibilidad de recursos y financiamiento para el desarrollo, los desafíos técnicos involucrados en la creación e implementación del sistema y la demanda potencial de dicho sistema en el mercado.
- En 2021, Archana y otros [30] proponen el diseño de un interferómetro de Michelson en un solo chip, el cual tiene una estructura opto-electromecánica monolítica en donde todos los componentes se disponen de forma intrínseca con la ayuda de la litografía. Este proceso permite evitar la desalineación entre los componentes del interferómetro que pueden deteriorar el rendimiento. Resaltan que el uso de la espectroscopia para el análisis del suelo es un método analítico económico, rápido, ecológico, no destructivo y

reproducibile. Además, mencionan que el uso de la espectroscopia permite un proceso más rápido, rentable y no destructivo a diferencia de los métodos convencionales. El objetivo del sistema propuesto es desarrollar un método rentable y fiable para analizar la fertilidad del suelo in situ, utilizando espectroscopia infrarroja y sensores ópticos basados en nanomateriales. Este sistema podría ayudar a los agricultores y productores agrícolas a optimizar la fertilización y mejorar el rendimiento de los cultivos, y podría ser una valiosa adición para los pequeños y medianos agricultores de todo el mundo. Para tener éxito, el sistema deberá considerar varios factores, incluido el costo, la experiencia del usuario y la precisión. Será importante mantener los costos del instrumento y sus consumibles lo más bajo posible, y diseñar el instrumento para que sea fácil de usar y comprender. Garantizar la precisión y la confiabilidad del instrumento también será fundamental y probablemente requerirá pruebas y optimización exhaustivas.

Finalmente, se tuvo la oportunidad de analizar y evaluar los diferentes métodos de detección de nutrientes NPK recopilados anteriormente. Después de considerar los requisitos establecidos para el sistema, se decidió que la mejor opción era desarrollar una sonda de medición utilizando el método de conductividad eléctrica y una red de sensores inalámbricos. Esta sonda sería calibrada mediante técnicas de linealización y/o interpolación utilizando un sensor comercial de alta precisión. Esta solución representaba una mejora en comparación con los métodos descritos anteriormente, ya que permitía obtener una mayor precisión al utilizar un sensor comercial para la calibración, en lugar de depender de una ecuación que requería un valor objetivo y solo proporcionaba resultados cualitativos sobre el estado de NPK del suelo. Además, la solución propuesta no requería técnicas complejas como la espectroscopia o la colorimetría mencionadas por otros autores.

2.4.4. Sensores comerciales

- **Probador de NPK digital:** consiste en un kit de tres sondas, una para cada macronutriente, para realizar mediciones instantáneas de NPK. Cada sonda cuenta con una pantalla LCD iluminada donde se visualiza el valor de la medición. Estos instrumentos están diseñados para pruebas rápidas ya que está programado para apagarse automáticamente pasados 5 minutos después de apretar cualquier botón. El rango de medición es de 0 a 1999 mg/Kg con una resolución de 1 mg/Kg y una precisión de $\pm 2\%$ F.s, además no necesita calibración dado que ya viene calibrado de fábrica [31]. El precio de estos probadores está entre COP\$ 1'800.000 a COP\$ 2'500.000. Este rango se obtuvo de tiendas como Amazon [32], Alibaba [33] y Aliexpress [34].
- **Sensor de NPK de suelo:** es un sensor de suelo portable diseñado para medir simultáneamente los parámetros NPK. Este es quizá el sensor más completo para apli-

caciones de agricultura de precisión pues su diseño facilita la conexión con sistemas de IoT, como los sistemas LoRa debido a su señal de salida en estándar RS485. Tiene un rango de medición de 0 a 1999 mg/Kg con una precisión de $\pm 2\%$ F.s. Además, cuenta con el protocolo de protección IP68 por lo cual está diseñado para ser usado por largo periodos en el campo bajo tierra [35]. Los precios de este sensor varían entre los COP\$ 300.000 a COP\$ 850.000. Este rango se obtuvo de páginas como Amazon [13], Alibaba [14], Aliexpress [15], ebay [16] y del fabricante Weihai Jingxun Changtong Electronic Technology Co [35].

- **Kit de prueba de suelo:** consiste en un kit que permite hacer mediciones rápidas de NPK de muestras de suelo, hay de tipo analógico y digital. El principio de funcionamiento se basa en una reacción química, pues el kit viene con 10 cápsulas que deben aplicarse a cada muestra de tierra para realizar las mediciones. Luego de aplicada la cápsula a la muestra de tierra la solución formada tomará un color y dependiendo del color se establecen los rangos en que se encuentran los nutrientes los cuales van desde exceso hasta empobrecido [36]. Este tipo de kit requiere de al menos tres pruebas para un solo cultivo. El precio de este kit está entre COP\$ 90.000 a COP\$ 160.000. Este rango se obtuvo de tiendas como Amazon [37], ebay [38] y mercado libre [39].

2.4.5. Programación extrema XP

La programación extrema (XP) es una metodología cuyo objetivo es mejorar la calidad del software generado y de esta forma hacer que este sea más adaptable a cambios. Este está compuesto por valores, principios y prácticas que buscan priorizar tanto las necesidades del usuario y las del cliente, fomentando y la colaboración.

El método de programación XP fue desarrollado para tener un enfoque flexible para el desarrollo de software, enfocándose principalmente en la entrega de software de forma rápida y regular. Implica dividir el proceso de desarrollo en partes pequeñas y manejables, e iterar en cada pieza hasta que esté completa. Lo cual permite una retroalimentación constante, lo que a su vez ayuda a garantizar que el producto cumpla con las necesidades del cliente.

Los valores fundamentales de XP incluyen la simplicidad, la comunicación, la retroalimentación, el coraje y el respeto. Estos valores guían el proceso de desarrollo y dan forma a la forma en que los miembros del equipo interactúan entre sí y con el cliente.

Los principios de XP incluyen:

- El cliente siempre está disponible. Esto significa que el cliente está involucrado en el proceso de desarrollo de principio a fin, brindando retroalimentación y orientación según sea necesario.

- El equipo se autoorganiza. Esto significa que los miembros del equipo son responsables de organizar su propio trabajo y tomar decisiones sobre cómo satisfacer mejor las necesidades del cliente.
- El equipo trabaja en iteraciones cortas. Esto significa que el equipo divide el proceso de desarrollo en partes pequeñas y completa cada parte en un período corto de tiempo (generalmente dos semanas o menos).
- El equipo refina continuamente sus procesos. Esto significa que el equipo evalúa y mejora constantemente su enfoque de desarrollo para hacerlo más eficiente y eficaz.
- El equipo se enfoca en entregar software que funcione. Es decir que el equipo se enfoca principalmente en la creación de software funcional sobre otras consideraciones.

En general, la programación extrema está basada en la noción de que al enfocarse en las necesidades del cliente y del usuario final, y al promover la colaboración continua entre los miembros del equipo, es posible desarrollar software de alta calidad de una manera más eficiente[40].

2.4.6. Red de sensores inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son redes compuestas por varios dispositivos que se encargan de monitorear variables de interés de una zona y transmitirla a una estación de control [41], estos dispositivos se comunican entre sí de manera inalámbrica. Las WSN se componen de dos elementos importantes, los nodos sensores encargados de la obtención y transmisión y un nodo gateway encargado del almacenamiento y procesamiento. En la figura 2.5 se ilustra la arquitectura de una WSN donde se diferencian los nodos sensores y el nodo gateway.

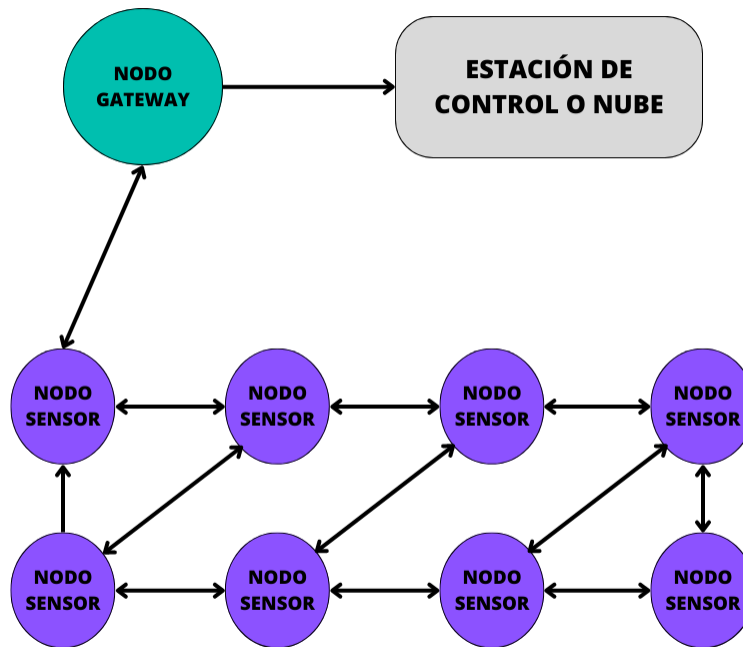


Figura 2.5: Arquitectura de una red de sensores inalámbricos. Elaboración propia

Las WSN frecuentemente son muy utilizadas en proyectos y aplicaciones de IoT. En el caso de la agricultura de precisión este tipo de arquitectura para la obtención y transmisión de datos resulta muy útil debido a la implementación poco invasiva y la fácil cobertura de áreas extensas.

Materiales y métodos

3.1. Descripción Cultivo de Piña

El cultivo de piña de esta propuesta está ubicado en la vereda Quinamayó, a las afueras de Santander de Quilichao. El terreno para el proyecto de monitoreo de nutrientes NPK tiene una superficie de 3696 metros cuadrados, con dimensiones de 132 metros de largo por 28 metros de ancho. En este terreno se encuentran sembradas 500 plantas de piña de la variedad MD2 Gold, también conocida como piña oro miel en la zona. Este cultivo es un ejemplo ideal para analizar los niveles de Nitrógeno, Fósforo y Potasio presentes en el suelo y en las plantas.

El cultivo se encuentra a una altitud de 1.079 metros sobre el nivel del mar, lo que le proporciona un clima fresco y húmedo, ideal para el crecimiento de esta planta tropical. Además, se encuentra a una distancia aproximada de 218 metros de la casa familiar de Rusbelt Palomino, lo que facilita el acceso al cultivo para el cuidado y mantenimiento del sistema de monitoreo implementado.

El cultivo fue sembrado en julio de 2022, lo que significa que, al momento de tomar las primeras muestras, las plantas de piña se encontraban en pleno crecimiento y desarrollo, próximas a llegar a la etapa de floración, en la cual la planta de piña requiere una mayor cantidad de nutrientes. A través de la recolección de datos y análisis en este cultivo, se determinó si se requería algún tipo de fertilizante adicional o cambios en el manejo del suelo para garantizar un óptimo crecimiento y producción de piña. Además, los investigadores de esta propuesta esperan que los resultados puedan replicarse en otros cultivos de piña en la región, mejorando así la eficiencia y rentabilidad de la producción agrícola.

A continuación, en la Figura 3.1 se muestra la ubicación y la ruta del cultivo de piña desde la casa familiar de Rusbelt Palomino.

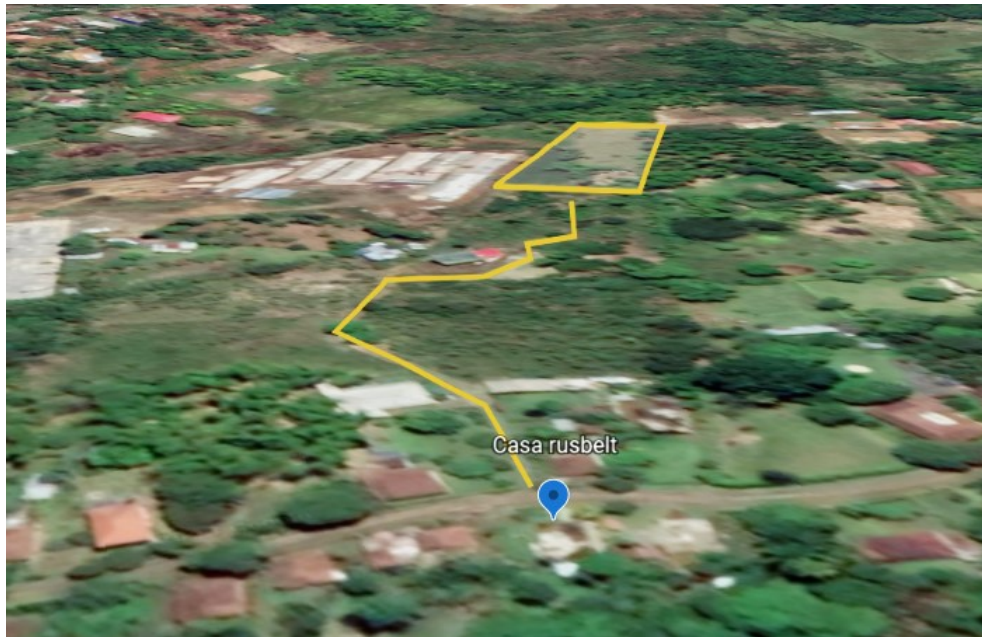


Figura 3.1: Imagen satelital ubicación cultivo de piña

3.2. Requerimientos

Con la información de las necesidades recolectada por medio de entrevistas a los agricultores y con la investigación previa se definen a continuación los requerimientos del sistema deseado.

3.2.1. Requerimientos funcionales

- El sistema debe realizar la medición de los nutrientes NPK del suelo por zonas del cultivo en unidades familiares para los agricultores.
- El sistema debe presentar la información mediante una interfaz móvil amigable al usuario.
- El sistema debe tener una base de datos con la que se pueda generar un histórico de las mediciones.

3.2.2. Requerimientos técnicos

- El sistema debe hacer uso de componentes de bajo costo de tal forma que sea asequible a pequeños y medianos agricultores.

- Se debe tener una alimentación independiente de la red eléctrica debido a los problemas de cobertura e inestabilidad presentes en el campo.
- Se debe evitar la conexión cableada entre los sensores debido a las largas distancia y posible invasión del cultivo.
- El sistema debe ser impermeable y resistente al polvo debido a la exposición a estos factores que tendrá en el cultivo.

3.3. Solución propuesta

Teniendo en cuenta la investigación realizada, las necesidades de los usuarios y los requerimientos definidos anteriormente, se concibió una idea base del sistema mediante la cual se realizó el proceso de diseño dividido por subsistemas. A continuación, se ofrece una breve descripción de cada uno de los subsistemas que se incluyeron en el sistema de monitoreo. La figura 3.2 presenta un diagrama que ilustra la relación de los subsistemas. Cabe aclarar que en esta sección se presenta una idea general de cómo debería funcionar y qué necesidades debía cumplir cada subsistema, teniendo en cuenta los requerimientos establecidos en la sección 3.2.

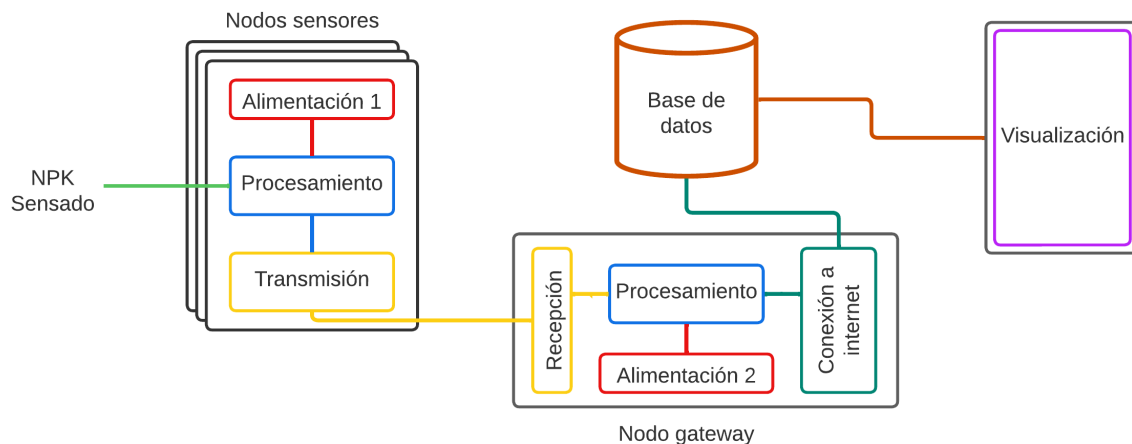


Figura 3.2: Diagrama de relación entre los subsistemas de la solución propuesta

3.3.1. Nodos sensores

Este bloque hace referencia a los sensores, los cuales se han dispuesto en varios puntos a lo largo del cultivo, de modo que se cuenta al menos con un sensor por cada zona. Cada Nodo sensor está compuesto por los bloques de alimentación 1, procesamiento y transmisión, los cuales se explican a continuación:

- **Alimentación 1:** este bloque representa la alimentación de cada sensor, es decir, cada sensor debe tener su propia fuente de alimentación y esta a su vez debe ser independiente de la red eléctrica.
- **Procesamiento:** en este bloque se condensa la adquisición, amplificación y transducción de la señal obtenida del suelo por lo cual contiene diferentes módulos que permitan realizar estos tres procesos.
- **Transmisión:** el bloque transmisión representa el módulo que permite la comunicación entre los nodos sensores y el gateway. Esta comunicación se realiza de manera inalámbrica, por lo cual el bloque es un módulo transmisor que permite enviar información a otro módulo receptor.

3.3.2. Nodo gateway

Es el punto de enlace de la red de sensores, este subsistema se encarga de recibir la información recolectada por los nodos sensores y almacenar esta información en una base de datos. El nodo gateway está conformado por los bloques de alimentación 2, recepción, procesamiento y conexión a Internet. Estos bloques se explican a continuación:

- **Alimentación 2:** este bloque representa la fuente de alimentación del gateway, este a diferencia del bloque alimentación 1, si puede hacer uso de la red eléctrica ya que se espera que el nodo gateway se instale en un lugar con cobertura de electricidad e Internet.
- **Recepción:** el bloque recepción representa el módulo o dispositivo encargado de recibir los datos transmitidos por los nodos sensores.
- **Procesamiento:** el bloque procesamiento del gateway es el encargado de procesar los datos recibidos de los sensores y realizar el enlace con la base de datos. Para que esto sea posible se necesita que este tenga conexión a Internet.
- **Conexión a Internet:** con este bloque se busca brindar acceso a Internet para que este pueda subir la información a la base de datos en la nube.

3.3.3. Base de datos

El subsistema base de datos se refiere al almacenamiento de los datos obtenidos por los sensores, dicho almacenamiento se sitúa en la nube por cual se utiliza una plataforma para proyectos de IoT que permita almacenar y gestionar información en la nube.

3.3.4. Visualización

El subsistema visualización representa la interfaz gráfica mediante la cual se le mostrarán los datos a los usuarios. Esta interfaz debe ser amigable y realizarse como aplicación móvil de forma que los agricultores puedan ver la información en sus celulares.

Para brindar una mayor claridad sobre la solución propuesta, se explica a continuación el flujo de datos del sistema para el caso de un nodo sensor.

El flujo de datos comienza con la señal obtenida del suelo, la cual se dirige al subsistema de procesamiento del nodo sensor. En este subsistema, la señal se amplifica, acondiciona, y posteriormente se calculan los valores de NPK. La información calculada de NPK se envía al subsistema de transmisión, para enviar los valores calculados al nodo Gateway.

En el nodo Gateway, la información primero llega al subsistema de recepción y luego se dirige al subsistema de procesamiento del nodo Gateway. Este último se encarga de organizar la información recibida de todos los nodos sensores. Una vez que toda la información está organizada, se envía al subsistema de conexión a Internet, el cual se encarga de subir la información a la base de datos.

Por último, desde la base de datos, la información se envía a la interfaz de visualización, donde podrá ser visualizada por los usuarios del sistema.

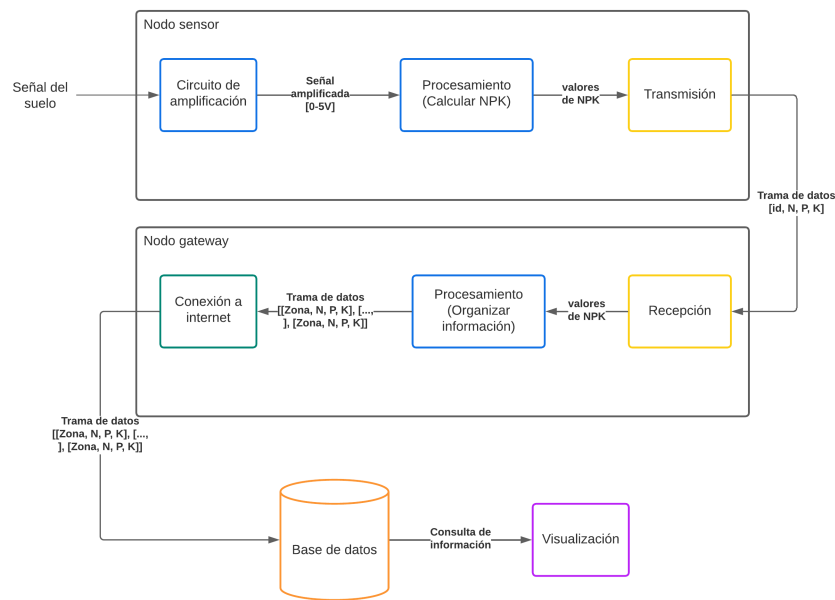


Figura 3.3: Diagrama de flujo de datos de la solución propuesta

3.4. Diseño de la red de sensores de NPK

El diseño de la red de sensores inalámbricos está basado en el diagrama de bloques de la figura 3.2. La red se compone de dos partes fundamentales: los nodos sensores y el nodo Gateway. En esta etapa, se llevó a cabo la búsqueda y selección de componentes que permitieran establecer la red de sensores cumpliendo con los requerimientos establecidos en la sección 3.2.

3.4.1. Diseño de nodos sensores

El diseño de las sondas NPK se llevó a cabo considerando diferentes principios, como la colorimetría, la electroquímica y la conductividad eléctrica. Sin embargo, después de evaluar las especificaciones propuestas anteriormente, se descartaron los dos primeros principios debido a su complejidad y altos costos. Basándose en esta evaluación, se propuso el diseño de una sonda que utilice el principio de conductividad eléctrica. Para lograr el diseño ideal de la sonda, se tuvieron en cuenta las siguientes características y partes:

- **Electrodos de medición:** son los componentes encargados de medir la diferencia de potencial del suelo entre ellos. Estos electrodos se colocan en el suelo y se conectan al

circuito de medición mediante cables aislados. Pueden estar fabricados con materiales como plata, cobre o acero inoxidable, y su tamaño y forma se determinarán en gran medida por las propiedades del suelo en cuestión.

- Circuito de procesamiento:** es responsable de procesar la señal obtenida de los electrodos para llevar a cabo los cálculos de NPK. Este circuito debe incluir un subcircuito que amplifique y filtre la señal de la medición, así como un microcontrolador que procese la señal y realice los cálculos necesarios para obtener las variables de interés. Para seleccionar los componentes adecuados del circuito de procesamiento, se consideraron diferentes criterios relacionados con los microcontroladores Arduino Pro Mini, Arduino Nano y ESP32. Los criterios que se tuvieron en cuenta son los siguientes: costos, tamaño, memoria flash, puertos, consumo de energía, consumo en modo reposo, frecuencia de reloj, conectividad a Internet y documentación. A continuación, en la tabla 3.1 se presentan las especificaciones de los tres microcontroladores que se evaluaron.

Criterios	Arduino pro mini	Arduino nano	Esp 32
Costo	\$ 43.982,40	\$ 27.000,00	\$ 27.499
Tamaño	1.8cm x 3.3cm	1.85cm x 4.32cm	2.2cm x 5,3 cm
Memoria flash	16KB	32KB	520KB
Puertos	29	26	38
Consumo	5mA	15 mA	50 - 80 mA
Consumo reposo	0.058mA	3.06mA	7uA
Frecuencia reloj	16MHz	16MHz	240Mhz
Documentación	Buena	Excelente	Excelente
Conexión a internet	Adaptable	Adaptable	Si

Tabla 3.1: Criterios y especificaciones de los microcontroladores

Teniendo en cuenta los criterios previamente definidos para la selección del microcontrolador, se asignaron pesos a cada uno de ellos, con el objetivo de realizar una evaluación que permitiera elegir el microcontrolador más adecuado para el diseño, de acuerdo con los requerimientos establecidos. Se decidió asignar los siguientes pesos a los criterios: costos (20%), tamaño (10%), memoria flash (5%), puertos (5%), consumo de energía (15%), consumo en modo reposo (10%), frecuencia de reloj (10%), conexión a internet (10%) y documentación (15%). También se definió que la evaluación se llevaría a cabo asignando valores entre 0 y 10 a cada criterio, donde 0 representa la calificación más baja posible y 10 la calificación más alta posible.

- Circuitos de transmisión y recepción:** estos circuitos son los responsables de la comunicación entre los nodos sensores y el nodo Gateway. Para los nodos sensores,

se requería un circuito capaz de transmitir de forma inalámbrica la información hasta el nodo Gateway, mientras que para el nodo Gateway se necesitaba un circuito que pudiera recibir las señales provenientes de cada uno de los nodos sensores.

Después de investigar sobre las posibilidades para lograr la comunicación inalámbrica, se encontraron tres opciones de módulos transceptores que, como su nombre indica, pueden desempeñar tanto la función de transmisión como la de recepción. Los módulos identificados son: el NRF24L01, el E32-433T20DT LORA SX1278 y el LORA RA-02 SX1278.

Para la selección del módulo transceptor más adecuado, se llevó a cabo una matriz de selección utilizando los criterios que se detallan en la tabla 3.2, junto con las respectivas especificaciones de los tres módulos.

Criterios	NRF24L01	E32-433T20DT LORA SX1278	LORA RA-02 SX1278
Costo	\$15,000	\$68,700	\$32,000
Tamaño	15 mm × 41 mm	21 mm × 36 mm	17 mm × 16 mm × 3,2 mm
Protocolo de comunicación	SPI	TTL	SPI
Frecuencia de operación	2,4 – 2,5GHz	410 – 525MHz	410 – 525MHz
Consumo TX	11,3 mA	106 mA	97 mA
Consumo Rx	12,3 mA	15 mA	12,15 mA
Consumo en reposo	900nA	4uA	1,6 mA
Sensibilidad	-85dBm	-147dBm	-141dBm
Documentación	Excelente	Regular	Buena

Tabla 3.2: Criterios de selección del transceptor

Para la evaluación de los módulos de comunicación se asignaron los siguientes pesos a los criterios definidos en la tabla 3.2: costo (20%), tamaño (15%), protocolo de comunicación (10%), frecuencia de operación (10%), consumo TX (5%), consumo RX (5%), consumo en reposo (10%), sensibilidad (10%) y documentación (15%). La evaluación se realizó asignando una calificación entre 0 y 10 a cada criterio, donde 0 representa la calificación más baja posible y 10 la calificación más alta posible.

- Alimentación:** la fuente de alimentación es responsable de suministrar energía a los componentes de cada nodo sensor. Para garantizar que la alimentación no dependa de la red eléctrica, se propuso el uso de baterías recargables. Para ello, se realizó un cálculo del consumo total del circuito completo de un nodo sensor, analizando el consumo de cada uno de los componentes. Con base en esta información, se seleccionó una batería que garantizó el correcto funcionamiento del sistema durante un periodo de tiempo de al menos tres días antes de requerir recarga. Sin embargo, esta solución aún depende de la red eléctrica para la recarga de las baterías, por lo cual en la sección 3.5 se propone

el diseño de un sistema de alimentación con mini paneles solares para recargar las baterías, con el cual se le brindó total independencia de la red eléctrica al sistema.

- **Caja protectora:** la caja es el elemento encargado de proteger del polvo y del agua los diferentes elementos que conforman los nodos sensores, considerando su ubicación en el campo. Se aseguró que la caja fuera impermeable y resistente a los diversos factores ambientales y externos, y se garantizó una buena durabilidad en el entorno del campo. Además, se diseñó la caja de tal manera que fuera fácil de abrir y cerrar, permitiendo acceder a los componentes internos del sistema durante los mantenimientos necesarios.

Para el diseño de la caja protectora, se propuso la creación de diferentes prototipos utilizando la impresión 3D. Además, se usaron materiales y técnicas de impresión 3D que garantizaban resistencia al agua y el polvo, y se utilizó también, un sellador de juntas que brindara impermeabilidad entre las bridas de las cajas.

Se muestra en la figura 3.4 un diagrama de bloques que ilustra los componentes y circuitos involucrados en los nodos sensores. Sin embargo, es importante destacar que este diseño se presentará con mayor detalle en el capítulo 4, junto con las respectivas conexiones entre los circuitos, una vez se haya realizado la selección de los componentes necesarios. Esto permitirá tener una visión más completa y precisa de cómo están conformados los nodos sensores en el sistema.

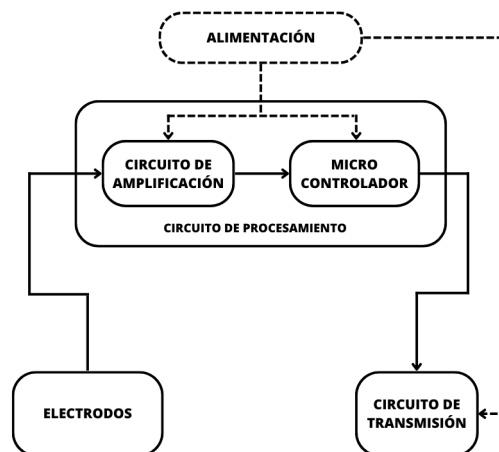


Figura 3.4: Diagrama de bloques de un nodo sensor

Adicionalmente, una vez que la sonda fue construida, se llevó a cabo el proceso de calibración. En este caso, se realizó una linealización utilizando la sonda NPK comercial de alta

precisión "Soil NPK Tester Meter RS485" del fabricante JXCT IOT, especialista en desarrollos tecnológicos enfocados en la agricultura de precisión. Las especificaciones técnicas de la sonda RS485 se aprecian en la tabla 3.3 y el sensor en la Figura 3.5.

Soil NPK Sensor Parameter	
Rango	0-1999mg/kg (ml/l)
Alimentación	12V-24V DC
Temperatura de operación	5-45°C
Humedad de trabajo	5-95% (Relative humidity)
Resolution	1mg/kg (ml/l)
Precisión	±2 %F.s
Señal de salida	RS485
Tasa de baudios	2400/4800/9600

Tabla 3.3: Especificaciones del sensor

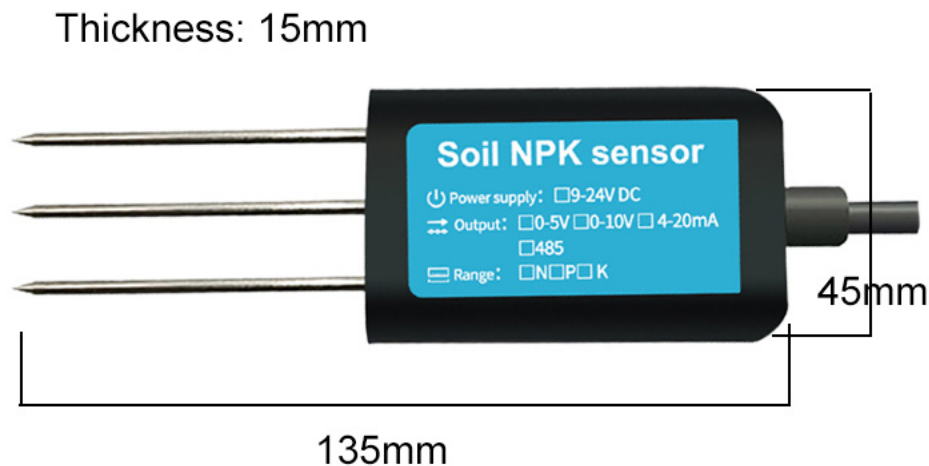


Figura 3.5: Soil NPK Tester Meter RS485 Precision Soil Fertility Nutrient tester for Agriculture

La calibración se realizó tomando muestras de tierra con diferentes niveles de NPK. Los resultados obtenidos fueron interpolados utilizando la técnica de spline cúbico para obtener una función dependiente de la diferencia de potencial entre los electrodos de la sonda para

cada macronutriente. Se garantizó que los valores obtenidos de las muestras de tierra se encontraran dentro de los rangos definidos por los agricultores para niveles de nutrientes “poco”, “mucho” e “ideal”. Por lo tanto, se incluyeron muestras de tierra en el rango “mucho”, otras en el rango “poco” y, por supuesto, muestras en el rango “ideal” para cada uno de los macronutrientes. Para asegurar esto, se definieron previamente los rangos para cada macronutriente utilizando la información proporcionada por los análisis de laboratorio de los agricultores, los cuales se pueden encontrar en el anexo 7.1.

De la información suministrada por los agricultores sobre los valores nutricionales recomendados para su cultivo se puede extraer la siguiente información importante sobre el NPK.

Parámetro	Nivel		
	Poco	Ideal	Mucho
Materia orgánica (%)	2 <	2 - 4	>4
Potasio (meq/100g)	0.2 <	0.2 - 0.4	>0.4
Fósforo (ppm)	10 <	10 - 25	>25

Tabla 3.4: Niveles recomendados de NPK

La información relacionada con los valores recomendados para NPK, obtenida del anexo 7.1, se resume en la tabla 3.4. Se hace referencia a la materia orgánica, que se expresa en porcentaje, así como al Potasio, que se mide en meq/100g, y al Fósforo, que se mide en ppm. Para calibrar el sensor con la sonda Soil NPK Tester, se realizaron conversiones de estos parámetros de la tabla 3.4 a las unidades utilizadas por la sonda NPK tester, que son Kg/mg.

Para el caso de Nitrógeno el cual viene dado como Materia orgánica en porcentaje (%) se realizó la conversión aplicando las siguientes ecuaciones, la cuales fueron suministradas por los agricultores:

$$NitrogenoTotal = \frac{MateriaOrganica(\%)}{20(\%)} \quad (3.1)$$

$$NitrogenoAsimilable = NitrogenoTotal \times 0,15 \quad (3.2)$$

$$NitrogenoAsimilable(ppm) = NitrogenoAsimilable \times 10000 \quad (3.3)$$

Una vez aplicadas las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, se obtiene el Nitrógeno asimilable en unidades de ppm, que es la medida de interés. Para convertir de ppm a mg/Kg, se establece que 1 ppm es igual a 1 mg/Kg, por lo tanto, el valor obtenido en ppm es el mismo en mg/Kg.

En el caso del potasio, que se encuentra en meq/100g, se utiliza la equivalencia de que 1 meq/100g es igual a 391 ppm para el potasio. Por lo tanto, al multiplicar los límites del potasio de la tabla 3.4 por 391, se obtienen los valores en ppm. Al igual que en el caso del nitrógeno, los valores en ppm serán los mismos en mg/Kg.

Por último, para el fósforo, que se mide en ppm, se aplica la equivalencia de que 1 ppm es igual a 1 mg/Kg. Por lo tanto, los rangos presentados en la tabla 3.4 se mantienen iguales en ambos casos, ppm y mg/Kg.

Los resultados de estas conversiones para los rangos de NPK se muestran en la tabla 3.5.

Macronutriente	Nivel		
	Poco	Ideal	Mucho
Nitrógeno (mg/Kg)	150 <	150 - 300	>300
Potasio (mg/Kg)	78 <	78 - 156	>156
Fosforo (mg/Kg)	10 <	10 - 25	>25

Tabla 3.5: Rangos de valores para los macronutrientes

3.4.2. Nodo gateway

Para el caso del nodo gateway el diseño necesita de cuatro componentes importantes los cuales se detallan a continuación:

- **Circuito de recepción:** el circuito de recepción, encargado de recibir los datos de cada uno de los nodos sensores, por tanto, como ya se había mencionado anteriormente para este circuito se hizo uso del módulo transceptor que se seleccionó para el circuito de transmisión de los nodos sensores.
- **Circuito de procesamiento:** el circuito de procesamiento del nodo gateway hace referencia al microcontrolador que se encarga de organizar los datos recibidos y realizar su almacenamiento en la nube, por lo cual este circuito debe tener conexión a Internet ya sea por medio de un módulo adaptable al microcontrolador o por un módulo interno. La selección de los componentes de este circuito también depende de la selección del microcontrolador de los nodos sensores, pues se utilizó el mismo para ambos dispositivos.

- **Alimentación:** la alimentación del nodo Gateway se ha considerado diferente de la de los nodos sensores. Se propuso que este dispositivo se encuentre bajo techo en un lugar cerca a las oficinas de los cultivos donde se pueda tener acceso a Internet vía Wifi. Por tanto, la alimentación del nodo Gateway considerada en la figura 3.2 como alimentación 2 fue una fuente de alimentación cableada. Sin embargo, para garantizar el funcionamiento del dispositivo en caso de alguna falla en la red eléctrica, la fuente de alimentación recarga una batería que funciona como fuente secundaria en caso de falla.
- **Caja protectora:** esta caja es la encargada de proteger los diferentes componentes que conforman al nodo gateway. Se garantizó que la caja sea resistente al polvo y que facilite la instalación en paredes o lugares cercanos a tomas de corriente.

Una vez que se realizó la selección y conexión de los componentes de los nodos sensores y del nodo Gateway, se procedió a programar los microcontroladores de ambos dispositivos para que realizaran sus respectivas tareas, tanto de forma independiente como en conjunto. Por ejemplo, en el caso de los nodos sensores, se programó para que realizaran el cálculo del NPK utilizando la función resultante de la interpolación por spline cúbico que se llevó a cabo. Por otro lado, en el caso del nodo Gateway, se programó para que estableciera la conexión a Internet y almacenara los datos recibidos de los nodos sensores en la nube.

Además, como parte de la tarea conjunta, se realizó la programación necesaria para establecer la comunicación entre los módulos transceptores, lo que permitió enviar la información recopilada por los nodos sensores hasta el nodo Gateway.

3.5. Diseño de alimentación independiente

Como se mencionó en la sección 3.4, se propuso el diseño de una fuente de recarga autónoma basada en mini-paneles solares para la alimentación de los nodos sensores. Con el objetivo de garantizar una alimentación independiente de la red eléctrica y un funcionamiento constante de los nodos sensores, se planteó la idea de recargar las baterías utilizando energía renovable proveniente del sol. La propuesta consiste en que los paneles solares conviertan la radiación solar captada en energía eléctrica, la cual se utilizará para recargar las baterías cuando sea necesario.

En esta etapa es importante considerar que los valores de NPK no tienen una variación significativa de un día a otro naturalmente, ya que las variaciones de los macronutrientes generalmente están relacionadas con la etapa en la que se encuentre el cultivo. Sin embargo, existen otros factores que podrían generar variaciones de un día a otro como por ejemplo, una fuerte lluvia que inunde el cultivo, un periodo de sequía o hasta incluso que alguien por

accidente agregue alguna sustancia al cultivo. Por tal motivo se considero necesario tomar una medición por día para cada zona.

Para el diseño, es necesario realizar la selección del panel solar que mejor se ajuste a las necesidades de consumo de los nodos sensores. Para ello, el primer paso es calcular el consumo total de energía del dispositivo. Para realizar este cálculo, se deben seguir los siguientes pasos:

Calcular el consumo de energía de cada módulo o componente que conforma el sistema de un nodo sensor. Esto se logra multiplicando la potencia por el total de horas de funcionamiento diario. La potencia se calcula multiplicando el voltaje de operación de cada componente por la corriente que consume. Es importante tener en cuenta que este cálculo se debe realizar tanto para el modo activo como para el modo de reposo (sleep) del sistema.

$$P(mW) = I(mA) * V \quad (3.4)$$

$$E(mWh/dia) = P(mW) * (Hora/dia) \quad (3.5)$$

Después de realizar el cálculo del consumo del sistema, se procede a seleccionar un panel solar que sea capaz de generar la energía necesaria para el correcto funcionamiento del nodo sensor. En el mercado existen diversas opciones de paneles solares con características variables, como tamaño, eficiencia, material y potencia. Como recomendación para la selección del mejor panel solar para el proyecto, se plantean los siguientes criterios de selección: costo, tamaño, tolerancia de potencia, eficiencia, potencia pico, coeficiente de temperatura y tipo de material. Se sugiere consultar las diferentes opciones disponibles y comparar al menos dos de ellas en base a estos criterios, para así seleccionar la mejor opción.

Una vez seleccionado el modelo de panel solar y teniendo en cuenta el consumo de energía del sistema, se procede a calcular el número de paneles solares necesarios para cumplir con el consumo requerido. Para realizar este cálculo, se aplica la siguiente ecuación:

$$N_T = \frac{E_T}{(HSP * P_G * P_P)} \quad (3.6)$$

En la ecuación 3.6, el término “ N_T ” se refiere al número de paneles necesarios, E_T representa la energía requerida por el sistema, “HSP” indica la cantidad de horas solares pico del peor mes del año (es decir, el total de horas de radiación solar que inciden en el lugar de trabajo durante el peor mes del año), “ P_P ” se refiere a la potencia pico del panel y “ P_G ” representa el factor de pérdidas del panel solar.

Una vez seleccionado el panel solar y realizado los cálculos necesarios, se procede a realizar la conexión de cada panel solar al circuito de alimentación de cada nodo sensor. Esta conexión se realiza en la entrada del módulo cargador de la batería, asegurando así que la energía generada por los paneles solares se utilice para cargar las baterías de los nodos sensores.

3.6. Base de datos en plataforma de IoT

Cuando se trata de proyectos de IoT y agricultura de precisión, es común utilizar bases de datos para almacenar información de las variables obtenidas. El objetivo es analizar y construir un historial de los datos recopilados. En la actualidad, muchas de estas bases de datos se encuentran en la nube debido a la facilidad de almacenamiento y consulta que ofrece, además de la amplia oferta de plataformas diseñadas para aplicaciones IoT.

Se realizaron consultas a varias plataformas y se consideró que algunas podrían adaptarse mejor a las necesidades de diseño de este proyecto. A continuación, se presentan las plataformas que se tuvieron en cuenta:

- **Blynk:** es una plataforma de IoT que permite conectar dispositivos a la nube, además de diseñar aplicaciones para controlar y supervisar estos dispositivos. Es una de las plataformas más populares debido a la facilidad que brinda a los usuarios para la creación de proyectos de IoT con poco código. Tanto grandes como pequeñas empresas hacen uso de esta plataforma para el desarrollo de sus proyectos, entre estas se encuentran empresas como Raypak, Texas Instrument, National Institutes of Health, Onicon, Arduino, entre otras. Blynk cuenta con diferentes planes dentro de los cuales incluye uno gratuito con funciones reducidas, las cuales van enfocadas en la exploración y creación de prototipos. Los planes pagos van hasta los \$500 dolares por mes y varían en los servicios que incluyen y las limitaciones de uso [42].
- **Firestore:** es una plataforma de Google pensada para el desarrollo de aplicaciones la cual se enfoca en ayudar a compilar y crear apps y juegos. Esta plataforma es utilizada por grandes empresas y aplicaciones como Duolingo, The New York Times, Gameloft, Trivago y entre otras. La ventaja de esta plataforma es que permite la integración con múltiples servicios de Google como Google Analytic, Google Ads, Google Play, autenticación de correo y redes sociales, entre otras. Esta plataforma ofrece dos planes de uso, uno gratis con acceso a todas las funciones, pero con límites establecidos por día y otra de pago totalmente configurable dependiendo de los servicios que se requieran.[43]
- **Arduino Cloud:** es un servicio de almacenamiento en la nube que ofrece la empresa Arduino enfocado en atender desarrollos de IoT a través del bajo uso de código. Arduino Cloud ofrece múltiples herramientas para el almacenamiento y tratamiento de datos

obtenidos de diferentes dispositivos, pues este permite la conexión desde cualquier lugar de gran cantidad de dispositivos como sensores, placas de desarrollo e incluso hasta dispositivos inteligentes. Además, Arduino Cloud ofrece la posibilidad de crear modernos tableros de visualización para el análisis de los datos cargados en la nube, cuenta con opciones que permiten realizar históricos de datos o mostrar los datos en tiempo real. Arduino Cloud maneja diferentes planes dentro de los cuales incluye uno gratis, pero con recursos muy limitados. Los planes pagos van desde 1.99 dólares hasta 19.99 dólares por mes y sus opciones varían en la cantidad de proyectos o tableros que se pueden crear, el uso de APIs, duración de retención de datos, capacidad de almacenamiento, opciones de compartir paneles, entre otras. [44]

Para realizar la selección de la base de datos que mejor se adaptara al proyecto, se recopilaron en la tabla 3.6 una serie de criterios considerados importantes para tomar la decisión. Debido a que la información relacionada con los criterios propuestos no era cuantitativa, los criterios se definieron en términos de “excelente”, “bueno” y “malo”.

Criterios	Firebase	Arduino Cloud	Blynk IoT platform
Facilidad de uso y configuración	excelente	bueno	excelente
Compatibilidad con otras plataformas y dispositivos	bueno	bueno	excelente
Escalabilidad y rendimiento	excelente	bueno	bueno
Flexibilidad y adaptabilidad a los diferentes requisitos del proyecto	excelente	bueno	bueno
Capacidad de gestión de datos y seguridad	excelente	bueno	bueno
Precios y disponibilidad de soporte y recursos.	bueno	bueno	bueno
Documentación	excelente	bueno	excelente

Tabla 3.6: Criterios de selección de la base de datos

Para la evaluación de las bases de datos, se asignaron los siguientes pesos a los criterios: facilidad de uso y configuración (20%), compatibilidad con otras plataformas (10%), escalabilidad y rendimiento (5%), flexibilidad y adaptabilidad a los diferentes requisitos del proyecto (10%), capacidad de gestión de datos y seguridad (5%), precios (20%), disponibilidad de soporte y recursos (10%), y documentación (20%). Además, se decidió otorgar una nota entre 1 y 3 para cada criterio, siguiendo la siguiente escala: 1 para malo, 2 para bueno y 3 para excelente.

3.7. Desarrollo de interfaz de visualización

Para llevar a cabo el diseño de la interfaz de visualización se empleó la metodología XP, la cual se enfoca en poner en primer lugar las necesidades del usuario. Teniendo en cuenta el requerimiento de la sección 3.2 se debe presentar la información de manera amigable al usuario. Esta metodología podría ser muy útil para desarrollar una interfaz que sea de fácil uso para los agricultores. Para llevar a cabo desarrollo de la interfaz, se propone seguir los siguientes pasos:

- Recolectar información de gustos y preferencias de los agricultores para iniciar el primer diseño.
- Generar un diagrama de casos de uso.
- Realizar un diseño inicial de la interfaz.
- Presentar el primer diseño de la interfaz a los agricultores.
- Realizar cambios y ajustes de ser necesarios.
- Presentar la segunda versión del diseño con cambios y ajustes realizados.
- Realizar cambios y ajustes de ser necesarios.
- Presentar la versión final de la interfaz.

Se planteó la idea de desarrollar una aplicación móvil como interfaz amigable para que los agricultores pudieran monitorear los valores de NPK de sus cultivos desde sus dispositivos celulares. Se propusieron dos opciones para el diseño de aplicaciones móviles: la primera consiste en utilizar la plataforma AppInventor del MIT, un entorno de programación visual e intuitivo que permite crear aplicaciones funcionales para dispositivos Android e iOS [45]. La segunda opción es programar la aplicación móvil utilizando la plataforma Android Studio y el lenguaje de programación Kotlin.

Para seleccionar la plataforma más adecuada para implementar la aplicación móvil de visualización, se consideraron los siguientes criterios de la tabla 3.7. Estos criterios nos ayudaron a elegir la plataforma que requería menos tiempo y complejidad para aprender a diseñar aplicaciones móviles y se definieron después de realizar estudios y pruebas en ambas plataformas.

Criterios	AppInventor	Android Studio
Tiempo estimado de documentación	4 horas	15 horas
Tiempo estimado de desarrollo	18 horas	25 horas
Necesidades de computo	PC con conexión a internet (es una plataforma online)	PC con 8 Gb de RAM, 4 Gb de espacio en disco y procesador Core i5 o similar

Tabla 3.7: Criterios de selección de la plataforma de desarrollo App movil

La evaluación se realizó con los siguientes pesos: tiempo estimado de documentación (35%), tiempo estimado de desarrollo (45%) y necesidades de cómputo (20%). Por otra parte, se asignó una nota entre 0 y 10 para cada criterio, siendo 0 la peor nota y 10 la mayor nota posible.

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los procesos de selección de componentes, construcción, pruebas y análisis de resultados. Estos procesos fueron llevados a cabo con el objetivo de desarrollar e implementar el sistema de acuerdo con los requerimientos establecidos. Se detallarán las etapas para la selección de componentes, así como los pasos seguidos durante la construcción del sistema. Además, se describirán las pruebas realizadas para evaluar el funcionamiento y rendimiento del sistema, así como el análisis de los resultados obtenidos.

4.1. Selección de componentes y plataformas

En esta sección se presenta la selección y la justificación de los diferentes componentes del sistema, así como de las plataformas utilizadas para la base de datos y la visualización. Cabe destacar que se realizó una exhaustiva investigación de las características técnicas y especificaciones de cada componente, así como una evaluación cuidadosa de las opciones disponibles con el fin de seleccionar los componentes más adecuados para el sistema deseado. La decisión final está basada en los requerimientos planteados y las necesidades de los usuarios. Se considero el precio como uno de los criterios más importantes para la selección de los componentes ya que el desarrollo de este proyecto fue financiado con recursos de los autores.

4.1.1. Dispositivos microcontroladores

Para la selección de los dispositivos del circuito de procesamiento, se consideraron en primer lugar los microcontroladores. Se tuvieron en cuenta los criterios de selección que se detallan en la tabla 3.1, así como los pesos ponderados asignados a cada criterio. Las calificaciones se presentan en la siguiente tabla. Estos criterios fueron establecidos con el objetivo de evaluar y comparar las opciones disponibles, con el fin de seleccionar el microcontrolador más adecuado para el sistema. En la tabla 4.1, se presenta la matriz de selección que se realizó para seleccionar el microcontrolador.

Criterios	Peso global (%)	Arduino pro mini	Arduino nano	Esp 32
Costos	20 %	6	10	8
Tamaño	10 %	10	9	6
Memoria flash	5 %	3	7	10
Puertos	5 %	8	7	9
Consumo	15 %	10	7	4
Consumo reposo	10 %	8	6	9
Frecuencia reloj	10 %	3	7	10
Documentación	15 %	8	10	10
Conexión a internet	10 %	8	8	10
Total	100 %	7,35	8,25	8,15

Tabla 4.1: Matriz de selección de los microcontroladores

- Justificación de selección Arduino nano:** es un dispositivo con un costo asequible y competitivo en comparación con otras plataformas similares. El Arduino Nano se destaca como una de las opciones más económicas para el proyecto. Además, la selección se justifica también porque es un dispositivo compacto, energéticamente eficiente, bien documentado y fácil de usar, que ofrece una amplia variedad de puertos, compatibilidad con diferentes protocolos y la capacidad de conectarse a Internet mediante un módulo de Wifi. Estos factores combinados garantizan la facilidad de escalamiento del microcontrolador en caso de que se necesiten implementar nuevas funciones. Por tanto, el Arduino Nano es la opción que más se adecúa para el proyecto. En la figura 4.1 se muestra el dispositivo.

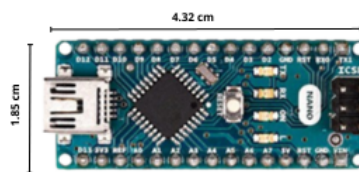


Figura 4.1: Arduino nano

Adicionalmente, como se mencionó en la sección 3.4, se tuvieron en cuenta dos módulos para la amplificación de la señal proveniente de los electrodos, los cuales fueron un módulo AD620 y un módulo HL-69. Se adquirieron ambos y se realizaron pruebas para tomar medidas con los electrodos y ver cuál de los dos módulos se adaptaba mejor a las necesidades que se tenían. Al hacer esto, se encontró el módulo AD620 a pesar de dar una buena amplificación de la señal necesitaba de un voltaje de operación mayor a 5V,

por lo cual se optó por trabajar con el módulo HL-69 (figura 4.2). Este modulo ya viene configurado para trabajar con los 5V del Arduino nano. Por tanto, el circuito escogido para la amplificación de la señal fue el módulo HL-69 que se muestra a continuación:



Figura 4.2: Modulo HL-69.

4.1.2. Dispositivos de transmisión y recepción

Al momento de elegir los dispositivos de transmisión y recepción, se tuvieron en cuenta tanto los criterios de selección descritos en la tabla 3.2 como los factores de importancia asignados a cada criterio. Ambos criterios se muestran en la tabla 4.2 con sus calificaciones correspondientes de 1 a 10.

Criterios	Peso global (%)	NRF24L01	E32-433T20DT LORA SX1278	LORA RA-02 SX1278
Costo	20 %	10	3	6
Tamaño	15 %	10	8	5
Protocolo de comunicación	10 %	10	8	10
Frecuencia de operación	10 %	10	5	5
Consumo TX	5 %	10	5	7
Consumo Rx	5 %	10	8	9
Consumo en reposo	10 %	10	8	5
Sensibilidad	10 %	6	10	9
Documentación	15 %	10	7	8
Total	100 %	9,6	6,6	6,85

Tabla 4.2: Matriz de selección de los dispositivos transmisión y recepción

- Justificación de selección del módulo NRF24L01:** Después de la evaluación de diferentes módulos de transmisión y recepción, se ha determinado que el módulo NRF24L01 es la mejor opción para cumplir con los requerimientos específicos del proyecto. Pues este módulo cuenta con un costo accesible, un tamaño compacto y un protocolo de comunicación RF fácil de utilizar y compatible con el Arduino nano. Opera en la frecuencia de 2.4GHz, banda estándar y comúnmente utilizada. Asimismo, cuenta con un bajo consumo de energía tanto en transmisión como en la recepción y en reposo. Adicionalmente, tiene una sensibilidad adecuada y cuenta con una amplia documentación disponible en línea, lo que facilita su implementación y mantenimiento.

to. En conclusión, se puede afirmar que el módulo NRF24L01 (figura 4.3) es la mejor opción para satisfacer los requerimientos del proyecto.



Figura 4.3: Módulo transceptor NRF24L01.

4.1.3. Dispositivos de alimentación independiente

Como se menciona en la sección 3.5 para la selección y desarrollo de sistema de alimentación independiente lo primero que se realizó fue el cálculo del consumo del sistema. Para llevar a cabo dicho cálculo, se tuvieron en cuenta los consumos de los componentes. A continuación, se presentan los datos de consumo de cada componente los cuales se calcularon usando las ecuaciones 3.5 y 3.6. Cabe aclarar que también se debe hacer uso de un módulo cargador de baterías, el cual se seleccionó el TP4056 por ser el módulo más usado para este tipo de proyectos y un módulo elevador de voltaje de 5V que permitió tener una correcta alimentación del Arduino nano.

Dispositivo	I (mA)	P (mW)	Hra/día	E (mWh/d)
Arduino nano	15	75	0.05	3.75
NRF24L01	11.3	37.29	0.05	1.8645
HL-69	35	175	0.05	8.75
TP4056	0.15	0.75	0.05	0.0375
DC-DC Boost	0.05	0.25	0.05	0.0125
			Total	14.41

Tabla 4.3: Consumo de los dispositivos en modo activo

Dispositivo	I (mA)	P (mW)	Hra/día	E (mWh/día)
Arduino nano	0.47	2.35	23.95	56.2825
NRF24L01	0.026	0.0858	23.95	2.05491
HL-69	0.4	2	23.95	47.9
TP4056	0.15	0.75	23.95	17.9625
DC-DC Boost	0.05	0.25	23.95	5.9875
			Total	130.18

Tabla 4.4: Consumo de los dispositivos en modo sleep

Tras realizar los cálculos presentados en las tablas 4.3 y 4.4, se determinó que el consumo total del sistema es de 144.59 mWh/día. Con esta información, se procedió a seleccionar una batería que pudiera brindar una autonomía de al menos 3 días antes de que fuera necesario recargar el nodo sensor. Se decidió utilizar una batería recargable 18650 de 3.7 V y 680 mAh, ya que tiene la capacidad de suministrar al menos 433.77 mWh, lo cual satisface ampliamente los requisitos de consumo y autonomía del sistema.



Figura 4.4: Batería recargable de 3.7 V 18650.

Una vez seleccionada la batería se necesitaba escoger el tipo de panel solar que se utilizaría para recargar la batería, para esto se consideraron dos opciones que se encontraron en el mercado cuyas características se muestran a continuación en la tabla 4.5:

Dispositivos		
Características	Panel Solar 5V - 100mA	Panel solar 5V 150mA
Costo	\$ 19,500	\$ 25,813
Tamaño	6 cm x 6 cm	12.3 cm × 5.5 cm
Potencia pico	0,5 W	0,75W
Tipo	Policristalino	Policristalino
Eficiencia	14 %	16 %
Coefficiente de temperatura	0.41 %/°C	0.48 %/°C

Tabla 4.5: Características de paneles solares

Luego de analizar las características se procedió a evaluar los dos paneles solares teniendo en cuenta los criterios descritos en la sección 3.5. Los resultados de la evaluación se muestran en la tabla 4.6.

Criterios	Peso (%)	Panel Solar 5V - 100mA	Panel solar 5V 150mA
Costo	30 %	10.0	7.0
Tamaño	20 %	10.0	6.0
Potencia pico	10 %	8.0	10.0
Tipo	20 %	10.0	10.0
Eficiencia	10 %	9.0	10.0
Coefficiente de temperatura	10 %	9.0	8.0
TOTAL	100 %	9.6	8.1

Tabla 4.6: Matriz de selección de los paneles solares

- Justificación de selección del panel solar:** al realizar la evaluación se obtuvo como mejor opción al panel solar de 5V y 100 mA, el resultado se debe a que este panel presenta un costo menor que el otro y su tamaño es más reducido. Estos aspectos fueron considerados importantes para este diseño en específico. Además, el coeficiente de temperatura del panel solar escogido es menor. Lo cual indica que este panel tenderá a tener menos pérdidas de potencia en relación con el otro. A continuación, el panel seleccionado se muestra en la figura 4.5.

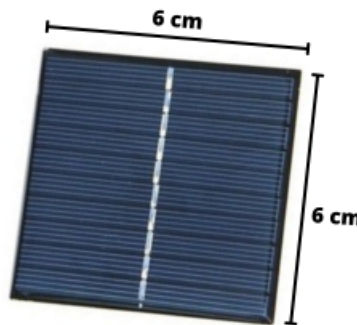


Figura 4.5: Panel solar 5 V – 100 mA.

4.1.4. Plataforma IoT para el almacenamiento

Para la selección de la plataforma de IoT, siguiendo el resumen de características presentado en la tabla 3.6, se realizó la evaluación de las tres opciones tal como se indicó en la sección 3.6. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 4.7.

Criterios	Pesos globales (%)	Firestore	Nube arduino	Plataforma IoT Blynk
Facilidad de uso y configuración	20	3	2	3
Compatibilidad con otras plataformas y dispositivos	10	2	2	3
Escalabilidad y rendimiento	5	3	2	2
Flexibilidad y adaptabilidad a los diferentes requisitos del proyecto	10	3	2	2
Capacidad de gestión de datos y seguridad	5	3	2	2
Precios	20	2	2	2
Disponibilidad de soporte y recursos	10	2	2	2
Documentación	20	3	2	3
TOTAL	100	2,9	2,2	2,7

Tabla 4.7: Matriz de selección de la base de datos.

- Justificación de la selección:** la mejor opción para implementar la base de datos que necesitaba este proyecto fue Firestore, la plataforma que ofrece Google. Esta selección se justifica en la facilidad de uso, la flexibilidad y adaptabilidad que brinda la herramienta para las necesidades del proyecto. Además, un factor importante fue el acceso a documentación de la plataforma que se tiene, lo cual facilitó aprender a trabajar con esta herramienta, pues Google ofrece una amplia documentación y guía de uso. Por otra parte, se consideró la mejor opción ya que para los requerimientos del proyecto en cuanto consultas y nuevos registros el plan “spark”, que es gratis y se adapta perfectamente.

4.1.5. Plataforma para la interfaz de visualización

La selección de la plataforma para la visualización mediante una aplicación móvil se realizó siguiendo lo planteado en la sección 3.7, donde se especificó como se diseñó el proceso de evaluación de las dos alternativas que se tenían para realizar el diseño de la aplicación móvil. A continuación, en la tabla 4.8 se presenta los resultados obtenidos de dicha evaluación.

Criterios	Peso (%)	AppInventor	Android Studio
Tiempo estimado de documentación	35 %	10	6
Tiempo estimado de desarrollo	45 %	9	7
Necesidades de computo	20 %	10	6
TOTAL	100 %	9,55	6,45

Tabla 4.8: Matriz de selección de la plataforma de diseño de la APP.

- **Justificación de la selección:** Tras realizar la evaluación de las dos opciones disponibles para el diseño de la interfaz de visualización, se concluyó que la plataforma AppInventor del MIT era la mejor opción para el desarrollo de este proyecto. Esta decisión se basó en nuestra experiencia limitada en el diseño de aplicaciones móviles, lo cual nos llevó a considerar como prioritario seleccionar una plataforma que nos permitiera desarrollar la interfaz en el tiempo establecido y con la menor complejidad posible. Después de analizar ambas plataformas, los resultados de la evaluación indicaron que AppInventor nos permitiría ahorrar más tiempo en comparación con la otra plataforma, además de no requerir un equipo de cómputo con altas prestaciones para el desarrollo de la aplicación.

4.2. Construcción de dispositivos

En esta sección se presenta el proceso de construcción de los dispositivos que conforman el sistema de monitoreo, es decir, los nodos sensores y el nodo Gateway. Una vez seleccionados los componentes que se utilizaron, se definieron las conexiones entre ellos y se realizaron pruebas de funcionamiento de los subsistemas. Además, se presenta el diagrama de bloques de la Figura 4.6 y las conexiones del sistema con los componentes y subsistemas definidos detalladamente. Además, se incluyeron los diseños de las placas de circuito impreso (PCB) y el resultado final de las construcciones.

4.2.1. Diagrama del sistema con componentes

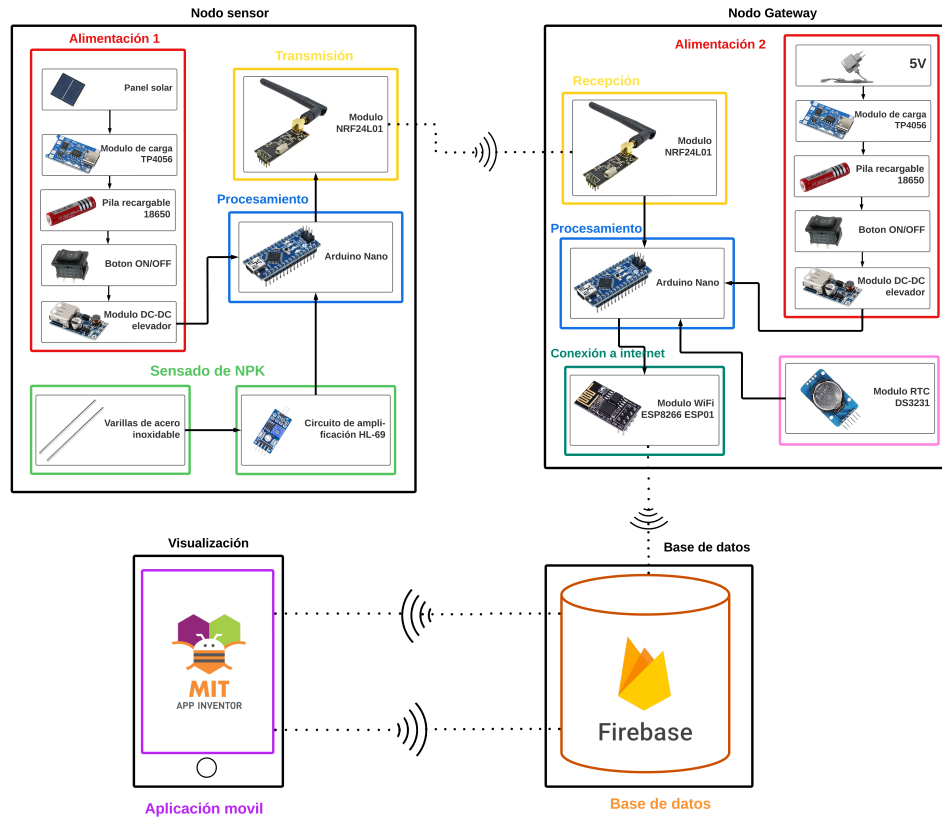


Figura 4.6: Diagrama del sistema detallado.

4.2.2. Montajes y pruebas en protoboard

Calibración de sonda

Para iniciar con la construcción de los nodos sensores lo primero que se realizó fue la calibración de la sonda, para la cual se utilizó el sensor Soil NPK Tester Meter RS485. El proceso consistió en tomar mediciones en diferentes muestras de tierra con el fin de evaluar cada uno de los niveles descritos en la tabla 3.5. En total se realizaron mediciones en 25 muestras de tierra, algunas de estas muestras fueron sobre abonadas con abono Triple 15 de la marca Forza.

Para realizar las mediciones, fue necesario implementar las conexiones entre el sensor NPK Tester y un Arduino nano a través de un módulo convertidor de RS485 a TTL, como tam-

bién las conexiones entre la sonda, con el módulo de amplificación y el Arduino nano. A continuación, en la figura 4.7 se presentan las conexiones realizadas:

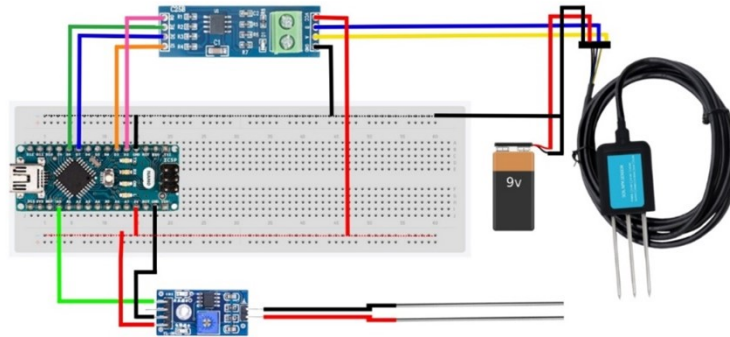


Figura 4.7: Diagrama de conexiones para calibración de la sonda. Elaboración propia.

Una vez realizado el montaje del circuito anterior se realizaron las mediciones considerando diferentes terrenos y muestras de tierra con diferentes cantidades de abono (figura 4.8). Al final se tuvieron en cuenta 25 mediciones para realizar la calibración de nuestra sonda para los nodos sensores, los resultados de estas mediciones se presentan a continuación en la tabla 4.9.



Figura 4.8: Medición de NPK en diferentes muestras de tierra.

Donde las columnas de los valores de NPK corresponden a las mediciones del sensor NPK meter tester y la columna “Valor Sonda (V)” corresponde al voltaje obtenido con la sonda diseñada por los autores. Las gráficas de las mediciones se observan en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11.

Muestra	Valor N (mg/Kg)	Valor P (mg/Kg)	Valor K (mg/Kg)	Valor sonda (V)
1	1	0	0	3,58
2	6	2	3	3,28
3	20	6	11	2,99
4	38	13	19	2,88
5	62	22	31	2,61
6	76	27	38	2,47
7	83	32	41	2,40
8	91	35	45	2,33
9	107	38	53	2,31
10	119	42	59	2,27
11	134	47	65	2,25
12	154	51	72	2,15
13	163	58	82	2,05
14	172	63	86	1,97
15	201	71	100	1,89
16	231	82	117	1,78
17	243	90	128	1,64
18	255	99	144	1,42
19	271	105	154	1,32
20	287	112	163	1,23
21	302	118	172	1,15
22	318	124	182	1,00
23	336	131	191	0,91
24	352	137	200	0,79
25	368	143	210	0,61

Tabla 4.9: Mediciones de NPK para 25 muestras de tierra.

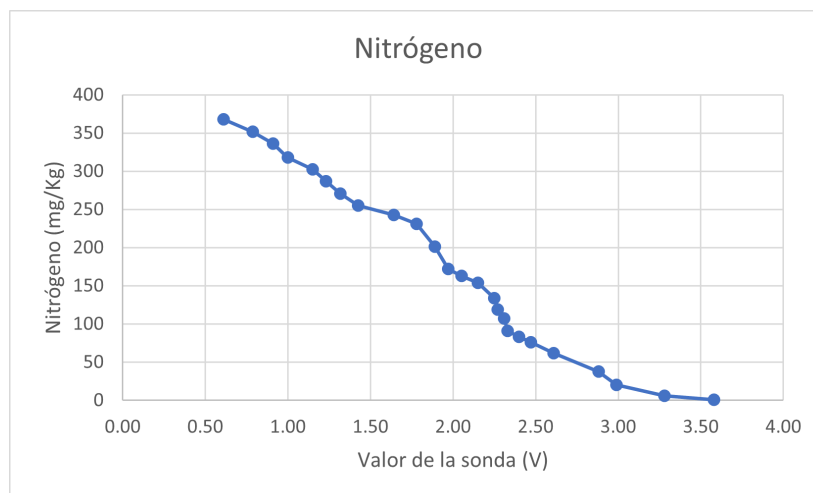


Figura 4.9: Medición de N en diferentes muestras de tierra

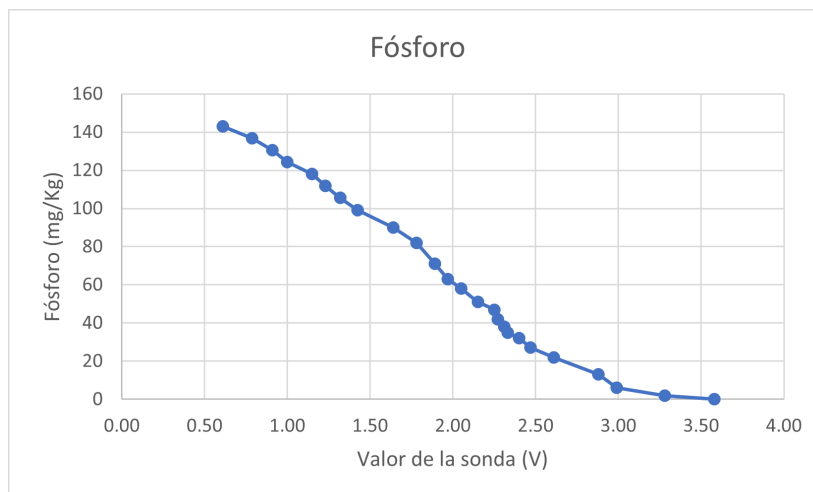


Figura 4.10: Medición de P en diferentes muestras de tierra.

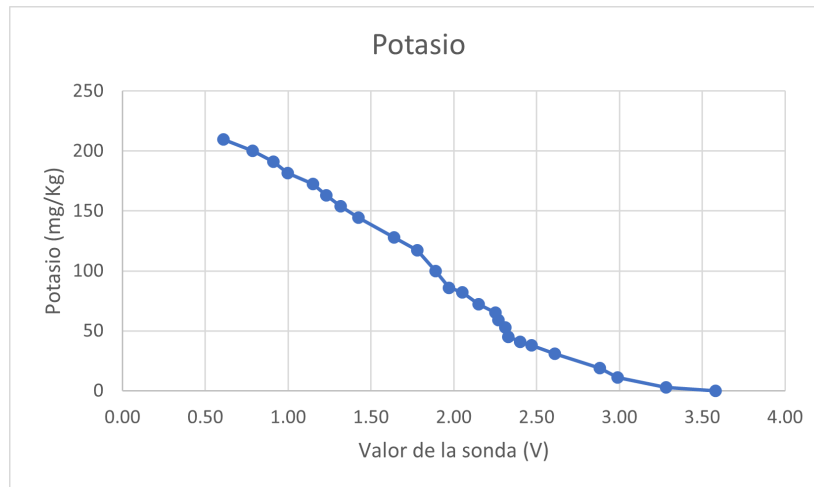


Figura 4.11: Medición de K en diferentes muestras de tierra.

Luego de tener los resultados de las mediciones, se realizó la interpolación de los datos utilizando un spline cúbico el cual es una función por trozos que permite la interpolación de dos puntos consecutivos con el fin de obtener una función que permitiera calcular los niveles de NPK en función del voltaje captado por la sonda. Se decidió usar la técnica de spline cubico ya que proporciona un ajuste muy preciso de los puntos y su cálculo no representa un trabajo complejo. Para realizar el cálculo del spline cúbico para cada nutriente se utilizó la herramienta Matlab, en la cual se creó el script del Anexo 7.2. Las gráficas de la interpolación para el Nitrógeno, Fósforo y Potasio se encuentran a continuación en las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 respectivamente.

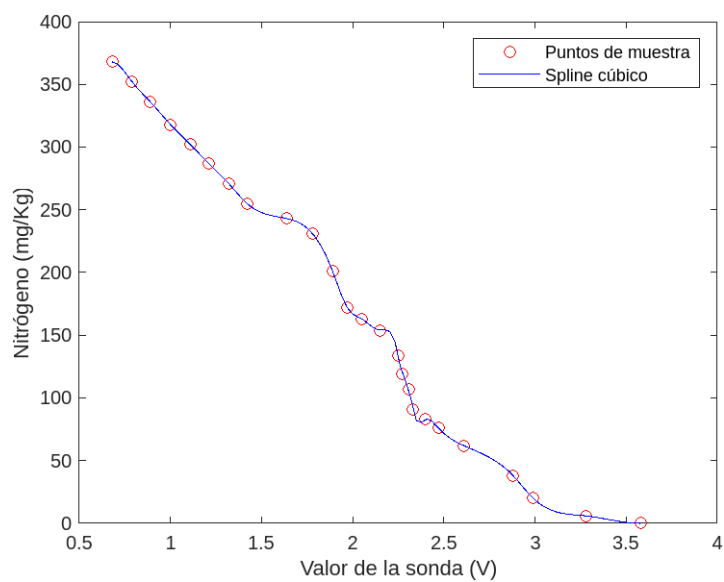


Figura 4.12: Gráfica de spline cúbico para medición de Nitrógeno.

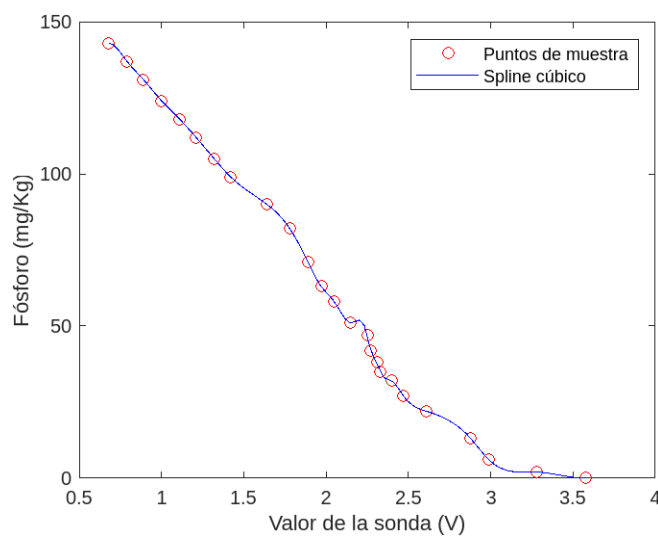


Figura 4.13: Gráfica de spline cúbico para medición de Fósforo.

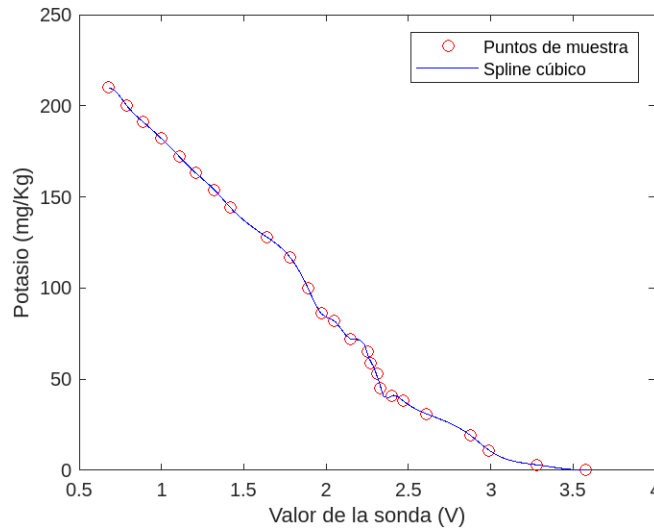


Figura 4.14: Gráfica de spline cúbico para medición de Potasio.

Con ayuda del script realizado se logró obtener los coeficientes de los polinomios, lo cuales permitieron reconstruir las funciones a trozos para cada uno de los nutrientes (N, P y K). Las funciones fueron utilizadas en el código con el que se programó el Arduino Nano de cada nodo sensor. Los coeficientes y funciones a trozos realizadas se encuentran en el Anexo 7.7. Teniendo en cuenta las 25 muestras que se tuvieron para el resultado del spline cúbico, se obtuvo una función a trozos definida en 24 intervalos para cada uno de los nutrientes.

Conectividad de la red de sensores

Para la red inalámbrica de sensores se diseñó una red de 5 canales, uno para cada sensor. Esta red cuenta en total con 6 nodos, de los cuales cinco corresponden a los nodos sensores que actúan como transmisores y uno al nodo Gateway que actúa como receptor. El tener 5 canales permite que el nodo Gateway reciba datos de todos los sensores al mismo tiempo y no se tengan problemas de interferencias entre los datos que envían los nodos sensores, pues cada dirección hace referencia a un camino y no a un dispositivo. En la figura 4.15 se ilustra el diseño de la red con las direcciones que se le asignaron a cada uno de los canales.

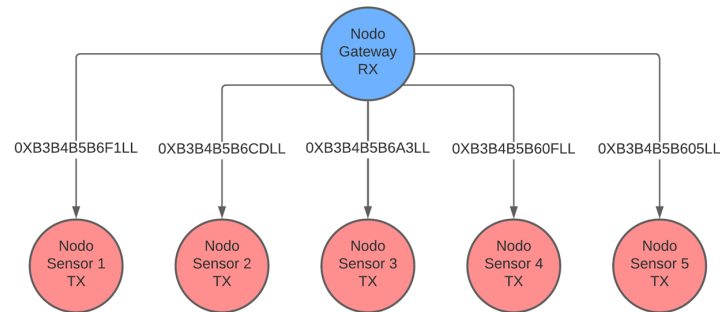


Figura 4.15: Diagrama de la red de sensores inalámbricos. Elaboración propia.

Una vez realizado el diseño de la red se procedió a realizar el montaje en protoboard y la programación de los circuitos de comunicación para la realización de pruebas de la red. Es importante aclarar que las direcciones de la Figura 4.15 no corresponden a la identificación de los nodos sensores, sino más bien al camino por el cual cada nodo va a transmitir datos. El ID de cada nodo se asigna mediante código y se decidió usar los números entre 1 y 5, definiendo que el nodo sensor de la zona 1 del cultivo tenga el ID 1, el nodo sensor de la zona 2 tenga el ID 2 y así para cada una de las zonas. Los códigos realizados para la comunicación inalámbrica se encuentran en los scripts 7.7 y 7.8, los cuales contienen la programación para los nodos sensores y el nodo Gateway, respectivamente. A continuación, la figura 4.16 presenta el diagrama de conexiones entre los módulos de comunicación NRF24L01 y el Arduino Nano.

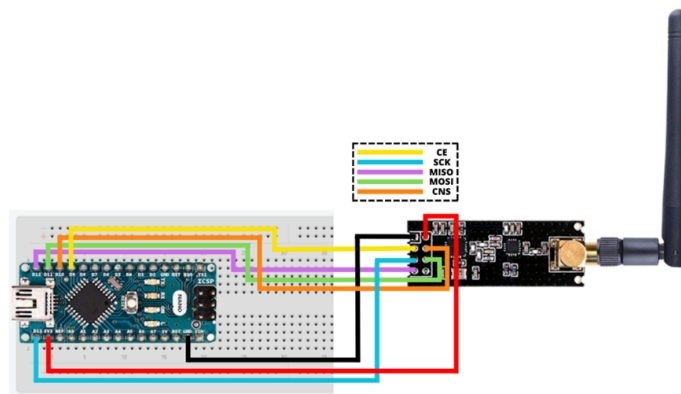


Figura 4.16: Diagrama de conexión entre Arduino nano y módulo NRF24L01. Elaboración propia.

Base de datos

Durante la implementación de la base de datos, se utilizaron dos componentes de la plataforma Firebase: Realtime Database y Firestore Database. El componente Realtime Database se empleó para almacenar y visualizar los datos en tiempo real. La integración de este componente resultó sencilla debido a las librerías disponibles en Arduino, las cuales permiten almacenar información en Firebase con pocas líneas de código. Además, AppInventor facilita la lectura de datos de este componente mediante sus bloques de funciones diseñados específicamente para trabajar con Firebase.

Por otro lado, se utilizó el componente Firestore Database para organizar de manera más eficiente el histórico de datos. Este componente ofrece la capacidad de realizar consultas que facilitan la visualización del histórico de datos a través de una interfaz web. En consecuencia, se desarrolló el documento HTML del anexo 7.5 que permite leer dicho histórico desde la aplicación desarrollada en AppInventor utilizando el componente VisorWeb.

De esta manera, la combinación de Realtime Database y Firestore Database en la implementación de la base de datos permitió tanto la visualización en tiempo real como el acceso ordenado al histórico de datos.

En la figura 4.17 se muestra la estructura de la base de datos del componente Realtime, la cual consiste en una estructura jerárquica NoSQL, la cual inicia con el nombre del cultivo, este elemento inicial se descompone en zonas y cada zona contiene los valores Nitrógeno, Fósforo y Potasio.



Figura 4.17: Estructura de la base de datos en Realtime Database

La base de datos del componente Firestone por su parte es de tipo NoSQL también, pero esta en cambio es una base de datos de documentos. La estructura de esta base de datos se

muestra en la figura 4.18. Esta base de datos se compone de documentos que representan las fecha de cada día, es decir cada día se crea un documento nuevo el cual se nombra con la fecha del día. Cada documento contiene la información de NPK de cada una de las zonas del cultivo.

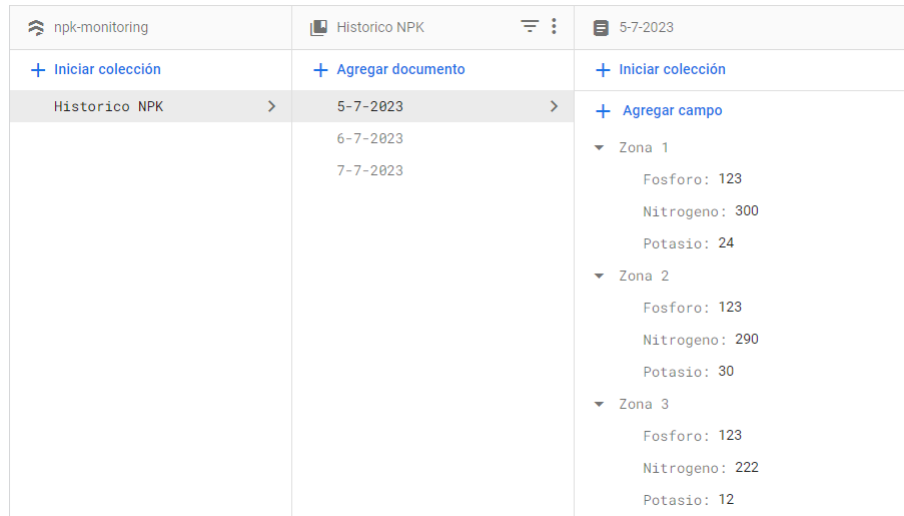


Figura 4.18: Estructura de la base de datos en Firestore Database

4.2.3. Diseño de PCBs

Luego de realizar las diferentes pruebas en protoboard de los subsistemas se procedió a realizar los diseños de los circuitos impresos (PCBs) para el nodo Gateway, los nodos sensores y el circuito de amplificación de la sonda. Para esta tarea se utilizó el software Proteus 8.9 el cual permitió realizar el diseño, generar los archivos Gerber y el modelo 3D de las placas. A continuación, las figuras 4.19, 4.20 y 4.21 muestran los resultados obtenidos del diseño de PCBs. El esquemático y el modelo 3D de las placas se encuentran en el anexo 7.3.

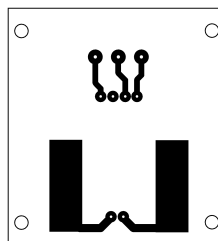


Figura 4.19: Diseño de PCB de la sonda

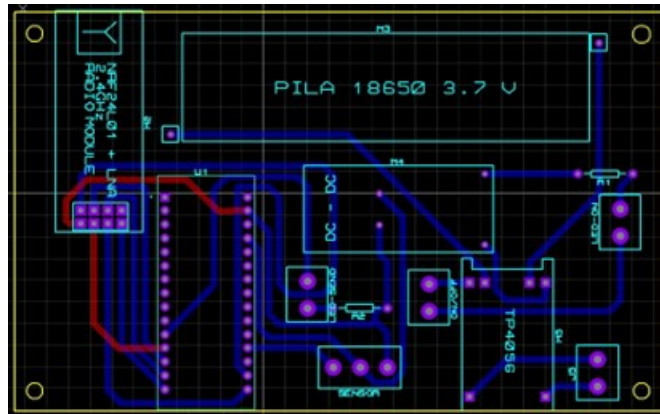


Figura 4.20: Diseño de PCB del nodo sensor

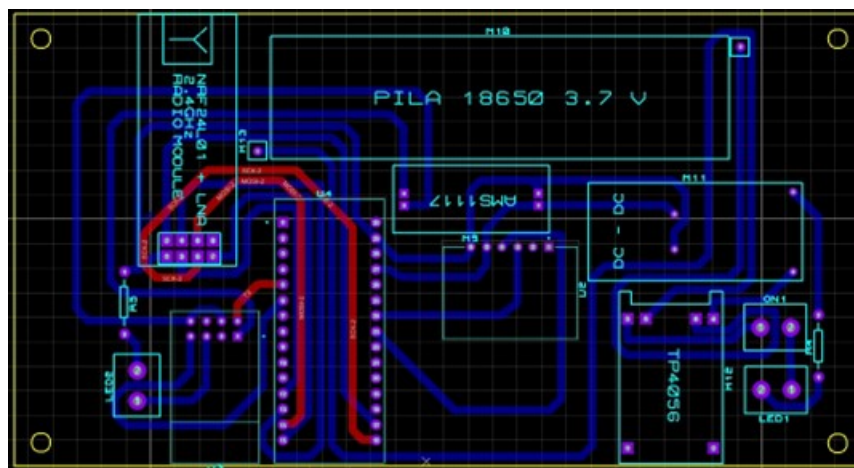


Figura 4.21: Diseño de PCB del nodo Gateway

Luego de finalizar el diseño de las PCBs del nodo sensor y del nodo gateway, se procedió a enviar los archivos de fabricación a la empresa china JLCPCB para su producción. Además, la placa del circuito de amplificación de la sonda fue elaborada por los autores. Una vez recibidas las PCBs, se llevó a cabo el montaje y la soldadura de los componentes en cada una de ellas. En las figuras 4.31, 4.23 y 4.24 se presentan los resultados obtenidos después de completar el proceso de fabricación y montaje.

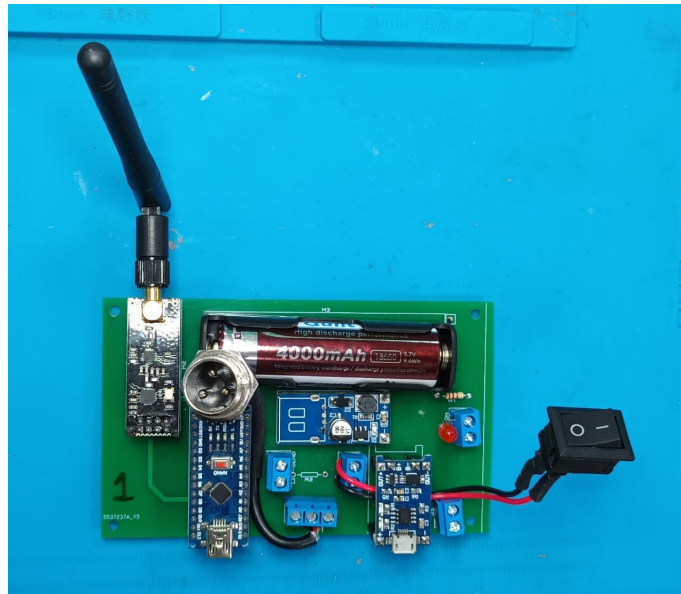


Figura 4.22: Montaje de componentes en PCB de un nodo sensor.

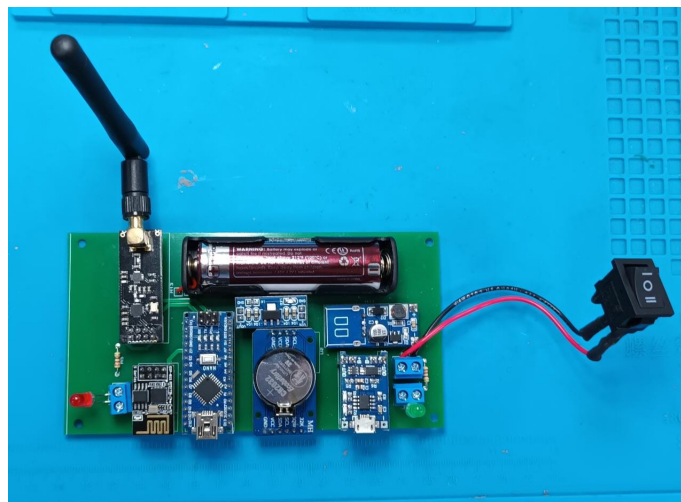


Figura 4.23: Montaje de componentes en PCB de nodo Gateway.

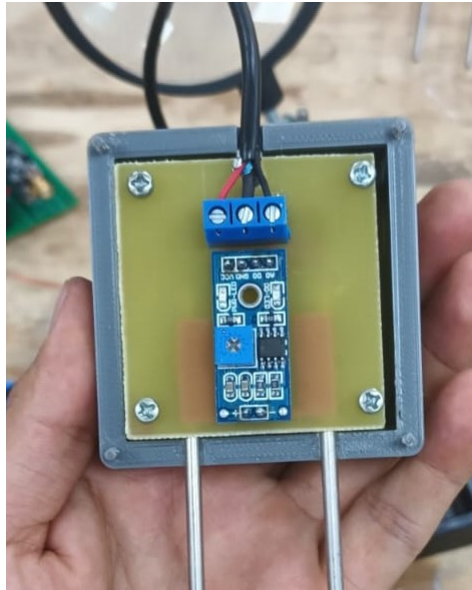


Figura 4.24: Montaje de componentes en PCB de la sonda.

4.2.4. Cajas protectoras

Considerando las condiciones ambientales del exterior, fue necesario diseñar una estructura que protegiera los nodos sensores de la humedad y las altas temperaturas. Aunque existen en el mercado cajas multipropósito conocidas como cajas de registro, que son resistentes al agua y al polvo, se descartó su uso debido a que no se encontraron opciones que se ajustaran al tamaño y diseño de los circuitos.

Para la construcción de las cajas, se utilizó un material PLA que es resistente a la intemperie, con paredes gruesas, refuerzos internos y esquinas redondeadas. Estas características permitieron aumentar la resistencia general de las cajas y evitar puntos de tensión.

Además, se aplicó una capa selladora de Gasket Maker de la marca SinteSolda con el fin de mejorar la impermeabilidad. Esta solución personalizada garantizó una adecuada protección de los nodos sensores y las sondas en el exterior.

El proceso de diseño y construcción de las cajas se puede consultar en la sección de anexos, donde se encuentra detallado el proceso de ideación, impresión e impermeabilización. Finalmente, en la Figuras 4.25 y 4.26 se aprecia la construcción final de los nodos.



Figura 4.25: Nodo Gateway en su caja

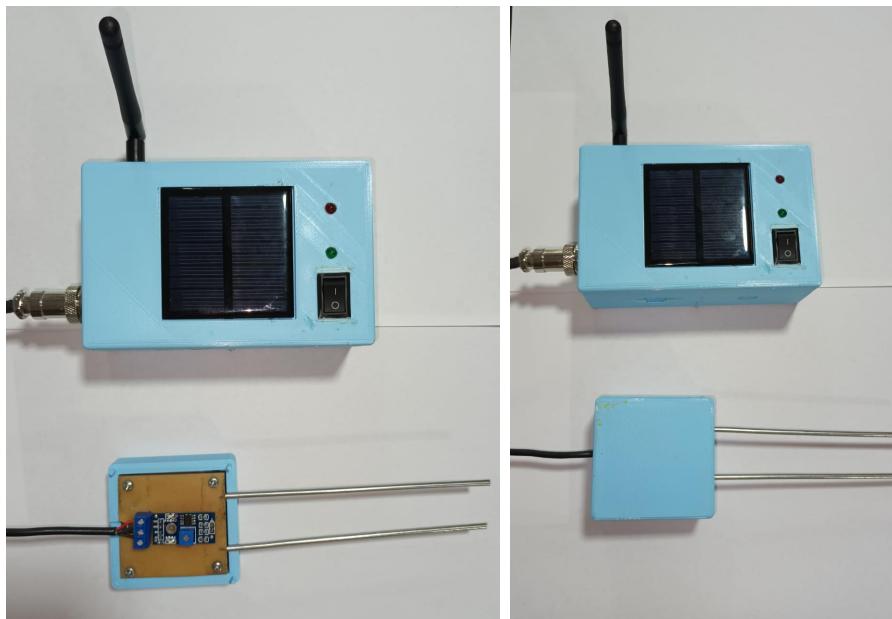


Figura 4.26: Nodo sensor y sonda en sus cajas

4.3. Desarrollo de la Aplicación móvil

4.3.1. Recolección de información

Para el desarrollo de la aplicación inicialmente se entrevistaron algunos actores involucrados con el proceso de cultivo de piñas del sector con la intención de recopilar datos, sugerencias e ideas acerca del diseño ideal para la aplicación móvil que permitiera a los agricultores de piña visualizar el estado de los macronutrientes NPK de sus cultivos. Con la información recopilada a través de las entrevistas fue posible realizar un diagrama de casos de uso, mediante el cual se identificó los actores que harían uso de la aplicación y las funciones o aplicaciones que tendrían cada uno. A continuación, se presentan las ideas que surgieron luego de las entrevistas y posterior a esto el mapa de actores que se encuentra en la figura.

- Utilizar colores para identificar el estado de NPK (amarillo para poco, verde para ideal y rojo para mucho)
- Utilizar elementos gráficos para la visualización como un dial o medidor
- Tener una interfaz sencilla con botones de fácil acceso a las diferentes funciones
- Realizar una recomendación dependiendo del estado de cada nutriente

Entre las ideas y sugerencias que se encontraron con los agricultores se destacan el diseño de una interfaz que sea sencilla de utilizar, el uso colores para para facilitar el entendimiento de los niveles de los nutrientes del cultivo y realizar comentarios según sea el estado de cada nutriente.

Diagrama de Casos de uso

El diagrama de caso de uso de la figura 4.27, permitió identificar dos actores que tendría la aplicación: el primero sería el usuario agricultor el cual tendría acceso a visualizar los datos de los valores de los nutrientes de cada una de las zonas, consultar el histórico de datos y recibir comentarios o recomendaciones; y el otro actor es el usuario en modo administrador que en este caso serían los autores quienes diseñaron y programaron la aplicación. Como administradores se tiene acceso a los códigos internos de la aplicación para realizar cualquier cambio y mantenimiento de la aplicación. Finalmente, el diagrama de casos de uso también facilitó el diseño y desarrollo de la aplicación ya que con base en este se pudieron definir las funciones que se necesitaban al igual que las diferentes pestañas con las que cuenta la aplicación.

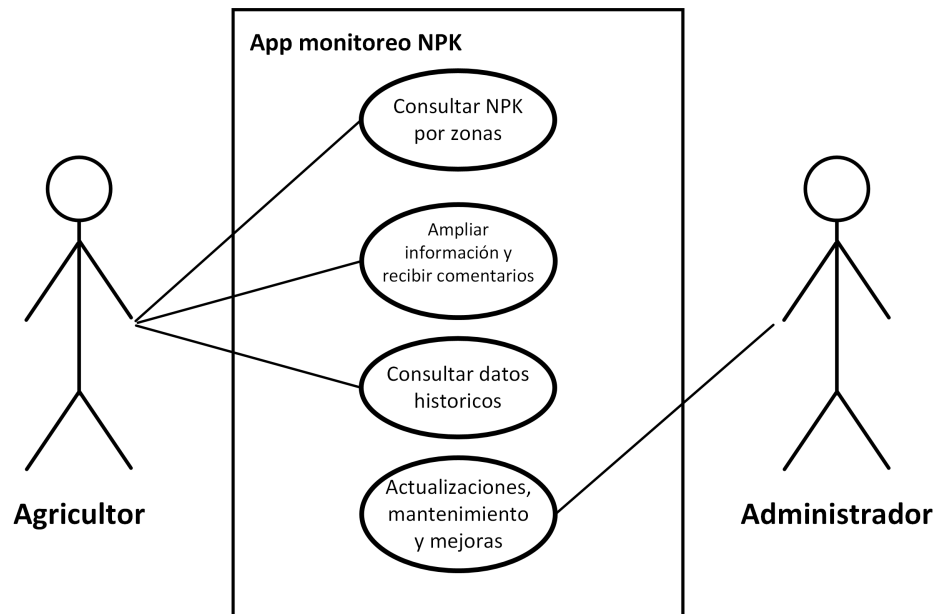


Figura 4.27: Diagrama de casos de uso de la aplicación móvil.

4.3.2. Diseño realizado

El diseño final de la aplicación consta de cinco pantallas, las cuales nombramos de la siguiente manera: Inicio, Zonas, NPK, Recomendación e Histórico. A continuación, se describen cada una de las pantallas.

- **Inicio:** esta pantalla le da la bienvenida al usuario y le presenta las dos opciones principales de la aplicación, las cuales son Consultar zonas y Consultar histórico. La opción Consultar zonas abre la pantalla Zonas y la opción Consultar histórico abre la pantalla Histórico.
- **Zonas:** esta pantalla le permite al usuario seleccionar la zona en la cual quiere visualizar los valores de NPK, para este caso el cultivo cuenta con cinco zonas y como características a destacar cada opción a seleccionar puede cambiar de color dependiendo de los valores de NPK que tenga cada zona, es decir, cada botón que representa una zona puede ser de color verde, amarillo o rojo y esto dependerá del estado de NPK que tenga la zona. Para definir el color que deba tener cada botón se aplicó la siguiente lógica: si alguno de los valores de NPK de la zona se encuentra en estado MUCHO entonces el color del botón de dicha zona sera rojo, si en cambio no se tiene ningún valor en estado MUCHO, pero se tiene al menos un valor en estado POCO, entonces el color del botón será amarillo y por último si todos los valores se encuentran en valor

IDEAL entonces el color del botón será verde.

- **NPK:** esta pantalla permite visualizar los valores de NPK de la zona que se haya seleccionado. La visualización se realiza mediante medidores tipo dial para cada uno de los nutrientes. Adicional cada nutriente tiene la opción “ver más”, la cual permite ampliar la información acerca de cada nutriente, esta opción abre la pantalla Recomendación.
- **Recomendación:** esta pantalla permite ver la información ampliada sobre un nutriente de una zona. En esta se presenta nuevamente el medidor tipo dial, el estado en el que se encuentra este nutriente (poco, ideal o mucho), el valor de la medición en ppm y un comentario con respecto al estado en el que se encuentre el nutriente. Además, el color de la información del estado y del valor en ppm cambia según sea el estado, para el estado “poco” se utiliza el color amarillo, para el estado “ideal” utiliza el verde y el estado “mucho” utiliza el rojo.
- **Histórico:** esta pantalla permite la visualización del histórico de datos del cultivo mediante una tabla de seis columnas: Fecha, Zona 1, Zona 2, Zona 3, Zona 4 y Zona 5. Adicionalmente cuenta con un botón “Regresar” para volver a la pantalla de inicio.

En las figuras 4.28 y 4.29 se muestran los diseños de las pantallas de la aplicación móvil.



Fecha	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
5-7-2023	N: 300 ppm P: 123 ppm K: 24 ppm	N: 290 ppm P: 123 ppm K: 30 ppm	N: 222 ppm P: 123 ppm K: 12 ppm	N: 287 ppm P: 12 ppm K: 125 ppm	N: 258 ppm P: 18 ppm K: 123 ppm
6-7-2023	N: 123 ppm P: 13 ppm K: 67 ppm	N: 200 ppm P: 25 ppm K: 100 ppm	N: 234 ppm P: 15 ppm K: 124 ppm	N: 356 ppm P: 128 ppm K: 178 ppm	N: 234 ppm P: 24 ppm K: 123 ppm
7-7-2023	N: 190 ppm P: 13 ppm	N: 270 ppm P: 27 ppm	N: 168 ppm P: 17 ppm	N: 390 ppm P: 124 ppm	N: 126 ppm P: 123 ppm

Regresar

Figura 4.28: Pantalla Histórico de la aplicación móvil.

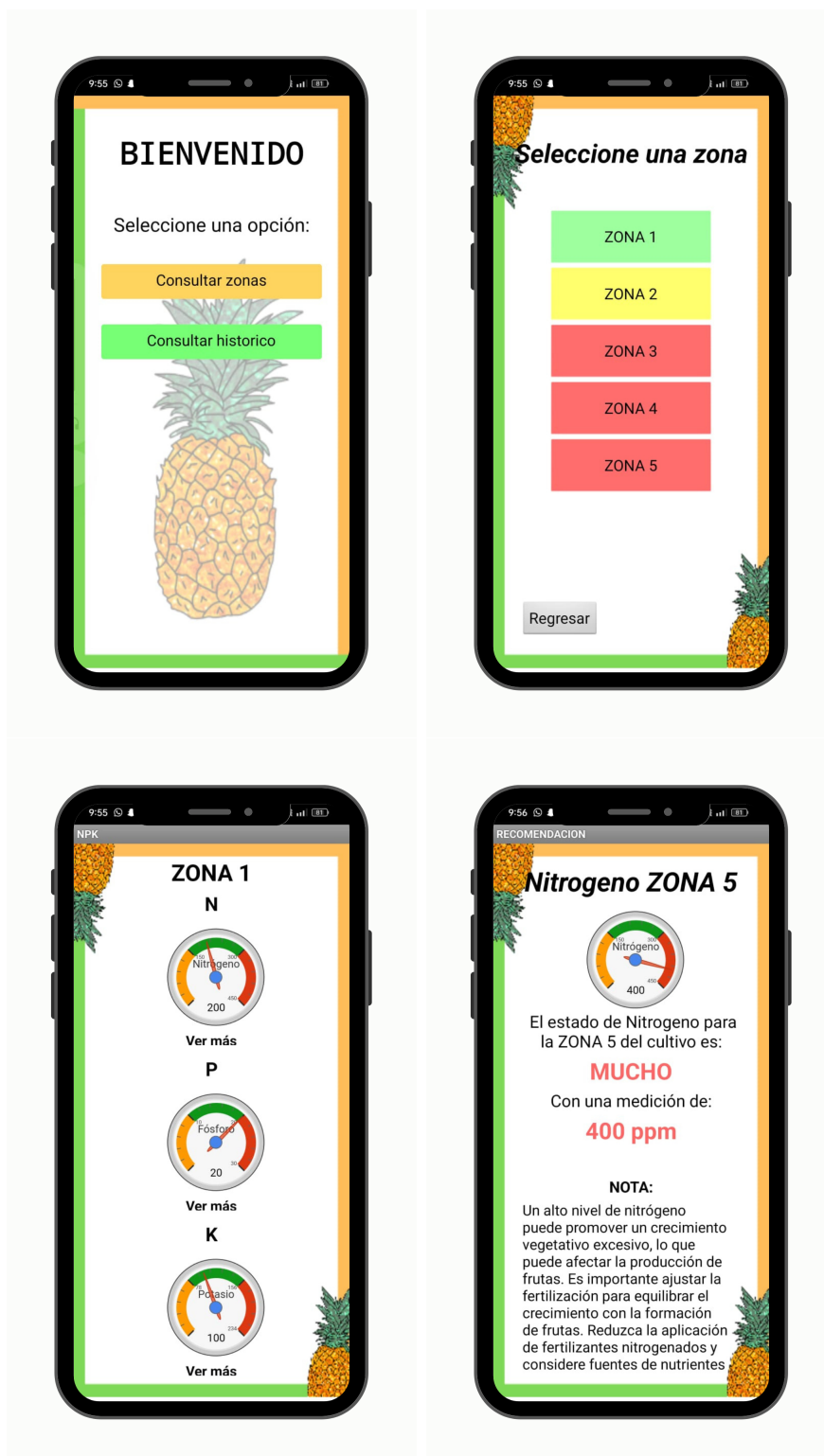


Figura 4.29: Pantallas de la aplicación móvil.

4.4. Pruebas

Se realizaron diferentes pruebas para evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo, tanto de forma individual en los subsistemas como en conjunto. Para llevar a cabo estas pruebas, contamos con la colaboración de los agricultores, a quienes se les presentó el prototipo de la red de sensores y la aplicación desarrollada.

Las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo con el propósito de verificar el correcto desempeño de los diferentes subsistemas. Estas pruebas tuvieron como objetivo asegurarse de que los dispositivos cumplieran adecuadamente con sus funciones designadas. Por ejemplo, se verificó que los nodos sensores calcularan de manera precisa los niveles de NPK mediante la comparación con el sensor NPK meter tester, y también que transmitieran dicha información de manera correcta. Asimismo, se comprobó que el nodo Gateway recibiera la información proveniente de los nodos sensores y la almacenara adecuadamente en la base de datos. Por último, se verificó que la aplicación tomara los datos actualizados desde la base de datos para su correcta visualización.

Las pruebas de adaptación e instalación se llevaron a cabo con el objetivo de asegurar una correcta instalación del sistema de monitoreo en el cultivo de piña. Estas pruebas tuvieron como finalidad verificar que los dispositivos se ubicaran adecuadamente, permitiendo un funcionamiento continuo y un fácil acceso tanto para los agricultores como para los desarrolladores del proyecto. Por ejemplo, se verificó que los nodos sensores estuvieran ubicados estratégicamente en cada zona, de manera que estuvieran expuestos a la radiación solar suficiente para recargar las baterías. También se comprobó que el nodo Gateway se ubicara en un lugar protegido, con acceso a la red eléctrica y conexión a Internet a través de Wifi.

Las pruebas de operación y desempeño se llevaron a cabo para validar el funcionamiento del sistema en condiciones reales y con la participación activa de los agricultores. Estas pruebas se llevaron a cabo durante un período de dos semanas, una semana antes de un abono programado y otra semana después del mismo. El objetivo de estas pruebas fue evaluar la facilidad de uso del sistema y su funcionalidad para cumplir con los objetivos propuestos. Durante estas pruebas, se utilizó una encuesta para recopilar información y evaluar la experiencia de los agricultores. Se buscó conocer su opinión sobre la facilidad de uso del sistema, así como verificar si el sistema cumplía con los objetivos establecidos.

4.5. Análisis de resultados

Para probar la calibración de las sondas, se realizaron mediciones de NPK (ver figura 4.30) utilizando cada una de las 5 sondas instaladas y el sensor “Soil NPK meter” utilizado como referencia para la calibración. Estas mediciones permitieron comparar el rendimiento de cada

sonda con el sensor de referencia. Los resultados de estas mediciones se muestran en las tablas 4.10 y 4.11. El sistema no considera valores decimales por lo cual un error absoluto de ± 1 representa cerca del 5 % del error relativo. Los resultados revelaron porcentajes de error que oscilaron entre el 0 % y el 7.9 % para el Nitrógeno; 7.7 % y 15.4 % para el Fósforo; y 5.3 % y 10.5 % para el Potasio. Los porcentajes de error obtenidos, que se encuentran por debajo del 16 %, validan la calibración de las sondas. Esto significa que las mediciones realizadas por las sondas son aceptables y confiables en comparación con el sensor de referencia utilizado para la calibración teniendo en cuenta que



Figura 4.30: Pruebas de las sondas.

La validación de la calibración de las sondas es un resultado positivo, ya que garantiza que los datos recopilados por las sondas sean confiables para monitorear los niveles de NPK en el suelo.

	Sensor NPK Tester	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
Nitrógeno (ppm)	38	36	37	35	36	38
Fósforo (ppm)	13	12	14	11	11	14
Potasio (ppm)	19	18	20	18	18	21

Tabla 4.10: Comparación de mediciones entre las sondas y el sensor NPK tester

	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
Nitrogeno	5.3	2.6	7.9	5.3	0.0
Fosforo	7.7	7.7	15.4	15.4	7.7
Potasio	5.3	5.3	5.3	5.3	10.5

Tabla 4.11: Porcentajes de error de las mediciones

Para realizar las pruebas del sistema de comunicación inalámbrica, se llevó a cabo el montaje en protoboard de tres nodos. Uno de ellos actuó como receptor, simulando la función del nodo Gateway, mientras que los otros dos actuaron como transmisores, simulando a los nodos sensores. La prueba en protoboard consistió en ubicar los dos nodos transmisores en el cultivo de estudio, uno al final del terreno del cultivo y el otro en la mitad. Por su parte, el nodo receptor se ubicó en la casa con conexión a internet más cercana al cultivo, a una distancia de 35 metros. Esta configuración permitió simular las condiciones reales del sistema, y así se pudieron realizar pruebas exhaustivas de comunicación inalámbrica entre los nodos.

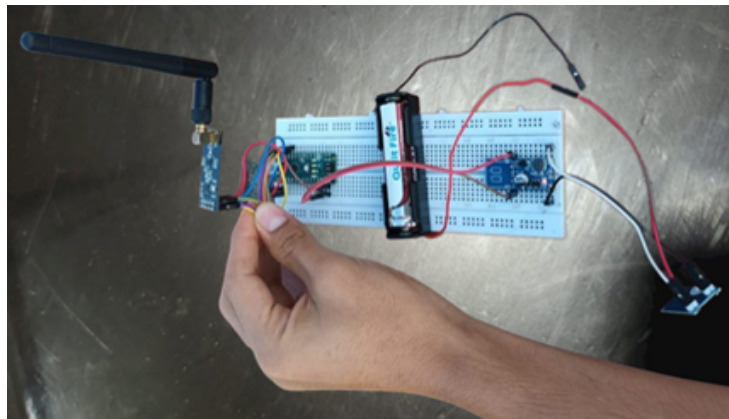


Figura 4.31: Montaje en protoboard de un nodo de la red de sensores inalámbrica.

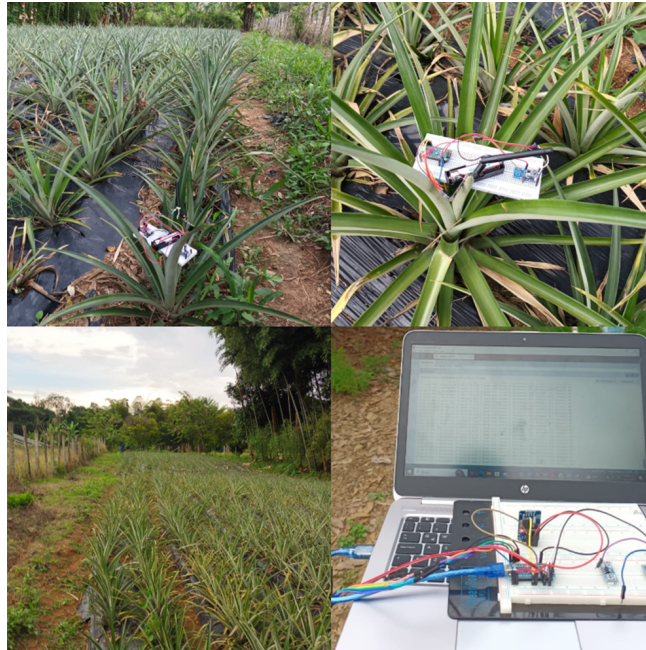


Figura 4.32: Pruebas de los nodos de transmisión y recepción en protoboard.

Al realizar las pruebas se encontró necesario activar la máxima potencia de transmisión en los nodos transmisores debido a que entre el cultivo y la casa existente una zona con densa vegetación lo cual afectaba la línea de vista entre el receptor y el transmisor. Luego de realizar este cambio en el código de los transmisores se mejoró la comunicación y los resultados fueron satisfactorios, pues se logró obtener los datos provenientes de los nodos transmisores. Los resultados se muestran a continuación en la figura 4.33.

```
Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Arduino Nano' on 'COM9')
16:56:29.568 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 1 desde nodo sensor 1. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:32.690 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 1 desde nodo sensor 1. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 4
16:56:33.241 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 2 desde nodo sensor 2. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:34.256 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 2 desde nodo sensor 2. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:35.254 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 2 desde nodo sensor 2. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:35.767 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 1 desde nodo sensor 1. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:36.269 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 2 desde nodo sensor 2. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:36.756 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 1 desde nodo sensor 1. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:37.255 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 2 desde nodo sensor 2. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:37.794 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 1 desde nodo sensor 1. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
16:56:38.301 -> Recibiendo 16 bytes en pipe 2 desde nodo sensor 2. Nitrogeno: 180, Fosforo: 115, Potasio: 45
```

Figura 4.33: Resultados de pruebas de transmisión y recepción en protoboard.

Con este procedimiento se comprobó el correcto funcionamiento de los subsistemas de trans-

misión y recepción. Adicionalmente, como se observa en las figuras 4.31 y 4.32 se aprovechó para probar el circuito de alimentación de los nodos, es por esto que en las figuras se pueden apreciar las baterías 18650, los módulos de carga TP4056 y el módulo DC-DC, con esto se garantizó la alimentación del sistema mediante la batería 18650 de 3.7 V.

Para probar el funcionamiento del sistema en su conjunto, una vez construidos todos los dispositivos, se procedió a instalar los nodos sensores en el cultivo como se muestra en la figura 4.40, y luego se programó toda la red para que tomara medidas y transmitiera la información. Además, se configuró el nodo Gateway para recibir dicha información y subirla a la base de datos cada día a las 12:00 p.m. La aplicación móvil también fue configurada para actualizar y mostrar los datos obtenidos.



Figura 4.34: Nodos sensores instalados en el cultivo para prueba de funcionamiento.

Durante estas pruebas, se contó con la presencia de los agricultores con el fin de brindarles capacitación sobre el funcionamiento del sistema y la operación de la aplicación móvil en condiciones reales como se evidencia en la figura 4.35. Se les proporcionó información sobre cómo interpretar los datos obtenidos y cómo utilizar la aplicación para acceder a la información en tiempo real.



Figura 4.35: Capacitación a los agricultores sobre el funcionamiento del sistema.

El enlace de la base de datos tanto con el nodo Gateway como con la aplicación fue exitoso. Los valores de NPK de cada zona se registraron correctamente en el componente RealTime y en Firestore, como se muestra en las figuras 4.36 y 4.37. Además, se pudo acceder a estos datos desde la aplicación mediante consultas al histórico y al estado en tiempo real de cada zona como se aprecia en las figuras 4.38 y 4.39.

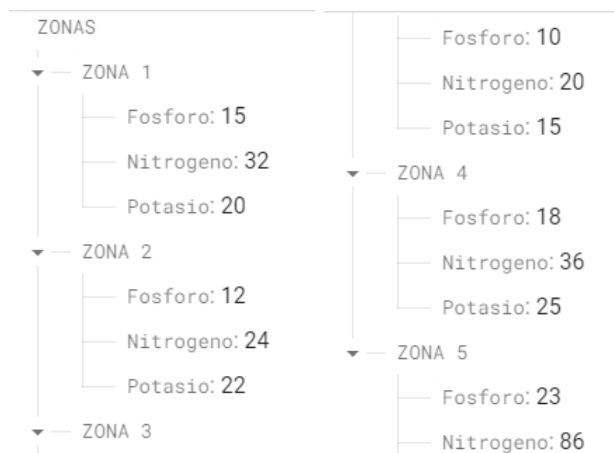


Figura 4.36: Datos cargados en la base de datos Real Time.

Document ID	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
18-6-2023	(Nitrogeno: 32, Potasio: 20, Fosforo: 15)	(Potasio: 22, Fosforo: 12, Nitrogeno: 24)	(Fosforo: 10, Nitrogeno: 20, Potasio: 15)	(Nitrogeno: 36, Fosforo: 18, Potasio: 25)	(Potasio: 34, Nitrogeno: 86, Fosforo: 23)
19-6-2023	(Potasio: 21, Fosforo: 15, Nitrogeno: 32)	(Potasio: 22, Fosforo: 12, Nitrogeno: 23)	(Potasio: 14, Nitrogeno: 20, Fosforo: 10)	(Nitrogeno: 36, Fosforo: 18, Potasio: 25)	(Potasio: 34, Fosforo: 23, Nitrogeno: 86)
20-6-2023	(Fosforo: 15, Nitrogeno: 32, Potasio: 20)	(Fosforo: 12, Potasio: 22, Nitrogeno: 24)	(Nitrogeno: 20, Potasio: 15, Fosforo: 10)	(Potasio: 25, Nitrogeno: 36, Fosforo: 18)	(Fosforo: 23, Nitrogeno: 86, Potasio: 34)
21-6-2023	(Potasio: 20, Nitrogeno: 32, Fosforo: 15)	(Potasio: 22, Nitrogeno: 24, Fosforo: 12)	(Nitrogeno: 20, Fosforo: 10, Potasio: 15)	(Fosforo: 18, Nitrogeno: 36, Potasio: 25)	(Fosforo: 23, Potasio: 34, Nitrogeno: 86)
22-6-2023	(Potasio: 20, Fosforo: 14, Nitrogeno: 31)	(Nitrogeno: 24, Fosforo: 12, Potasio: 22)	(Nitrogeno: 20, Fosforo: 10, Potasio: 15)	(Fosforo: 18, Potasio: 26, Nitrogeno: 36)	(Potasio: 34, Fosforo: 23, Nitrogeno: 86)
23-6-2023	(Fosforo: 15, Nitrogeno: 32, Potasio: 20)	(Fosforo: 12, Nitrogeno: 24, Potasio: 22)	(Fosforo: 10, Nitrogeno: 20, Potasio: 15)	(Potasio: 25, Fosforo: 18, Nitrogeno: 36)	(Fosforo: 23, Potasio: 34, Nitrogeno: 86)
24-6-2023	(Potasio: 20, Fosforo: 15, Nitrogeno: 32)	(Fosforo: 12, Nitrogeno: 24, Potasio: 22)	(Potasio: 15, Nitrogeno: 20, Fosforo: 10)	(Potasio: 25, Fosforo: 18, Nitrogeno: 36)	(Fosforo: 23, Potasio: 34, Nitrogeno: 86)
25-6-2023	(Potasio: 15, Fosforo: 20, Nitrogeno: 32)	(Potasio: 22, Nitrogeno: 24, Fosforo: 12)	(Nitrogeno: 20, Fosforo: 10, Potasio: 15)	(Potasio: 25, Nitrogeno: 36, Fosforo: 18)	(Potasio: 34, Fosforo: 23, Nitrogeno: 86)
26-6-2023	(Fosforo: 15, Nitrogeno: 32, Potasio: 20)	(Potasio: 22, Nitrogeno: 24, Fosforo: 12)	(Nitrogeno: 20, Potasio: 15, Fosforo: 10)	(Fosforo: 18, Nitrogeno: 36, Potasio: 25)	(Nitrogeno: 86, Potasio: 34, Fosforo: 23)

Figura 4.37: Datos cargados en la base de datos Firestore.

Esta integración exitosa de la base de datos garantizó que los datos de NPK se almacenen de manera precisa y actualizada, lo que permite un seguimiento detallado de los niveles de nutrientes en cada zona del cultivo de piña. La capacidad de acceder a estos datos tanto históricos como en tiempo real a través de la aplicación proporciona a los agricultores una herramienta práctica para monitorear y tomar decisiones informadas sobre la fertilización de su cultivo.

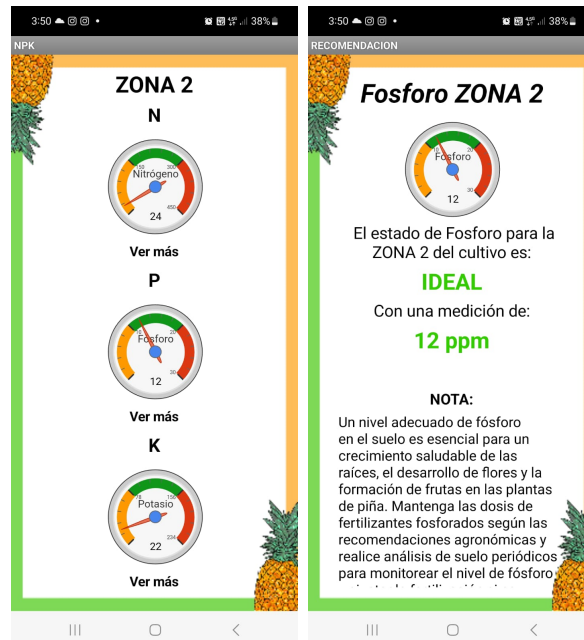


Figura 4.38: Consulta de NPK para la zona 2 del cultivo de piña.

The figure shows two screenshots of a mobile application interface. The top screenshot displays a 'HISTORICO' table with columns for dates and nutrient levels (N, P, K) for five zones. The bottom screenshot shows a similar table with an additional 'Fecha' column and a 'Regresar' button at the bottom.

Fecha	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
21-6-2023	N: 32 ppm P: 15 ppm K: 20 ppm	N: 24 ppm P: 12 ppm K: 22 ppm	N: 20 ppm P: 10 ppm K: 15 ppm	N: 36 ppm P: 18 ppm K: 25 ppm	N: 86 ppm P: 23 ppm K: 34 ppm
22-6-2023	N: 31 ppm P: 14 ppm K: 20 ppm	N: 24 ppm P: 12 ppm K: 22 ppm	N: 20 ppm P: 10 ppm K: 15 ppm	N: 36 ppm P: 18 ppm K: 25 ppm	N: 86 ppm P: 23 ppm K: 34 ppm
23-6-2023	N: 32 ppm P: 15 ppm K: 20 ppm	N: 24 ppm P: 12 ppm K: 22 ppm	N: 20 ppm P: 10 ppm K: 15 ppm	N: 36 ppm P: 18 ppm K: 25 ppm	N: 86 ppm P: 23 ppm K: 34 ppm
24-6-2023	N: 32 ppm P: 15 ppm K: 20 ppm	N: 24 ppm P: 12 ppm K: 22 ppm	N: 20 ppm P: 10 ppm K: 15 ppm	N: 36 ppm P: 18 ppm K: 25 ppm	N: 86 ppm P: 23 ppm K: 34 ppm

Figura 4.39: Consulta del histórico de datos.

Estas pruebas en condiciones reales permitieron validar el funcionamiento integral del sistema y brindaron la oportunidad de capacitar a los agricultores para utilizarlo de manera efectiva en la gestión de los fertilizantes de su cultivo de piña.



Figura 4.40: Pruebas de funcionamiento del sistema en el cultivo.

Después de realizar las pruebas de funcionamiento, se procedió a realizar las adaptaciones necesarias para implementar el sistema de monitoreo en el cultivo. En colaboración con los agricultores, se determinaron los puntos ideales para ubicar los nodos sensores en cada zona.

Los nodos sensores se instalaron en bases de 130 cm de altura, lo que facilitó el acceso físico a ellos y garantizó la exposición adecuada de los paneles solares a la radiación solar. La Figura 4.41 muestra cómo el panel solar genera 4.26 V los cuales son suficientes para recargar la batería a través del módulo TP4056; esta medición se realizó con un cielo parcialmente nublado. Además, el nodo Gateway se instaló en una vivienda cercana al cultivo, asegurando el acceso a la red WiFi y a la conexión eléctrica a través de un enchufe. La Figura 4.42 muestra la ubicación final del nodo Gateway.



Figura 4.41: Pruebas de panel solar en ubicación final del nodo sensor.

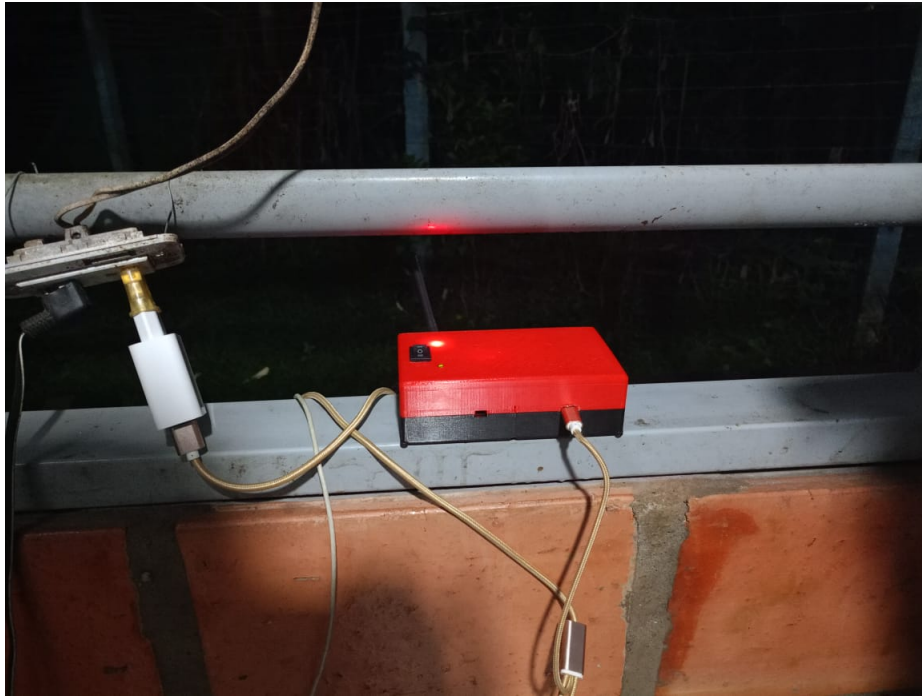


Figura 4.42: Ubicación final del nodo Gateway.

Para la prueba de operación y desempeño se realizó la encuesta del anexo 7.9 a tres agricultores involucrados con el cultivo de estudio que hicieron uso de la aplicación durante el periodo de prueba. En la sección de anexos se encuentran los resultados de la encuesta realizada.

Al analizar los resultados de la encuesta, se encontró que todos los encuestados indicaron que han utilizado la aplicación móvil para acceder a los datos de NPK en tiempo real del cultivo de piña. Además, la facilidad de uso de la aplicación obtuvo una calificación promedio de 4 en una escala del 1 al 5, donde 5 es muy fácil y 1 muy difícil, lo que indica que los encuestados consideraron que la aplicación es fácil de usar. Todos los encuestados afirmaron que la aplicación proporcionó información clara y comprensible sobre los valores de NPK en cada zona del cultivo, y todos ellos han consultado el historial de datos de NPK del cultivo a través de la aplicación móvil. La funcionalidad del sistema de monitoreo de NPK también obtuvo una calificación promedio de 4, donde 5 es muy satisfactorio y 1 es muy insatisfactorio, lo que indica la satisfacción de los encuestados con su funcionalidad. En cuanto a dificultades técnicas o mal funcionamiento del sistema, dos de los encuestados indicaron que no encontraron ninguna dificultad, mientras que uno de ellos mencionó que debe tener una buena conexión a internet para que funcione sin interrupciones. Adicionalmente, todos los encuestados recomendarían el sistema de monitoreo de NPK a otros agricultores.

Finalmente, entre los comentarios y sugerencias de los encuestados, se destacan las siguientes observaciones: tener en cuenta variables agrológicas como humedad y temperatura; posibilidad de realizar comparaciones entre zonas; recibir notificaciones en el celular en caso de problemas en el cultivo; y considerar la incorporación de más variables, como el pH y la humedad, que son importantes para los cultivos. Estas sugerencias pueden ser consideradas para futuras mejoras del sistema.

4.6. Análisis de costos

El sistema de monitoreo, desarrollado por dos estudiantes de ingeniería electrónica en su último semestre, involucra técnicas avanzadas en su diseño e implementación. Para evaluar la viabilidad económica y el rendimiento de las técnicas utilizadas, se realizó un cálculo preciso del costo por hora de trabajo.

Considerando un total aproximado de 180 horas trabajadas al mes y un salario mínimo de 1.400.000 pesos en Colombia, el costo por hora de trabajo se estima en 7.777,78 pesos. Este análisis del costo de la mano de obra basado en las horas trabajadas y el salario mínimo vigente resulta fundamental en la evaluación económica del proyecto.

A continuación, se presentan las tablas que proporcionan información detallada sobre los precios y las cantidades de los componentes electrónicos y otras materias primas utilizadas durante el desarrollo del proyecto. Esto permite tener un análisis preciso de los costos asociados con los componentes y materiales utilizados, brindando una visión completa de la inversión económica realizada en el proyecto.

Recurso humano	Labor realizada	Tiempo estimado (horas)	Salario
Ing. electrónico	Investigación de antecedentes y técnicas	80	\$622,222.22
Ing. electrónico	Selección de componentes electrónicos	50	\$388,888.89
Ing. electrónico	Diseño electrónico	60	\$466,666.67
Ing. electrónico	Diseño de la App y base de datos	50	\$388,888.89
Ing. electrónico	Calibración de las sondas	50	\$544,444.44
Ing. electrónico	Construcción de los dispositivos	70	\$388,888.89
Ing. electrónico	Diseño y desarrollo de pruebas	20	\$155,555.56
Ing. electrónico	Implementación y evaluación del sistema	30	\$233,333.33
Total		410	\$3,187,777.78

Tabla 4.12: Tabla de Recursos Humanos y Costos

Componente	Cantidad	Precio
Arduino Nano	6	\$ 180.000
Modulo Wifi	1	\$ 9.400
Módulo de carga	6	\$ 30.000
Módulo de reloj	1	\$ 21.000
Módulo HI-69	5	\$ 32.500
Módulo regulador de voltaje	1	\$ 7.500
Módulo NRF24L01	6	\$ 102.000
Paneles solares	5	\$ 97.500
Interruptores	6	\$ 10.800
Leds	12	\$ 1.200
Regulador DC/DC	6	\$ 37.800
Cables	2	\$ 15.000
Impresión en PLA	1	\$ 180.000
Batería recargable	6	\$ 27.000
Gasket Maker	1	\$ 50.000
Sensor NPK meter tester	1	\$ 350.000
Varillas de acero inoxidable	5	\$ 130.000
Impresión de PCBs(incluye envío)	-	\$ 280.000
Total	-	\$ 1.561.700

Tabla 4.13: Tabla de Componentes y Precios

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, el costo total de mano de obra asciende a \$3,187,777, mientras que el valor de los dispositivos electrónicos y otras materias primas es de \$1,561,700. Por lo tanto, el costo total para el desarrollo de este proyecto que consta de 5 nodos sensores y un nodo Gateway tiene un valor de \$4,749,477 pesos colombianos.

En caso de fabricar los nodos del sistema de manera masiva, se esperaría obtener un descuento aproximado del 35 % en los componentes utilizados. Esto se debe a la capacidad de negociación con el proveedor principal y a la reducción de costos tanto de transporte como de los componentes al adquirir una gran cantidad de dispositivos. En tal caso, el valor estimado de los componentes sería de \$1,015,105.

Además, el equipo de ingenieros se enfocaría en la calibración de las sondas, la construcción de los dispositivos, la instalación e implementación; y el desarrollo de pruebas. Con la experiencia y conocimientos adquiridos del primer prototipo, el tiempo de calibración se reduciría a 15 horas y la implementación y pruebas a 40 horas. Por lo tanto, el costo por ingeniero sería de \$486,062. Estos valores se calculan con base a un salario mínimo, sin embargo si los ingenieros a cargo del proyecto tuvieran una mayor experiencia estos costos se incrementarían. Además es importante considerar que no se toman en cuenta costos relacionados al servicio técnico, postventa y garantía del sistema los cuales incrementan los costos del sistema en un

valor estimado del 50 % del costo total de producción e implementación, por lo cual, el costo final del sistema sería aproximadamente \$2,980.843 pesos.

En el mercado existen varias alternativas que ofrecen sistemas similares, como AgroSense y METER, que tienen un costo aproximado de \$19,128,200 pesos y \$11,309,110 pesos, respectivamente, para un sistema de cinco nodos como los propuestos en este proyecto. En comparación, la implementación realizada en este trabajo de grado ofrece una alternativa más económica para el monitoreo de macronutrientes NPK en cultivos de piña.

Conclusiones

Con este proyecto se logró desarrollar un sistema de monitoreo de menor costo que brinda a los agricultores la capacidad de obtener datos relevantes sobre los niveles de los macro nutrientes en su cultivo de piña. Esto les permite optimizar sus prácticas agrícolas y maximizar la productividad de manera sostenible. Este sistema puede ser implementado y usado por pequeños y medianos agricultores que se interesen en llevar un registro de las variables de NPK de sus cultivos con el fin de optimizar los recursos destinados al proceso de fertilización.

Mediante la búsqueda exhaustiva de información y antecedentes, se pudo identificar los requerimientos y necesidades del sistema de monitoreo. Esta investigación previa permitió comprender los aspectos clave que debían abordarse, como el método utilizado para medir los niveles de NPK en el cultivo de piña y la necesidad de un sistema de bajo costo.

El proceso de diseño, basado en la selección de los componentes y plataformas más apropiados para cumplir con los objetivos establecidos, aseguró que el sistema de monitoreo diseñado cumpliera con los requerimientos identificados previamente. Además, se logró el uso de tecnologías innovadoras, como el sensor Soil NPK Meter para la calibración de las sondas; también se utilizó la plataforma Firebase para la base de datos, aprovechando las ventajas de las bases de datos NoSQL; y se empleó la plataforma App Inventor para el desarrollo de la aplicación móvil en un entorno de programación visual e intuitivo.

Adicionalmente, se implementaron prototipos de los dispositivos que forman parte del sistema de monitoreo en el cultivo. Estos prototipos se utilizaron para realizar pruebas, comenzando con una etapa inicial en protoboard para verificar el funcionamiento de los subsistemas de cada dispositivo. Posteriormente, se probaron los dispositivos ensamblados y protegidos en sus respectivas cajas, lo que permitió evaluar el sistema en conjunto y comprobar su funcionamiento.

La implementación de los prototipos también tuvo como objetivo capacitar a los agricultores en el funcionamiento del sistema y el uso de la aplicación. A través de esta capacitación, los usuarios aprendieron a utilizar la aplicación para realizar consultas en tiempo real y acceder al historial de datos. Esta capacitación fue fundamental para que los agricultores pudieran planificar de manera más efectiva los abonos del cultivo, comparando los resultados obtenidos

desde la aplicación con los planes programados de fertilización.

Tras realizar las pruebas y verificar el correcto funcionamiento del sistema, se llevó a cabo la instalación final en el cultivo, realizando las adaptaciones necesarias para facilitar el acceso a los dispositivos y garantizar su funcionamiento continuo. La utilización de bases para los nodos sensores permitió ubicarlos de manera óptima en el cultivo, asegurando su visibilidad y aprovechando la radiación solar para recargar las baterías.

Finalmente, se evaluó el desempeño y operación del sistema mediante un periodo de prueba a cargo de los agricultores para lo cual se realizó una encuesta terminado dicho periodo. Los resultados de la encuesta indicaron que los agricultores están satisfechos con el funcionamiento del sistema de monitoreo de NPK; la aplicación móvil fue considerada fácil de usar y proporcionó información clara sobre los valores de NPK. Además, los agricultores valoraron positivamente la funcionalidad del sistema y recomendarían su uso a otros.

Trabajos futuros

6.1. Integración de sensores adicionales

Con la finalidad de mejorar el sistema de monitoreo de nutrientes, planteamos la posibilidad integrar sondas adicionales de medición en el sistema.

Además de determinar los niveles óptimos de los nutrientes principales para el desarrollo de la piña, como lo son el nitrógeno, fósforo y el potasio, también se podrían incluir sondas de medición de pH y humedad del suelo, para las necesidades de la piña, como también se podría incorporar una estación meteorológica para tener conocimiento del estado del clima y así evitar pérdidas al momento de realizar la fertilización. Además estas sondas nos proporcionarían información vital sobre la cantidad de agua y nutrientes en el suelo, así también como las variable de la acidez del mismo, lo que permite un monitoreo más preciso y una comprensión más detallada de las condiciones óptimas para el cultivo de la piña.

La integración de sondas de medición como la de humedad del suelo nos permitiría conocer el contenido total de agua disponible para las raíces de la piña, lo que nos permitiría determinar tanto el momento como la cantidad adecuada de riego. Por otra parte, las sondas de medición de pH nos permitirían recolectar información sobre el nivel de acidez o alcalinidad del suelo, variable que es esencial para mantener el equilibrio adecuado de nutrientes y permitir una óptima absorción de los nutrientes por parte de las plantas de piña.

Esto, se traduce en la mejora de la calidad del fruto de la piña. Puesto que al monitorear y sostener estos parámetros en niveles adecuados a través de las sondas adicionales agregadas, se pueden establecer condiciones ideales para el crecimiento de la piña, lo que a su vez resulta en una mayor calidad de las frutas cosechadas.

6.2. Transición a un sistema embebido

La transición de las PCBs diseñadas a un sistema embebido ofrece una serie de beneficios significativos. Actualmente, los nodos sensores utilizan un diseño de PCB sencillo que emplea varios módulos para recopilar y transmitir datos de los sensores. Ahora bien, al realizar la

transición hacia un sistema embebido, lograríamos una mayor eficiencia en la recolección de datos y la utilización de espacio.

La miniaturización de los componentes electrónicos y la incorporación de varias funciones en un solo chip permitiría reducir no solo el tamaño, sino que también el consumo de energía de los nodos sensores. Debido a que al disminuir el tamaño y el consumo de energía de los nodos sensores, se estaría mejorando la eficiencia del sistema de sensado de nutrientes.

Esto nos permitiría una adquisición y transmisión de datos más exacta y rápida, lo que a su vez mejoraría la velocidad de respuesta y esto nos permitiría la toma de decisiones en tiempo real de una forma más rápida. Lo cual resulta siendo muy relevante en el cultivo de piña, donde factores como la optimización de los recursos suministrados es fundamental para poder maximizar la productividad y así reducir costos. Además, realizar la transición a los circuitos integrados nos facilitaría la escalabilidad del sistema, lo que a su vez permite una implementación más sencilla para grandes plantaciones de piña, donde se requiere un monitoreo más extenso y exacto.

En cuanto a la calidad del producto, la mejora tanto en la eficiencia, como en la capacidad de respuesta del sistema se ve reflejada en un monitoreo más preciso y oportuno de las condiciones del cultivo. Por ejemplo, si es posible recibir datos actualizados de nutrientes, humedad y otros parámetros relevantes de forma rápida y precisa, los agricultores podrían adaptar rápidamente la cantidad de nutrientes y el riego para mantener las condiciones ideales para un cultivo de piña. Esto a su vez ayuda a prevenir deficiencias nutricionales, estrés hídrico y otros problemas que podrían afectar negativamente la calidad de las piñas cosechadas.

6.3. Diseño cajas protectoras certificadas

Considerando que el sistema se encontrará al aire libre, es importante desarrollar cajas protectoras certificadas especialmente diseñadas para resistir las condiciones climáticas específicas de las regiones donde se cultiva la piña. Estas cajas estarían certificadas para proteger los nodos sensores de la lluvia intensa, la alta humedad, la exposición prolongada al sol y otros elementos ambientales adversos que podrían afectar el rendimiento del cultivo de piña.

Las cajas protectoras certificadas deberían ser fabricadas con materiales resistentes y duraderos, capaces de soportar condiciones climáticas extremas se pueden considerar varios materiales que sean resistentes y duraderos. A continuación, se proponen algunos materiales adecuados:

- **Policarbonato:** es un material plástico transparente y resistente que ofrece una buena

resistencia al impacto y protección contra los rayos UV. El policarbonato es ligero y resistente a la intemperie, lo que lo hace adecuado para proteger los nodos sensores en entornos exteriores.

- **ABS:** el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un polímero termoplástico conocido por su resistencia y durabilidad. Es resistente a los golpes, la humedad y las altas temperaturas, lo que lo convierte en un material adecuado para cajas protectoras de nodos sensores expuestos a condiciones climáticas adversas.

Además, es necesario tener en cuenta otras características como lo son la ventilación adecuada para evitar la acumulación de calor en exceso en el interior de las cajas, además de el acceso sencillo y rápido para el mantenimiento y reemplazo de los componentes internos. La certificación aseguraría que las cajas cumplan con los estándares de protección necesarios y que los nodos sensores estén adecuadamente resguardados de los elementos externos. Esto garantizaría el funcionamiento confiable y la durabilidad del sistema de sensado de nutrientes en el cultivo de piña a largo plazo.

El tiempo que se requirió para obtener los diseños y evaluarlos en campo, sólo permitió identificar las falencias de los diseños propuestos. Se estima un periodo de cerca de tres meses para mejorarlos y así se prolonga el desarrollo de este trabajo.

6.4. Implementación de algoritmos avanzados de análisis de datos

La implementación de algoritmos avanzados de análisis de datos sería fundamental para aprovechar al máximo la información recopilada por el sistema de sensado de nutrientes.

Estos algoritmos permitirían procesar y analizar los diferentes datos recolectados por los sensores, permitiendo de esta manera proporcionar una perspectiva amplia y valiosa para de esta forma optimizar el suministro de nutrientes. Por ejemplo, si se realiza el análisis de los datos de los sensores de nutrientes, humedad del suelo y pH, estos algoritmos podrían ayudarnos a identificar patrones de consumo de nutrientes o las necesidades hídricas de las plantas de piña en sus diferentes etapas de crecimiento.

Esto permitiría adaptar de una mejor manera tanto el suministro de nutrientes, como el riego de manera precisa y oportuna, adaptándolos a las necesidades cambiantes de las plantas de piña a lo largo de su ciclo de crecimiento. Además, la integración de estas técnicas permitiría anticipar los desafíos específicos del cultivo de piña, como lo son enfermedades comunes como hongos o desequilibrios nutricionales, y tomar medidas preventivas de manera proactiva.

Por ultimo, teniendo en cuenta la seguridad de los datos transmitidos, esta se debe mejorar con apoyo de una persona especializada en desarrollo de software para IoT. En especial, hace falta la creación de un capa intermedia entre el nodo gateway y la base de datos en Firebase que permita acceder a los datos de una forma mas segura. También, entre los sensores se puede agregar un mecanismo de codificado de la información, como lo es el seudobinario u otras que permitan el cifrado de los datos y evitar el espionaje de la información.

Bibliografía

- [1] J. Lopez, “Determinación de los requerimientos nutricionales de la piña variedad md2 en suelos ácidos del municipio de santander de quilichao,” Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58735>
- [2] T. y. S. R. Madhumathi, R. y Arumuganathan, “Análisis de npk y humedad del suelo mediante redes de sensores inalámbricos,” in *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*.
- [3] A. B. V. Cristancho and L. Corredor. (1991) Cultivo de piña. [Online]. Available: "https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5505/cultivo_de_pi%F1a.PD?sequence=1"
- [4] FAO, “Major tropical fruits - statistical compendium 2017,” Rome, 2019.
- [5] MinAgricultura. (2018) Producción de piña llegaría a más 950 mil toneladas en 2018, calcula minagricultura. [Online]. Available: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Producci%C3%B3n-de-pi%C3%B1a-llegar%C3%ADa-a-m%C3%A1s-950-mil-toneladas-en-2018,-calcula-MinAgricultura-.aspx>
- [6] X. Gonzalez. (2019) La producción de piña en colombia llegaría a 1,18 millones de toneladas al finalizar el año. [Online]. Available: <https://www.agronegocios.co/agricultura/la-produccion-de-pina-en-colombia-llegaria-a-118-millones-de-toneladas-al-finalizar-el-ano-2895397>
- [7] FAO, “Food outlook: Biannual report on global food markets,” Rome, 2021.
- [8] MinAgricultura. (2019, Junio) Cadena de la piña. [Online]. Available: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Documentos/2019-06-30%20Cifras%20Sectoriales%20PI%C3%91A.pdf>
- [9] U. D. O. AGRICULTURE. (2023, Junio) Fooddata central. [Online]. Available: <https://fdc.nal.usda.gov/>
- [10] L. R. Rojas. (2020, Noviembre) Colombia es un país rico en variedades locales de piña. [Online]. Available: <https://www.redagricola.com/co/colombia-es-un-pais-rico-en-variedades-locales-de-pina/>
- [11] G. Lemaire, L. Tang, G. Bélanger, Y. Zhu, and M.-H. Jeuffroy, “Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture,”

- European Journal of Agronomy*, vol. 125, p. 126248, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030121000204>
- [12] K. Sanchez, "Diseño de un estimador no lineal para predecir el nivel de nitrógeno en suelo agrícola," Trabajo de grado - Pregrado, Universidad Católica de San Pablo, Arequipa, Peru, 2018. [Online]. Available: https://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/UCSP/15668/1/SANCHEZ_MORA_KAT_EST.pdf
- [13] Taidacent suelo npk sensor. [Online]. Available: https://www.amazon.com/-/es/Taidacent-Sensores-Detector-Nitr%C3%B3geno-nitr%C3%B3geno/dp/B08MXXSP59/ref=sr_1_3?adgrpid=97158540610&gclid=CjwKCAiA4veMBhAMEiwAU4XRr-4fIRfh7YhXSOsEn7N79tL8TIwaBhP4Pwqu-lcM4hPt39yOSIJwmRoC12cQAvD_BwE&hvadid=523259518268&hvdev=c&hvlocphy=1003668&hvnetw=g&hvqmt=b&hvrnd=17629681884738473077&hvtargid=kwd-1458210106948&hydacr=12309_13240617&keywords=soil+npk+sensor&qid=1637774488&qsid=146-8591556-7095837&sr=8-3&sres=B08MXXSP59%2CB097NDY9Y3%2CB0821HXSPF%2CB0836WYNJ1%2CB099Q22TBJ%2CB08QS2Y1GZ%2CB07H869T9M%2CB0000DI845%2CB00E1N3R3O%2CB0080GQY56%2CB000HHLJQA%2CB07QXZC8TQ%2CB076DDWDJK%2CB098S1BH4V%2CB00CJIDFAS%2CB07BR52P26%2CB014MJ8J2U%2CB07JM621R3%2CB08PG3QB7D%2CB000LLOUKY
- [14] Waterproof agricultural soil npk sensor. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/pla/Waterproof-4-20ma-RS485-agricultural-soil-npk_62538782600.html?mark=google_shopping&biz=pla&pcy=US&searchText=Soil+Npk+Ph+Sensor&src=sem_ggl&from=sem_ggl&cmpgn=14481873034&adgrp=126684537997&fditm=&tgt=pla-293946777986&locintrst=&locphyscl=1003668&mtchtyp=&ntwrk=u&device=c&dvcmdl=&creative=542728307213&plcmnt=&plcmntcat=&p1=&p2=&acid=&position=&localKeyword=&pla_prdid=62538782600&pla_country=CO&pla_lang=en&gclid=CjwKCAiA4veMBhAMEiwAU4XRr40TNG1_Cy15y5RrjjyaOnM_5Ka7cfDizdpSDspbQaSTsjvFnAdfJhoCwCwQAvD_BwE
- [15] Detector de fertilizante para agricultura de suelo 3 en 1. [Online]. Available: https://es.aliexpress.com/item/4001229897593.html?spm=a2g0o.search0304.0.0.19302d027yO4Qx&algo_pvid=29fe400c-12eb-4a66-998c-48c61a95858b&algo_exp_id=29fe400c-12eb-4a66-998c-48c61a95858b-1
- [16] Detector de smart nutrients. [Online]. Available: https://www.ebay.com/itm/High-Precision-Smart-Nutrients-Fertilizer-Detector-IP68-Soil-NPK-Sensor-Arduino-/254293224212?norover=1&mkevt=1&mkrld=21553-225709-2056-0&mkcld=2&keyword=&rlp=436738225643_&MT_ID=&geo_id=&rlsatarget=dsa-19959388920&adpos=&device=c&loc=1003668&poi=&abcld=&cmpgn=644328398&sitelnk=&adgroupid=29412

- 698887&network=g&matchtype=b&gclid=CjwKCAiA4veMBhAMEiwAU4XRrw3bpf4ovLRWgmyid6IPYYRp0eBhnZ_NiqU2fkA3mALsngxslPI55hoCLCgQAvD_BwE
- [17] A. Guerrero and A. M. Mouazen, "Evaluation of variable rate nitrogen fertilization scenarios in cereal crops from economic, environmental and technical perspective," *Soil and Tillage Research*, vol. 213, p. 105110, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721001835>
- [18] G. Lavanya, C. Rani, and P. Ganeshkumar, "An automated low cost iot based fertilizer intimation system for smart agriculture," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 28, p. 100300, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210537918302567>
- [19] FAO, "Food outlook: Biannual report on global food markets," Rome, 2023.
- [20] Mercasa, "Frutas ¿qué variedades son más apreciadas y por qué?" *Mercasa*, 2022, <https://www.mercasa.es/wp-content/uploads/2022/02/Pina.pdf>.
- [21] J. Morales, "El cultivo de la piña perolera," *Repositorio Institucional Agrosavia. Corporación colombiana de investigación agropecuaria.*, 2002.
- [22] D. A. Rebolledo, I. D. Uriza, D. A. Perez, M. L. Rebolledo, and D. R. Zetina, *La piña y su cultivo en México: Cayena Lisa y MD2*, 1st ed. Alfa y Omega, 2011.
- [23] ANFFE, "Importancia de los fertilizantes en la agricultura actual productiva y sostenible," 2008. [Online]. Available: <http://www.anffe.com/noticias/2008/2008-06-02%20La%20importancia%20de%20los%20fertilizantes%20en%20una%20agricultura%20actual%20productiva%20y%20sostenible/LA%20IMPORTANCIA%20DE%20LOS%20FERTILIZANTES.pdf>
- [24] M. Khaydukova, D. Kirsanov, S. Sarkar, S. Mukherjee, J. Ashina, N. Bhattacharyya, S. Chanda, R. Bandyopadhyay, and A. Legin, "One shot evaluation of npk in soils by "electronic tongue"," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 186, p. 106208, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921002258>
- [25] H. INSTRUMENTS, "Instrumentación en agricultura. agua de riego, hidroponía y suelo." [Online]. Available: <https://www.drogallega.es/u/ficheros/representaciones/0x97FB417C167411E1B11983F6C49D8B77.10.pdf>
- [26] M. M. y R. Mohamad Syamim Aizuddin y S. Rosidah y J Zuriati, "Detección de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio (npk) del suelo mediante un transductor óptico,"

- in *2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*.
- [27] M. Shylaja, SN y Veena, “Monitoreo en tiempo real del análisis de nutrientes del suelo usando wsn,” in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*.
- [28] M. Masrie, A. Z. M. Rosli, S. Rosidah, J. Zuriati, and N. M. Khairi, “Sensor óptico integrado para la detección de nutrientes del suelo npk,” in *2018 IEEE 5th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*.
- [29] G. K. Kumar, C. Rahul, and J. R. C, “Un marco novedoso para el monitoreo inteligente de cultivos usando internet de las cosas (iot),” in *2018 Primera Conferencia Internacional sobre Computación y Comunicación Cibernéticas Seguras (ICSCCC)*.
- [30] A. Archana, V. S. Sankari, and S. S. Nair, “An economically mobile device for the on-site testing of soil nutrients by studying the spectrum,” *Materials Today: Proceedings*, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321042474>
- [31] Npk tester medidor de nutrientes. [Online]. Available: <https://tpmequipos.com/npk-tester-medidor-de-nutrientes-probador-suelo-tierra.html>
- [32] Detector de suelo (sensor de medidor npk). [Online]. Available: https://www.amazon.com/-/es/inteligente-fertilizantes-nutrientes-herramienta-jardinero/dp/B097NDY9Y3/ref=sr_1_12?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2NCC5TF6RJFMP&keywords=npk+test+kit&qid=1637829350&qsid=146-8591556-7095837&srefix=npk+test%2Caps%2C257&sr=8-12&sres=B0000DI845%2CB00FGPLZZS%2CB004W6JC2U%2CB0080GQY56%2CB072LP4DGL%2CB0189GFI94%2CB0019AI7PU%2CB097NDY9Y3%2CB00DBSY6B2%2CB079GMTHFD%2CB00BMAXMRA%2CB013P2UNF6%2CB000HHLJQA%2CB0091GUNYM%2CB0109TZTDE%2CB07XRF8BJV%2CB00WIRPQLQ%2CB09JG49G8Y%2CB07Q2DW8FK%2CB094VSSZ7B
- [33] Agricultura npk sensor. [Online]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/agriculture-npk-sensor-n-p-k-meter-soil-nutrient-tester-testing-kit-soil-analyzer-for-npk-1600062014157.html>
- [34] Equipo de prueba de suelo. [Online]. Available: <https://es.aliexpress.com/i/1005001620243485.html>

- [35] Soil npk sensor. [Online]. Available: https://www.jxctiot.com/product1/product195.html?gclid=CjwKCAiA4veMBhAMEiwAU4XRr-6T4V-tRO6UDrNkzGgibpbYdCGJfab4wSrnvBpKiKJwLG2JMAKJphoCWgkQAvD_BwE
- [36] Luster leaf gardening products - soil test kits. [Online]. Available: http://www.lusterleaf.com/nav/soil_test.html
- [37] Luster leaf 1601 rapitest kit. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/1601-Rapitest-nitr%C3%B3geno-f%C3%B3sforo-paquete/dp/B0000DI845>
- [38] Kit de prueba rapitest 1601. [Online]. Available: <https://www.ebay.com/itm/363529866018?epid=1431690411&hash=item54a4118b22:g:ObUAAOSwy11fkunv>
- [39] Kit de prueba de suelo rapitest. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-607163101-kit-de-prueba-de-suelo-rapitest-npk-ph-medidor-soil-_JM
- [40] J. Joskowicz, “Reglas y prácticas en extreme programming,” *Universidad de Vigo*, vol. 22, 2008.
- [41] C. Cav and A. Altın-Kayhan, “Coverage hole optimization with a mobile sensor in wireless sensor networks for smart grid,” *Ad Hoc Networks*, vol. 140, 2023. [Online]. Available: www.scopus.com
- [42] “Blynk iot platform: For businesses and developers.” [Online]. Available: <https://blynk.io/>
- [43] [Online]. Available: <https://firebase.google.com/>
- [44] [Online]. Available: <https://cloud.arduino.cc/>
- [45] [Online]. Available: <https://appinventor.mit.edu/about-us>

7.1. Anexo 1 - Información proporcionada por los agricultores

Se relaciona la clase textural del suelo (gruesa, franca gruesa, franca fina, fina y muy fina), con las dosis de aplicación de fertilizantes.

NUTRIENTES: N - P - K

Parámetro	Nivel o Categoría		
	Bajo	Medio	Alto
Materia Orgánica - (%)	< 2.00	2.00 - 4.00	> 4.00
Potasio - K (meq./100 gr)	< 0.20	0.20 - 0.40	> 0.40
Fósforo - P (ppm)	< 10.0	10.0 - 20.0	> 20.0

NUTRIENTES: Ca - Mg - S.

Se analizan los parámetros: CALCIO (Ca), MAGNESIO (Mg), AZUFRE (S), C.I.C. y la RELACION Ca/Mg:

Parámetros meq/100 gr.	Nivel		
	Bajo	Medio	Alto
CALCIO (Ca)	< 4	4 - 10	> 10
MAGNESIO (Mg)	< 2	2 - 5	> 5
SODIO (Na)	Debe ser menor de 1 o será tóxico		
C.I.C	< 10	10 - 25	> 25

En el caso del AZUFRE (S) los niveles utilizados son:

AZUFRE (ppm)	Deficiente	Medio	Alto	Excesivo
	< 5	5 - 10	10 - 30	> 30

MICRONUTRIENTES

Los niveles críticos generales para elementos menores son:

Elemento	Niveles (ppm)		
	Bajo	Medio	Alto
Boro (B)	< 0.20	0.20 - 0.40	> 0.40
Cobre (Cu)	< 1.00	1.00 - 4.00	> 4.00
Manganeso (Mn)	< 5.00	5.00 - 10.00	> 10.00
Hierro (Fe)	< 25.00	25.00 - 50.00	> 50.00
Zinc (Zn)	< 1.50	1.50 - 3.00	> 3.00
Molibdeno (Mo)	< 0.10		

Año	MATERIA Orgánica, %	P (Orgánica) ppm	K mg/g 1.14.10 ²¹
1980	2.5 - 5.4	0.9 - 1.6	0.16 - 0.13
1996	3.27 - 5.0	3.1 - 3.8	0.08 - 0.22
1999	3.2 - 4.8	1.8 - 2.8	0.04 - 0.18
2000	3.1 - 5.5	0.7 - 0.4	0.30 - 1.60

Estos no son datos atmosféricos son rangos de valores encontrados en varios niveles de suelo en Hilo el Congo. Estos pueden llegar niveles superiores de los niveles de arriba pero se han multiplicado de aprox. 180-200 veces de arriba y de abajo.

Normalmente no se le hace Nitrógeno al suelo, se enriquece a partir de

$$(K) \text{ Nitrógeno} = \frac{\text{Materia Orgánica}}{20} \quad \text{N asimilable} = N_{ppm} \times 0.15$$

La Materia orgánica de suelos por. Carbono orgánico X 172.

Relación C:N Ideal = :

7.2. Anexo 2 - Código para el spline cúbico

```
function splineCubicoInterpolacion(x, y)
    % Calcular spline cubico
    pp = spline(x, [0, y, 0]);

    % Obtener los coeficientes
    coefs = pp.coefs;

    % Imprimir los coeficientes
    fprintf('Coeficientes_del_spline_cubico:\n');
    for i = 1:size(coefs, 1)
        fprintf('Intervalo_%d: [%f, %f, %f, %f]\n', i, coefs(i, :));
    end

    % Crear una espacio para graficar el spline
    xx = linspace(min(x), max(x), 100);
    yy = ppval(pp, xx);

    % Graficar los puntos de muestra y el spline c bico
    plot(x, y, 'ro', xx, yy, 'b-');
    legend('Puntos_de_muestra', 'Spline_cubico');
    xlabel('x');
    ylabel('y');
end
```

7.3. Anexo 3 - Esquemáticos y modelo 3D de los circuitos

Nodo sensor

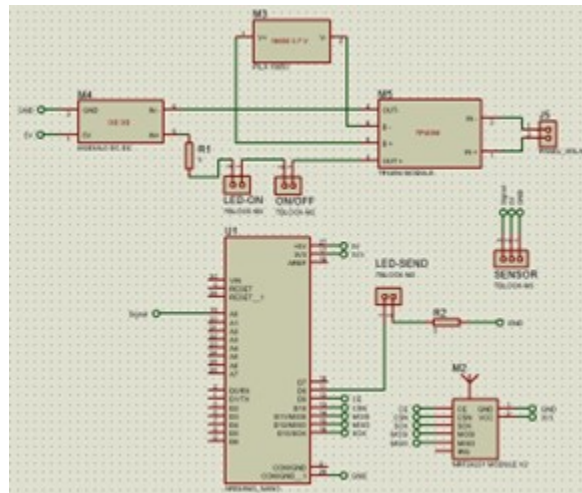


Figura 7.1: Esquemático de conexiones de un nodo sensor



Figura 7.2: Modelo 3D de la PCB del nodo sensor

Nodo Gateway

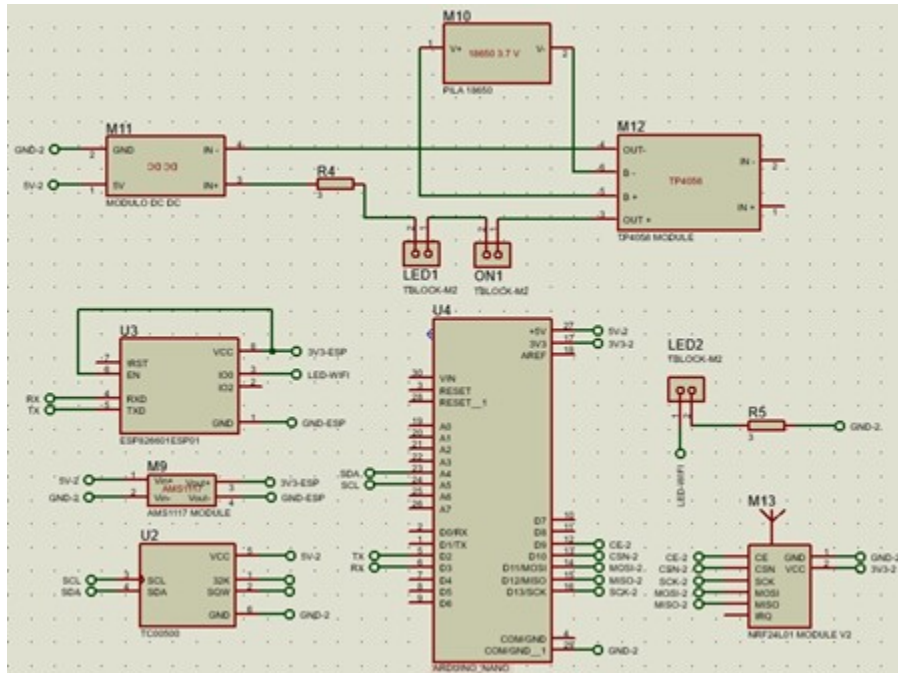


Figura 7.3: Esquemático de conexiones de un nodo Gateway.



Figura 7.4: Modelo 3D de la PCB del nodo Gateay

7.4. Anexo 4 - Diseño y construcción de cajas

Generación de ideas

Al momento de generar las ideas para el diseño de las cajas protectoras de los nodos sensores se tuvieron en cuenta diferentes aspectos relacionados tanto con el correcto funcionamiento del sistema como con la apariencia estética de este mismo. Se realizaron diferentes bocetos en donde se tenían en cuenta las mejores ubicaciones para cada uno de los módulos que componen el sistema y además también se tuvieron en cuenta aspectos como la altura ideal del nodo sensor para facilitar el proceso de verificación de funcionamiento y dar facilidad de acceso al sistema para los mantenimientos de este mismo.

A continuación, presentamos el boceto final resultante de la generación de ideas.

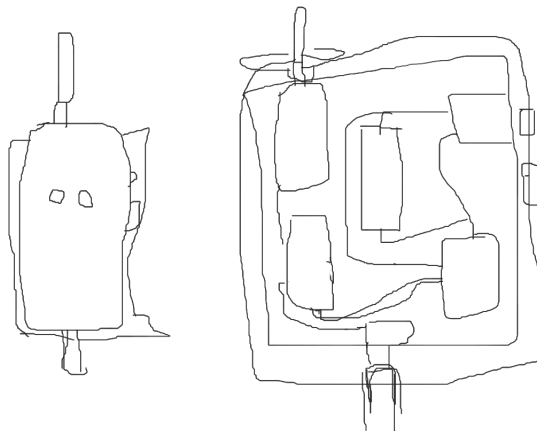


Figura 7.5: Boceto nodo gateway y nodo sensor

Diseño en Solidworks

A continuación se describe el diseño de las tres cajas protectoras para los tres diferentes dispositivos del sistema utilizando la aplicación de SolidWorks:

- Caja protectora del nodo sensor: esta cuenta con un diseño cuidadosamente elaborado en donde hemos tenido en cuenta la disposición de los puertos de conexión para permitir un acceso fácil a estos y así asegurar el encaje perfecto de todos los puertos. Esta es de una forma rectangular con sus aristas exteriores redondeadas para dar una mejor apariencia. Cuenta con un espacio específico en la parte superior para el posicionamiento del panel solar que recargará la batería. Además, se incorporaron algunas características de refuerzo y sujeción para asegurar la estabilidad y protección de los circuitos del nodo sensor.

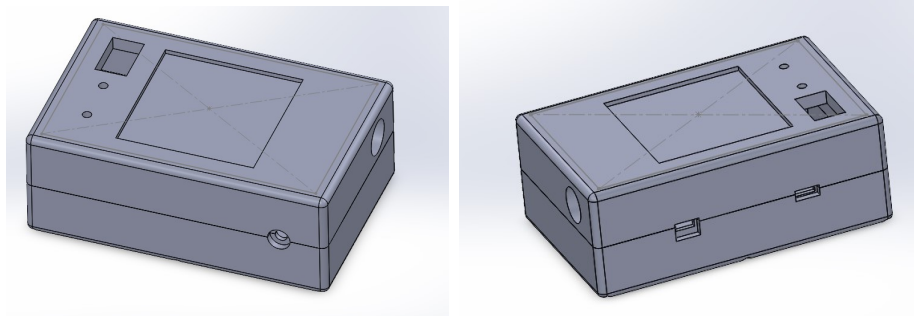


Figura 7.6: Diseño caja protectora del nodo sensor

- Caja protectora del nodo gateway: la caja protectora del nodo gateway es bastante similar a la caja del nodo sensor, a excepción de su longitud que es más larga y a que esta no posee el espacio para el panel solar. Este diseño también fue elaborado con una alta precisión que permite el correcto acoplamiento de los puertos de conexión, el botón de encendido y apagado. Esta cuenta con las mismas características de las aristas externas redondeadas y de forma rectangular.

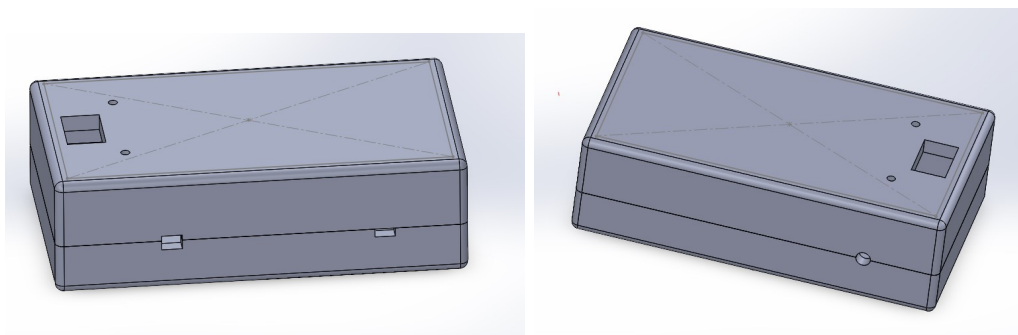


Figura 7.7: Diseño caja protectora del nodo gateway

- Caja protectora de la sonda de suelo: La caja protectora de la sonda de suelo fue diseñada con algunas características específicas. Se consideraron cuidadosamente las dimensiones y forma de la sonda, para lograr un ajuste perfecto dentro de la caja. siendo esta de un tamaño pequeño y cuadrado. Se prestó especial atención a la hermeticidad de la caja, implementando un sistema de sellado eficiente donde se dejaron varios salientes que encajan perfectamente con los agujeros de ajuste para de esta forma proteger la sonda contra filtraciones de agua o polvo.

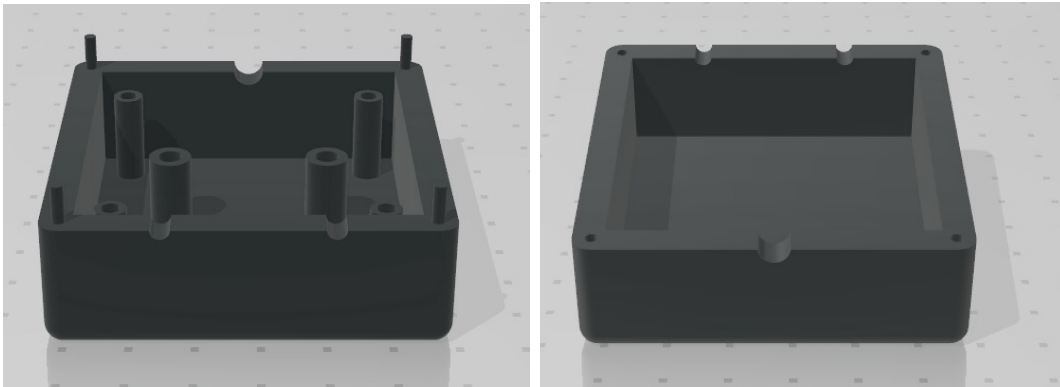


Figura 7.8: Diseño caja protectora de la sonda del sensor

Impresión e impermeabilización

Las tres cajas protectoras de los dispositivos (nodo gateway, nodo sensor y sonda de suelo) fueron fabricadas utilizando la impresión 3D y materiales de calidad como lo es el filamento PLA. Además, se aplicó un enfoque de impermeabilización para asegurar la protección adecuada contra la humedad y los elementos externos.

Una vez impresas las cajas utilizando filamentos de PLA los cuales son lo suficientemente resistentes para estar en la interperie, se utilizó silicona Gasket maker, un sellador resistente al agua y duradero, para crear sellos herméticos en las uniones y aberturas críticas de cada caja. Este sellador se aplicó cuidadosamente para garantizar la impermeabilidad y evitar filtraciones que puedan dañar los componentes internos de los dispositivos. El uso de silicona Gasket maker proporciona una barrera eficaz contra la humedad, asegurando que los dispositivos puedan funcionar de manera confiable en diversos entornos. Además, este enfoque de impermeabilización prolonga la vida útil de los dispositivos al protegerlos de posibles daños causados por el agua y los elementos externos.

Esta combinación de tecnologías y materiales garantiza la protección y el rendimiento óptimo de los dispositivos en diferentes condiciones ambientales.

7.5. Anexo 5 - Código para visualización de histórico

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <title>Tabla de Datos</title>
  <style>
    table {
```

```

    border-collapse: collapse;
    width: 100%;
  }
  th, td {
    border: 1px solid black;
    padding: 8px;
    text-align: left;
  }
</style>
</head>
<body>
  <h1>Historico de NPK</h1>
  <table id="tablaDatos">
    <thead>
      <tr>
        <th>Fecha</th>
        <th>Zona 1</th>
        <th>Zona 2</th>
        <th>Zona 3</th>
        <th>Zona 4</th>
        <th>Zona 5</th>
      </tr>
    </thead>
    <tbody>
      <!-- Las filas se generar n din micamente con JavaScript -->
    </tbody>
  </table>
  <script type="module">
    // Import the functions you need from the SDKs you need
    import { initializeApp } from "https://www.gstatic.com/firebasejs/9.23.0/firebase-app.js";
    import { getAnalytics } from "https://www.gstatic.com/firebasejs/9.23.0/firebase-analytics.js";
    import { getFirestore, collection, getDocs } from "https://www.gstatic.com/firebasejs/9.23.0/firebase-firestore.js";
    import { getAuth, signInWithEmailAndPassword } from "https://www.gstatic.com/firebasejs/9.23.0/firebase-auth.js";

    // Your web app's Firebase configuration
    const firebaseConfig = {
      apiKey: "AIzaSyBuFzpKWpYnykdIe-AGH5RsTQjlvG4dlzs",
      authDomain: "npk-monitoring.firebaseio.com",
      databaseURL: "https://npk-monitoring-default-rtdb.firebaseio.com",
      projectId: "npk-monitoring",
      storageBucket: "npk-monitoring.appspot.com",
    };
  </script>

```

```
messagingSenderId: "339869496032",
appId: "1:339869496032:web:8564935e520b87bfb11685",
measurementId: "G-C3Z3KJ1ZPE"
};

// Usuario y contraseña
const email = "historico@prueba.com";
const password = "historico123";

// Initialize Firebase
const firebase = initializeApp(firebaseConfig);
const auth = getAuth(firebase)

async function autenticar(auth, email, password) {
  try {
    const userCredentials = await signInWithEmailAndPassword(auth, email,
      password)
  } catch (error) {
    var errorCode = error.code;
    var errorMessage = error.message;

    if (errorCode === 'auth/wrong-password') {
      alert('Wrong password. ');
    } else {
      alert(errorMessage);
    }
  }

  console.log(error);
}

const db = getFirestore(firebase);

// Obtener los datos de Firestore
async function getFechas(db) {
  const fechasNPK = collection(db, 'Historico NPK');
  const fechasSnapshot = await getDocs(fechasNPK);
  const fechasList = fechasSnapshot.docs.map(doc => doc.data());
  return fechasNPK;
}

// Obtener fechasList y agregar los datos a la tabla
async function getAndPopulateData() {
  const fechasNPK = await getFechas(db);
  const fechasSnapshot = await getDocs(fechasNPK);
```

```

const tablaBody = document.getElementById("tablaDatos").
  getElementsByTagName("tbody")[0];

fechasSnapshot.forEach((doc) => {
  const fechaItem = doc.data();
  const fechaId = doc.id;

  const row = tablaBody.insertRow();
  const fechaCell = row.insertCell(0);
  const zona1Cell = row.insertCell(1);
  const zona2Cell = row.insertCell(2);
  const zona3Cell = row.insertCell(3);
  const zona4Cell = row.insertCell(4);
  const zona5Cell = row.insertCell(5);

  fechaCell.innerHTML = fechaId;
  zona1Cell.innerHTML = 'N: ${fechaItem['Zona 1'].Nitrogeno} ppm <br>P: ${
    fechaItem['Zona 1'].Fosforo} ppm <br>K: ${fechaItem['Zona 1'].
    Potasio} ppm';
  zona2Cell.innerHTML = 'N: ${fechaItem['Zona 2'].Nitrogeno} ppm <br>P: ${
    fechaItem['Zona 2'].Fosforo} ppm <br>K: ${fechaItem['Zona 2'].
    Potasio} ppm';
  zona3Cell.innerHTML = 'N: ${fechaItem['Zona 3'].Nitrogeno} ppm <br>P: ${
    fechaItem['Zona 3'].Fosforo} ppm <br>K: ${fechaItem['Zona 3'].
    Potasio} ppm';
  zona4Cell.innerHTML = 'N: ${fechaItem['Zona 4'].Nitrogeno} ppm <br>P: ${
    fechaItem['Zona 4'].Fosforo} ppm <br>K: ${fechaItem['Zona 4'].
    Potasio} ppm';
  zona5Cell.innerHTML = 'N: ${fechaItem['Zona 5'].Nitrogeno} ppm <br>P: ${
    fechaItem['Zona 5'].Fosforo} ppm <br>K: ${fechaItem['Zona 5'].
    Potasio} ppm';
});
}

autenticar(auth, email, password);
// Obtener fechasNPK y mostrarlo en la consola
getFechas(db).then(fechasNPK => {
  console.log(fechasNPK);
}).catch(error => {
  console.error("Error al obtener las fechas:", error);
});
// Llamar a la función para obtener y mostrar los datos
getAndPopulateData().then(() => {
  console.log("Datos cargados en la tabla correctamente.");
}).catch(error => {
  console.error("Error al obtener y mostrar los datos:", error);
});

```

```

    });

</script>
</body>
</html>

```

7.6. Anexo 6 - Código para el módulo Wifi ESP8266

```

/* Codigo firmware Modulo Wifi
 * Proyecto de Grado
 * Monitoreo de NPK en suelo
 * Autor: Juan David Ordo ez Zambrano
 */

#include <Arduino.h>
#include <ESP8266WiFi.h> // incluye libreria para el modulo esp8266
#include <Firebase_ESP_Client.h> // incluye libreria conexion con Firebase
#include <stdint.h> // incluye libreria para tener enteros de 2 bytes

// Proporciona informacion sobre el proceso de generacion de tokens.
#include <addons/TokenHelper.h>

/* 1. Nombre y clave de la red Wifi */
#define WIFI_SSID "Familia_ceron"
#define WIFI_PASSWORD "natajuanjo125"
// #define WIFI_SSID "wifi"
// #define WIFI_PASSWORD "11111111"

/* 2. Definir el API Key de la base de datos Firestore*/
#define API_KEY "AIzaSyBuFzpKWpYnykdIe-AGH5RsTQjlvG4dlzs"

/* 3. Definir el ID del proyecto */
#define FIREBASE_PROJECT_ID "npk-monitoring"
#define DATABASE_URL "npk-monitoring-default-rtdb.firebaseio.com"

/* 4. Definir el Email y contraseña del usuario registrado en el proyecto (no
es la cuenta con la que se abre Firebase) */
#define USER_EMAIL "cultivopina@prueba.com"
#define USER_PASSWORD "pina12345"

// Crear un objeto Firebase para Firestore
FirebaseData fbdo;

```

```
FirebaseAuth auth;
FirebaseConfig config;

// Crear un objeto Firebase para RealTime
FirebaseData RTfbdo;
FirebaseAuth RTauth;
FirebaseConfig RTconfig;

unsigned long dataMillis = 0;
int ledError = 0;
String fecha = "";

struct PayloadStruct { // estructura para almacenar los datos que lleguen de
    cada sensor
    int16_t nodeID;
    int16_t nitrogeno;
    int16_t fosforo;
    int16_t potasio;
};

struct Zonas { // estructura Zonas para almacenar los datos de cada zona
    int16_t day;
    int16_t month;
    int16_t years;
    PayloadStruct zona1;
    PayloadStruct zona2;
    PayloadStruct zona3;
    PayloadStruct zona4;
    PayloadStruct zona5;
};

Zonas datos; // crear una variable de tipo estructura Zonas

// función de devolución de llamada de carga de carga til de Firestore.
void fcsUploadCallback(CFS_UploadStatusInfo info)
{
    if (info.status == fb_esp_cfs_upload_status_init)
    {
        Serial.printf("\nUploading_data_(%d)... \n", info.size);
    }
    else if (info.status == fb_esp_cfs_upload_status_upload)
    {
        Serial.printf("Uploaded_%d%s\n", (int)info.progress, "%");
    }
    else if (info.status == fb_esp_cfs_upload_status_complete)
    {
```

```

        Serial.println("Upload_completed_");
    }
    else if (info.status == fb_esp_cfs_upload_status_process_response)
    {
        Serial.print("Processing_the_response...");
    }
    else if (info.status == fb_esp_cfs_upload_status_error)
    {
        Serial.printf("Upload_failed,_%s\n", info.errorMsg.c_str());
    }
}

void setup()
{
    pinMode(ledError, OUTPUT);
    Serial.begin(115200); //inicia la comunicacion serial
    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD); // inicia la conexion wifi
    Serial.print("Connecting_to_Wi-Fi");
    unsigned long ms = millis();
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
    {
        digitalWrite(ledError, HIGH);
        Serial.print(".");
        delay(300);
    }
    digitalWrite(ledError, LOW);
    Serial.println();
    Serial.print("Connected_with_IP:");
    Serial.println(WiFi.localIP());
    Serial.println();

    Serial.printf("Firebase_Client_v%s\n\n", FIREBASE_CLIENT_VERSION);

    /*Asignar el API key */
    config.api_key = API_KEY;
    /* Asignar email y contrase a */
    auth.user.email = USER_EMAIL;
    auth.user.password = USER_PASSWORD;

    /* Asigne la funci n de devoluci n de llamada para la tarea de
    generaci n de tokens de larga duraci n*/
    config.token_status_callback = tokenStatusCallback;

    // En ESP8266 requerido para BearSSL rx/tx buffer para el manejo de datos
    de gran tama o , aumentar el tama o de Rx seg n sea necesario.
    fbdo.setBSSLBufferSize(2048, 2048);

```

```

// Limitar el tamaño de la carga til de respuesta que se recoger en
// FirebaseData
fbdo.setResponseSize(2048);

Firebase.begin(&config, &auth);
Firebase.reconnectWiFi(true);
Serial.println(sizeof(datos));

// conexion a base de datos RealTime
RTconfig.api_key = API_KEY;

/* Assign the user sign in credentials */
RTauth.user.email = USER_EMAIL;
RTauth.user.password = USER_PASSWORD;

/* Assign the RTDB URL (required) */
RTconfig.database_url = DATABASE_URL;

/* Assign the callback function for the long running token generation task
*/
RTconfig.token_status_callback = tokenStatusCallback; // see addons/
// TokenHelper.h
RTfbdo.setBSSLBufferSize(2048, 2048);
RTfbdo.setResponseSize(2048);

Firebase.begin(&RTconfig, &RTauth);
Firebase.reconnectWiFi(true);
Firebase.setDoubleDigits(5);
RTconfig.timeout.serverResponse = 10 * 1000;
}

void loop() {

if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
digitalWrite(ledError, HIGH);
} else {
digitalWrite(ledError, LOW);
}
Firebase.ready(); //debe ser llamado repetidamente para manejar tareas de
autenticación.

if (Serial.available() >= sizeof(datos)) {
if (Serial.read() == '\x3b') {
// leer la informacion y almacenar en la variable datos

```

```

    int bytesRead = Serial.readBytes((byte*)&datos, sizeof(datos));
    // imprime la trama de datos recibida
    byte* ptz = (byte*)&datos;
    size_t dataSize = sizeof(datos);
    for (size_t i = 0; i < dataSize; i++) {
        Serial.print(ptz[i], HEX);
        Serial.print(' ');
    }
    Serial.println();
    fecha = String(datos.day) + "-" + String(datos.month) + "-" + String(
        datos.years); // concatena los datos dia, mes y a o para formar un
        string con la fecha
    }
}

if (Firebase.ready() && (millis() - dataMillis > 60000 || dataMillis == 0)
)
{
    dataMillis = millis();

    // For the usage of FirebaseJson, see examples/FirebaseJson/BasicUsage
    // Create.ino
    FirebaseJson content;

    // Note: If new document created under non-existent ancestor documents
    // , that document will not appear in queries and snapshot
    // https://cloud.google.com/firestore/docs/using-console#non-
    // existent_ancestor_documents.

    // We will create the document in the parent path "a0/b?"
    // a0 is the collection id, b? is the document id in collection a0.

    String documentPath = "Historico%20NPK/" + fecha; // Ruta donde se
        creara el nuevo documento
    // Si la ruta contiene espacio se deben reemplazar con %20

    // definir los valores que se cargaran. Se utiliza un timpo de dato
    // Map para cada zona. Cada Zona cuenta con tres datos enteros (N,P,K
    // )
    // Zona 1
    content.set("fields/Zona_1/mapValue/fields/Nitrogeno/integerValue",
        String(datos.zona1.nitrogeno));
    content.set("fields/Zona_1/mapValue/fields/Fosforo/integerValue",
        String(datos.zona1.fosforo));
}

```

```
content.set("fields/Zona_1/mapValue/fields/Potasio/integerValue",
    String(datos.zona1.potasio));
/**caragar a RealTime DataBase
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_1/Nitrogeno"), datos.
    zona1.nitrogeno);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_1/Nitrogeno"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_1/Fosforo"), datos.zona1.
    fosforo);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_1/Fosforo"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_1/Potasio"), datos.zona1.
    potasio);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_1/Potasio"));

// Zona 2
content.set("fields/Zona_2/mapValue/fields/Nitrogeno/integerValue",
    String(datos.zona2.nitrogeno));
content.set("fields/Zona_2/mapValue/fields/Fosforo/integerValue",
    String(datos.zona2.fosforo));
content.set("fields/Zona_2/mapValue/fields/Potasio/integerValue",
    String(datos.zona2.potasio));
/**caragar a RealTime DataBase
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_2/Nitrogeno"), datos.
    zona2.nitrogeno);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_2/Nitrogeno"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_2/Fosforo"), datos.zona2.
    fosforo);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_2/Fosforo"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_2/Potasio"), datos.zona2.
    potasio);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_2/Potasio"));

// Zona 3
content.set("fields/Zona_3/mapValue/fields/Nitrogeno/integerValue",
    String(datos.zona3.nitrogeno));
content.set("fields/Zona_3/mapValue/fields/Fosforo/integerValue",
    String(datos.zona3.fosforo));
content.set("fields/Zona_3/mapValue/fields/Potasio/integerValue",
    String(datos.zona3.potasio));
/**caragar a RealTime DataBase
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_3/Nitrogeno"), datos.
    zona3.nitrogeno);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_3/Nitrogeno"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_3/Fosforo"), datos.zona3.
    fosforo);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_3/Fosforo"));
```

```

Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_3/Potasio"), datos.zona3.
    potasio);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_3/Potasio"));

// Zona 4
content.set("fields/Zona_4/mapValue/fields/Nitrogeno/integerValue",
    String(datos.zona4.nitrogeno));
content.set("fields/Zona_4/mapValue/fields/Fosforo/integerValue",
    String(datos.zona4.fosforo));
content.set("fields/Zona_4/mapValue/fields/Potasio/integerValue",
    String(datos.zona4.potasio));
/*caragar a RealTime DataBase
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_4/Nitrogeno"), datos.
    zona4.nitrogeno);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_4/Nitrogeno"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_4/Fosforo"), datos.zona4.
    fosforo);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_4/Fosforo"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_4/Potasio"), datos.zona4.
    potasio);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_4/Potasio"));

// Zona 5
content.set("fields/Zona_5/mapValue/fields/Nitrogeno/integerValue",
    String(datos.zona5.nitrogeno));
content.set("fields/Zona_5/mapValue/fields/Fosforo/integerValue",
    String(datos.zona5.fosforo));
content.set("fields/Zona_5/mapValue/fields/Potasio/integerValue",
    String(datos.zona5.potasio));
/*caragar a RealTime DataBase
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_5/Nitrogeno"), datos.
    zona5.nitrogeno);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_5/Nitrogeno"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_5/Fosforo"), datos.zona5.
    fosforo);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_5/Fosforo"));
Firebase.RTDB.setInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_5/Potasio"), datos.zona5.
    potasio);
Firebase.RTDB.getInt(&RTfbdo, F("/ZONAS/ZONA_5/Potasio"));

Serial.println("Create_a_documento...");

// verifica y crea documento nuevo
if (Firebase.Firestore.createDocument(&fbdo, FIREBASE_PROJECT_ID, ""
    /* databaseId can be (default) or empty */, documentPath.c_str(),
    content.raw()))

```

```

        // //      Serial.printf("ok|n%s|n|n", fbdo.payload().c_str());
        Serial.println();
    else
        Serial.println(fbdo.errorReason());
    }
}

```

7.7. Anexo 7 - Código para el nodo sensor

```

/*Codigo firmware Nodo sensor
 *Proyecto de Grado
 *Monitoreo de NPK en suelo
 * Author: Juan David Ordo ez
 */
#include "LowPower.h"
#include <SPI.h>
#include "printf.h"
#include "RF24.h"

// inicial un objeto para el modulo nRF24L01
RF24 radio(9, 10); // usa el pin 9 para el pin CE, y el pin 10 pin CSN.

// array de direcciones para los canales de transmisi n
uint64_t address[6] = { 0x7878787878LL,
                        0xB3B4B5B6F1LL,
                        0xB3B4B5B6CDLL,
                        0xB3B4B5B6A3LL,
                        0xB3B4B5B60FLL,
                        0xB3B4B5B605LL };

char role = 3; // seleccionar el id de nodo TX numeros entre 0-5

struct PayloadStruct { // estructura para almacenar los datos que lleguen de
    cada sensor a traves del modulo NRF24L01
    unsigned long nodeID;
    unsigned long nitrogeno;
    unsigned long fosforo;
    unsigned long potasio;
};

struct CubicSpline { // estructura para intervalos de spline cubico
    float a, b, c, d, x;

```

```

};

PayloadStruct payload; // crear una variable de tipo estructura PayloadStruct

int nitrogeno;
int fosforo;
int potasio;
int sensorPin = A0;
const int ledTransmission = 8;
void setup() {
  pinMode(ledTransmission , OUTPUT); //definir pin como salida

  Serial.begin(115200); // iniciar comunicaci n serial
  while (!Serial) {
  }

  // inicializar el modulo NRF24L01 en el bus SPI
  if (!radio.begin()) {
    Serial.println(F("radio_hardware_is_not_responding!!"));
    while (1) {} // bucle infinito que detiene la ejecuci n del programa
  }

  Serial.println("Nodo_sensor_" + String(role) + "_activado");
  radio.setPALevel(RF24_PA_MAX); // configurar nivel de potencia.
  radio.setPayloadSize(sizeof(payload)); // configurar el tama o de la cargar
    util que recibir
  payload.nodeID = role; // asignar el id
  radio.stopListening(); // configurar en modo transmisor TX
  radio.openWritingPipe(address[role]);
  radio.setRetries(((role * 3) % 12) + 3, 15);
} // setup()

void loop() {
  int sleepSeg = 89640; // 23:59 horas en segundos **Para las pruebas
    utilizaremos 5 minutos = 300 s ** 89640 s
  int valorSensor = analogRead(sensorPin);
  float sonda = valorSensor * (5.0 /1023.0);

  payload.nitrogeno = calculaN(sonda);
  payload.fosforo = calculaP(sonda);
  payload.potasio = calculaK(sonda);
  transmitir();
  delay(1000); // espera 1 segundo para la transmision
  sleep(sleepSeg); //llama a la funcion sleep
  delay(3000);
}

```

```

} //loop

float calculaN(float x) {
    CubicSpline splines[] = {
        {8442.090183, -2250.943970, 0.000000, 368.000000, 1.0}, // Coeficientes
            del primer spline
        {-2473.477938, 534.945791, -188.759800, 352.000000, 2.0}, // Coeficientes
            del segundo spline
        {1249.533142, -207.097591, -155.974980, 336.000000, 3.0}, // .....
        {-979.625370, 205.248346, -156.178397, 318.000000, 4.0},
        {838.696390, -118.028026, -146.584161, 302.000000, 5.0},
        {-1249.551131, 133.580891, -145.028875, 287.000000, 6.0},
        {2887.688303, -278.770982, -160.999785, 271.000000, 7.0},
        {-1109.089552, 587.535509, -130.123332, 255.000000, 8.0},
        {-1675.605668, -144.463596, -32.647511, 243.000000, 9.0},
        {-644.658187, -848.217976, -171.622931, 231.000000, 10.0},
        {16251.311325, -1060.955178, -381.631978, 201.000000, 11.0},
        {-15670.177176, 2839.359540, -239.359629, 172.000000, 12.0},
        {8807.780287, -921.482982, -85.929505, 163.000000, 13.0},
        {-36609.241791, 1720.851104, -5.992692, 154.000000, 14.0},
        {488345.385231, -9261.921433, -760.099725, 134.000000, 15.0},
        {-348118.716712, 20038.801681, -544.562120, 119.000000, 16.0},
        {617841.781887, -21735.444325, -612.427826, 107.000000, 17.0},
        {-91286.660098, 15335.062588, -740.435461, 91.000000, 18.0},
        {21204.107004, -3835.136032, 64.559398, 83.000000, 19.0},
        {-1317.470806, 617.726439, -160.659274, 76.000000, 20.0},
        {-563.932562, 64.388700, -65.163154, 62.000000, 21.0},
        {2748.146935, -392.396675, -153.725307, 38.000000, 22.0},
        {-679.948229, 514.491814, -140.294842, 20.000000, 23.0}, // ....
        {221.031168, -77.063145, -13.440528, 6.000000, 24.0} // Coeficientes el
            ultimo spline
    };

    size_t numSplines = sizeof(splines) / sizeof(splines[0]);

    // Buscar el intervalo adecuado para evaluar el spline
    size_t i;
    for (i = 0; i < numSplines; i++) {
        if (x <= splines[i].x) {
            break;
        }
    }

    // Asegurarse de no salirse del rango de los splines
    if (i == 0) {

```

```

    i = 1;
} else if (i >= numSplines) {
    i = numSplines - 1;
}

// Evaluar el spline en el punto dado
float dx = x - splines[i - 1].x;
float result =
    splines[i - 1].a +
    splines[i - 1].b * dx +
    splines[i - 1].c * dx * dx +
    splines[i - 1].d * dx * dx * dx;

return result;
} // calculaNitrogeno

float calculaP(float x) {
    CubicSpline splines[] = {
        {-1032.751798, 207.391612, -70.411643, 137.000000, 1.0},
        {623.739109, -102.433928, -59.915875, 131.000000, 2.0},
        {-504.945694, 103.399978, -59.809609, 124.000000, 3.0},
        {171.435282, -63.232101, -55.391143, 118.000000, 4.0},
        {45.975835, -11.801516, -62.894504, 112.000000, 5.0},
        {348.486430, 3.370509, -63.821915, 105.000000, 6.0},
        {-247.055513, 107.916438, -52.693220, 99.000000, 7.0},
        {-425.550049, -55.140200, -41.082448, 90.000000, 8.0},
        {600.816641, -233.871221, -81.544047, 82.000000, 9.0},
        {2192.845293, -35.601729, -111.186072, 71.000000, 10.0},
        {-4214.808238, 490.681141, -74.779719, 63.000000, 11.0},
        {5928.233773, -520.872836, -77.195054, 58.000000, 12.0},
        {-16223.712148, 1257.597296, -3.522608, 51.000000, 13.0},
        {152262.100822, -3609.516348, -238.714513, 47.000000, 14.0},
        {-75417.338577, 5526.209701, -200.380646, 42.000000, 15.0},
        {101911.284950, -3523.870928, -120.287095, 38.000000, 16.0},
        {-17401.057970, 2590.806169, -138.948391, 35.000000, 17.0},
        {7151.352671, -1063.416005, -32.031079, 32.000000, 18.0},
        {-1086.804996, 438.368056, -75.784436, 27.000000, 19.0},
        {-157.798465, -18.090043, -16.945514, 22.000000, 20.0},
        {1127.111178, -145.906799, -61.224661, 13.000000, 21.0},
        {-320.269327, 226.039890, -52.410021, 6.000000, 22.0},
        {124.694412, -52.594425, -2.110836, 2.000000, 29.0} // Coeficientes el
        ultimo spline
    };

    size_t numSplines = sizeof(splines) / sizeof(splines[0]);

```

```

// Buscar el intervalo adecuado para evaluar el spline
size_t i;
for (i = 0; i < numSplines; i++) {
    if (x <= splines[i].x) {
        break;
    }
}

// Asegurarse de no salirse del rango de los splines
if (i == 0) {
    i = 1;
} else if (i >= numSplines) {
    i = numSplines - 1;
}

// Evaluar el spline en el punto dado
float dx = x - splines[i - 1].x;
float result =
    splines[i - 1].a +
    splines[i - 1].b * dx +
    splines[i - 1].c * dx * dx +
    splines[i - 1].d * dx * dx * dx;

return result;
} // calculaFosforo

float calculaK(float x) {
    CubicSpline splines [] = {
        {5512.218049, -1432.790266, 0.000000, 210.000000, 1.0},
        {-1350.382555, 386.241690, -115.120343, 200.000000, 2.0},
        {-112.286055, -18.873077, -78.383482, 191.000000, 3.0},
        {153.262323, -55.927475, -86.611543, 182.000000, 4.0},
        {388.725576, -5.350908, -93.352165, 172.000000, 5.0},
        {-933.631952, 111.266765, -82.760579, 163.000000, 6.0},
        {1185.590889, -196.831779, -92.172731, 154.000000, 7.0},
        {-241.775202, 158.845487, -95.971360, 144.000000, 8.0},
        {-881.870567, -0.726146, -61.185105, 128.000000, 9.0},
        {-39.730833, -371.111784, -113.242415, 117.000000, 10.0},
        {8135.480263, -384.222959, -196.329237, 100.000000, 11.0},
        {-11540.577338, 1568.292304, -101.603689, 86.000000, 12.0},
        {9240.063131, -1201.446257, -72.256006, 82.000000, 13.0},
        {-19171.390515, 1570.572682, -35.343363, 72.000000, 14.0},
        {199968.578770, -4180.844472, -296.370542, 65.000000, 15.0},
        {-149405.489834, 7817.270254, -223.642026, 59.000000, 16.0},
    };
}

```

```

    {294086.319575, -10111.388526, -315.406757, 53.000000, 17.0},
    {-44397.854626, 7533.790648, -366.958715, 45.000000, 18.0},
    {9653.563644, -1789.758823, 35.123513, 41.000000, 19.0},
    {-495.571384, 237.489542, -73.535337, 38.000000, 20.0},
    {-222.098265, 29.349561, -36.177862, 31.000000, 21.0},
    {1052.497602, -150.550034, -68.901990, 19.000000, 22.0},
    {-247.721561, 196.774175, -63.817334, 11.000000, 23.0},
    {86.794860, -18.743583, -12.188463, 3.000000, 24.0} // Coeficientes el
        ultimo spline
};

size_t numSplines = sizeof(splines) / sizeof(splines[0]);

// Buscar el intervalo adecuado para evaluar el spline
size_t i;
for (i = 0; i < numSplines; i++) {
    if (x <= splines[i].x) {
        break;
    }
}

// Asegurarse de no salirse del rango de los splines
if (i == 0) {
    i = 1;
} else if (i >= numSplines) {
    i = numSplines - 1;
}

// Evaluar el spline en el punto dado
float dx = x - splines[i - 1].x;
float result =
    splines[i - 1].a +
    splines[i - 1].b * dx +
    splines[i - 1].c * dx * dx +
    splines[i - 1].d * dx * dx * dx;

return result;
} // calculaPotasio

void transmitir(){

    unsigned long start_timer = micros(); // start the timer
    bool report = radio.write(&payload, sizeof(payload)); // envia los datos y
        guarda el reporte
    unsigned long end_timer = micros(); // end the timer

```

```
if (report) { // si la transmision fue exitosa
  digitalWrite( ledTransmision , LOW); // Apagar led si la transmision
  funciona
  Serial.print(F("Reporte_del_nodo_sensor_"));
  Serial.print(payload.nodeID); // imprime en ID del nodo
  Serial.println(F(":"));
  Serial.print(F("Nitrogeno:_"));
  Serial.print(payload.nitrogeno); // imprime el valor de nitrogeno
  Serial.print(F(",_Fosforo:_"));
  Serial.print(payload.fosforo); // imprime el valor del fosforo
  Serial.print(F(",_Potasio:_"));
  Serial.print(payload.potasio); // imprime el valor del potasio
  Serial.println(F(""));
  Serial.print(F("_Time_to_transmit:_"));
  Serial.print(end_timer - start_timer); // imprime el tiempo
  Serial.println(F("_us"));
  Serial.println(F(""));
}
else {
  digitalWrite( ledTransmision , HIGH); // Enciende el led si la transmision
  falla
  Serial.println(F("Transmission_failed_or_timed_out")); // informa que no
  se realizo el envio
}
} //transmitir

void sleep(int sec) { //funcion para poner el arduino en modo sleep
  while (sec >= 8) {
    LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF);
    sec -= 8;
  }
  if (sec >= 4) {
    LowPower.powerDown(SLEEP_4S, ADC_OFF, BOD_OFF);
    sec -= 4;
  }
  if (sec >= 2) {
    LowPower.powerDown(SLEEP_2S, ADC_OFF, BOD_OFF);
    sec -= 2;
  }
  if (sec >= 1) {
    LowPower.powerDown(SLEEP_1S, ADC_OFF, BOD_OFF);
    sec -= 1;
  }
} //sleep
```

7.8. Anexo 8 - Código para el nodo gateway

```
/* Codigo firmware Nodo gateway
 * Proyecto de Grado
 * Monitoreo de NPK en suelo
 * Author: Juan David Ordo ez Zambrano
 */

#include <Arduino.h>
#include <SPI.h>
#include "printf.h"
#include "RF24.h" // incluye libreria para el modulo NRF24L01
#include <SoftwareSerial.h> // incluye libreria para comunicaci n serial por
software
#include <Wire.h> // incluye libreria para interfaz I2C
#include <RTClib.h> // incluye libreria para el modulo RTC

#define rxPin 2 // define el pin 2 como el pin de RX para la comunicaci n con
el modulo wifi
#define txPin 3 // define el pin 3 como el pin de TX para la comunicaci n con
el modulo wifi

// crear un objeto para el NRF24L01
RF24 radio(9, 10); // usa el pin 9 para el pin CE y el pin 10 para el pin CSN

RTC_DS3231 rtc; // crea objeto del tipo RTC_DS3231

// array de direcciones para los canales de transmisi n
uint64_t address[6] = { 0x7878787878LL,
0xB3B4B5B6F1LL,
0xB3B4B5B6CDLL,
0xB3B4B5B6A3LL,
0xB3B4B5B60FLL,
0xB3B4B5B605LL
};

struct PayloadStruct { // estructura para almacenar los datos que lleguen de
cada sensor a traves del modulo NRF24L01
int nodeID;
int nitrogeno;
int fosforo;
```

```
    int potasio;
};

struct Zonas { // estructura Zonas para almacenar los datos de cada zona,
               esta estructura sera la que se envíe al modulo wifi
    int day;
    int month;
    int years;
    PayloadStruct zona1;
    PayloadStruct zona2;
    PayloadStruct zona3;
    PayloadStruct zona4;
    PayloadStruct zona5;
};

PayloadStruct payload; // crear una variable de tipo estructura PayloadStruct
Zonas enviarZonas; // crear una variable de tipo estructura Zonas
SoftwareSerial mySerial(rxPin, txPin); // Configura los pines RX y TX del
SoftwareSerial para comunicarse con el modulo wifi
int dia, mes, year, hora, minuto, segundo; // crear variables para la fecha y
hora

void setup() {

    // iniciar comunicacion serial
    Serial.begin(115200);
    mySerial.begin(115200);

    if (!rtc.begin()) { // si falla la inicializacion del modulo
        Serial.println("Modulo_RTC_no_encontrado!"); // muestra mensaje de error
        while (1); // bucle infinito que detiene ejecucion del programa
    }
    rtc.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
    while (!Serial) {
        //// algunas placas necesitan esperar para asegurar el acceso a serie
        sobre USB
    }

    // inicializar el modulo NRF24L01 en el bus SPI
    if (!radio.begin()) { // si falla el modulo NRF24L01
        Serial.println(F("radio_hardware_is_not_responding!!"));
        while (1) {} // bucle infinito que detiene la ejecucion del programa
    }

    Serial.println("Nodo_Gateway_en_linea");
```

```
radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH); // configurar nivel de potencia.
radio.setPayloadSize(sizeof(payload)); // configurar el tamaño de la carga
    util que recibir
for (uint8_t i = 0; i < 6; ++i) // asignar las direcciones de cada canal
    radio.openReadingPipe(i, address[i]);
radio.startListening(); // configurar en modo receptor RX
} // setup()

void loop() {
    // obtener los valores de fecha y hora del modulo rtc
    DateTime fechas = rtc.now();
    dia = fechas.day();
    mes = fechas.month();
    year = fechas.year();
    hora = fechas.hour();
    minuto = fechas.minute();
    segundo = fechas.second();

    // agregar los valores de la fecha a la estructura enviarZonas
    enviarZonas.day = dia;
    enviarZonas.month = mes;
    enviarZonas.years = year;

    uint8_t pipe;
    if (radio.available(&pipe)) { // si hay datos en el buffer
        // guarda en numero del canal el cual esta recibiendo datos
        uint8_t bytes = radio.getPayloadSize(); // obtiene el tamaño de la carga
        // que esta en el buffer
        radio.read(&payload, bytes); // lee la carga y la almacena en
        // la estructura payload

        // Identificar de que zona vienen los datos y los asignan a las estructura
        // enviarZonas
        if (payload.nodeID == 1){
            enviarZonas.zona1 = payload;
        }
        else if (payload.nodeID == 2){
            enviarZonas.zona2 = payload;
        }
        else if (payload.nodeID == 3){
            enviarZonas.zona3 = payload;
        }
        else if (payload.nodeID == 4){
            enviarZonas.zona4 = payload;
        }
        else if (payload.nodeID == 5){
```

```
    enviarZonas.zona5 = payload;
}

Serial.print(F("Recibiendo_"));
Serial.print(bytes); // imprime el tamaño de la trama recibida desde un
    nodo sensor
Serial.print(F("_bytes_en_pipe_"));
Serial.print(pipe); // imprime el canal por el cual se están recibiendo
    los datos
Serial.print(F("_desde_nodo_sensor_"));
Serial.print(payload.nodeID); // imprime el ID del nodo sensor que está
    recibiendo
Serial.print(F(". _Nitrogeno:_"));
Serial.print(payload.nitrogeno); // imprime el valor de nitrógeno
Serial.print(F(", _Fosforo:_"));
Serial.print(payload.fosforo); // imprime el valor del fósforo
Serial.print(F(", _Potasio:_"));
Serial.println(payload.potasio); // imprime el valor del potasio
}
if (minuto % 5 == 0){ // Para la prueba vamos a enviar cada 5 minutos *
    enviar los datos si son las 12:00 pm (hora == 12 && minuto == 0)
    mySerial.write('\x3b'); // carácter para identificar el inicio de la trama
    mySerial.write((uint8_t*)&enviarZonas, sizeof(enviarZonas)); // enviar
        trama de datos al módulo wifi
}
delay(1000);
} // loop
```

7.9. Anexo 9 - Encuesta de Evaluación del Sistema de Monitoreo de NPK en el Cultivo de Piña

Agradecemos su participación en esta encuesta para evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo de NPK en el cultivo de piña. Sus respuestas son valiosas para mejorar nuestro sistema y brindarle un mejor servicio. Por favor, responda las siguientes preguntas de manera honesta y objetiva.

¿Ha utilizado la aplicación móvil para acceder a los datos de NPK en tiempo real del cultivo de piña?

- a) Sí
- b) No

En una escala del 1 al 5, siendo 1 “Muy difícil” y 5 “Muy fácil”, ¿qué tan fácil fue para usted utilizar la aplicación móvil?

- a) 1 - Muy difícil
- b) 2 - Difícil
- c) 3 - Neutral
- d) 4 - Fácil
- e) 5 - Muy fácil

¿La aplicación móvil le proporcionó información clara y comprensible sobre los valores de NPK en cada zona del cultivo?

- a) Sí
- b) No

¿Ha consultado el historial de datos de NPK del cultivo a través de la aplicación móvil?

- a) Sí
- b) No

En una escala del 1 al 5, siendo 1 “Muy insatisfactorio” y 5 “Muy satisfactorio”, ¿qué tan satisfecho/a está con la funcionalidad del sistema de monitoreo de NPK?

- a) 1 - Muy insatisfactorio
- b) 2 - Insatisfactorio

- c) 3 - Neutral
- d) 4 - Satisfactorio
- e) 5 - Muy satisfactorio

¿Ha encontrado alguna dificultad técnica o mal funcionamiento en el sistema de monitoreo de NPK? Si es así, por favor especifique.

¿Recomendaría el sistema de monitoreo de NPK a otros agricultores?

- a) Sí
- b) No

¿Tiene algún comentario adicional o sugerencia para mejorar el sistema de monitoreo de NPK?

Al firmar y responder esta encuesta, certifico que he probado la aplicación y que la información proporcionada es verídica.

Nombre: _____

Cargo: _____

Firma: _____

Agradecemos su tiempo y sus respuestas. Sus comentarios son de gran importancia para nosotros. Si tiene alguna pregunta adicional, por favor contáctenos.

Encuesta de Evaluación del Sistema de Monitoreo de NPK en el Cultivo de Piña

Agradecemos su participación en esta encuesta para evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo de NPK en el cultivo de piña. Sus respuestas son valiosas para mejorar nuestro sistema y brindarle un mejor servicio. Por favor, responda las siguientes preguntas de manera honesta y objetiva.

1. ¿Ha utilizado la aplicación móvil para acceder a los datos de NPK en tiempo real del cultivo de piña?

- a) Sí
- b) No

2. En una escala del 1 al 5, siendo 1 "Muy difícil" y 5 "Muy fácil", ¿qué tan fácil fue para usted utilizar la aplicación móvil?

- a) 1 - Muy difícil
- b) 2 - Difícil
- c) 3 - Neutral
- d) 4 - Fácil
- e) 5 - Muy fácil

3. ¿La aplicación móvil le proporcionó información clara y comprensible sobre los valores de NPK en cada zona del cultivo?

- a) Sí
- b) No

4. ¿Ha consultado el historial de datos de NPK del cultivo a través de la aplicación móvil?

- a) Sí
- b) No

5. En una escala del 1 al 5, siendo 1 "Muy insatisfactorio" y 5 "Muy satisfactorio", ¿qué tan satisfecho/a está con la funcionalidad del sistema de monitoreo de NPK?

- a) 1 - Muy insatisfactorio
- b) 2 - Insatisfactorio
- c) 3 - Neutral
- d) 4 - Satisfactorio
- e) 5 - Muy satisfactorio

6. ¿Ha encontrado alguna dificultad técnica o mal funcionamiento en el sistema de monitoreo de NPK? Si es así, por favor especifique. **FALTA**

7. ¿Recomendaría el sistema de monitoreo de NPK a otros agricultores?

a) **SI** **ES MUY IMPORTANTE**
b) No

8. ¿Tiene algún comentario adicional o sugerencia para mejorar el sistema de monitoreo de NPK? **TENER EN CUENTA LAS VARIABLES AGRICOLAS**

Al firmar y responder esta encuesta, certifico que he probado la aplicación y que la información proporcionada es verídica.

Nombre: **MARILYN CAMPO**

Cargo: **ADMONISTRADORA DE CAMPO**

Firma: **[Firma manuscrita]**

Agradecemos su tiempo y sus respuestas. Sus comentarios son de gran importancia para nosotros. Si tiene alguna pregunta adicional, por favor contáctenos.

Encuesta de Evaluación del Sistema de Monitoreo de NPK en el Cultivo de Piña

Agradecemos su participación en esta encuesta para evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo de NPK en el cultivo de piña. Sus respuestas son valiosas para mejorar nuestro sistema y brindarle un mejor servicio. Por favor, responda las siguientes preguntas de manera honesta y objetiva.

1. ¿Ha utilizado la aplicación móvil para acceder a los datos de NPK en tiempo real del cultivo de piña?
 - a) Sí
 - b) No
2. En una escala del 1 al 5, siendo 1 "Muy difícil" y 5 "Muy fácil", ¿qué tan fácil fue para usted utilizar la aplicación móvil?
 - a) 1 - Muy difícil
 - b) 2 - Difícil
 - c) 3 - Neutral
 - d) 4 - Fácil
 - e) 5 - Muy fácil
3. ¿La aplicación móvil le proporcionó información clara y comprensible sobre los valores de NPK en cada zona del cultivo?
 - a) Sí
 - b) No
4. ¿Ha consultado el historial de datos de NPK del cultivo a través de la aplicación móvil?
 - a) Sí
 - b) No
5. En una escala del 1 al 5, siendo 1 "Muy insatisfactorio" y 5 "Muy satisfactorio", ¿qué tan satisfecho/a está con la funcionalidad del sistema de monitoreo de NPK?
 - a) 1 - Muy insatisfactorio
 - b) 2 - Insatisfactorio
 - c) 3 - Neutral
 - d) 4 - Satisfactorio
 - e) 5 - Muy satisfactorio

6. ¿Ha encontrado alguna dificultad técnica o mal funcionamiento en el sistema de monitoreo de NPK? Si es así, por favor especifique.

No, ninguna

7. ¿Recomendaría el sistema de monitoreo de NPK a otros agricultores?

- a) Sí
b) No

8. ¿Tiene algún comentario adicional o sugerencia para mejorar el sistema de monitoreo de NPK?

Tal vez considerar que se puedan realizar comparaciones entre zonas y enviar notificaciones al celular si ocurre algo con el cultivo.

Al firmar y responder esta encuesta, certifico que he probado la aplicación y que la información proporcionada es verídica.

Nombre: Jhon Freddy Vuas

Cargo: Auxiliar Agrícola

Firma: Jhon Freddy Vuas F.

Agradecemos su tiempo y sus respuestas. Sus comentarios son de gran importancia para nosotros. Si tiene alguna pregunta adicional, por favor contáctenos.

Encuesta de Evaluación del Sistema de Monitoreo de NPK en el Cultivo de Piña

Agradecemos su participación en esta encuesta para evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo de NPK en el cultivo de piña. Sus respuestas son valiosas para mejorar nuestro sistema y brindarle un mejor servicio. Por favor, responda las siguientes preguntas de manera honesta y objetiva.

1. ¿Ha utilizado la aplicación móvil para acceder a los datos de NPK en tiempo real del cultivo de piña?
 - a) Sí
 - b) No
2. En una escala del 1 al 5, siendo 1 "Muy difícil" y 5 "Muy fácil", ¿qué tan fácil fue para usted utilizar la aplicación móvil?
 - a) 1 - Muy difícil
 - b) 2 - Difícil
 - c) 3 - Neutral
 - d) 4 - Fácil
 - e) 5 - ~~Muy~~ fácil
3. ¿La aplicación móvil le proporcionó información clara y comprensible sobre los valores de NPK en cada zona del cultivo?
 - a) Sí
 - b) No
4. ¿Ha consultado el historial de datos de NPK del cultivo a través de la aplicación móvil?
 - a) Sí
 - b) No
5. En una escala del 1 al 5, siendo 1 "Muy insatisfactorio" y 5 "Muy satisfactorio", ¿qué tan satisfecho/a está con la funcionalidad del sistema de monitoreo de NPK?
 - a) 1 - Muy insatisfactorio
 - b) 2 - Insatisfactorio
 - c) 3 - Neutral
 - d) Satisfactorio
 - e) 5 - Muy satisfactorio

6. ¿Ha encontrado alguna dificultad técnica o mal funcionamiento en el sistema de monitoreo de NPK? Si es así, por favor especifique.

Se necesita una buena conexión de internet para el buen funcionamiento.

7. ¿Recomendaría el sistema de monitoreo de NPK a otros agricultores?

- a) Sí
b) No

8. ¿Tiene algún comentario adicional o sugerencia para mejorar el sistema de monitoreo de NPK?

Considero importante el uso de este tipo de tecnologías para tener mejores cosechas. Se podrían agregar más sensores como Ph y humedad que también son importantes.

Al firmar y responder esta encuesta, certifico que he probado la aplicación y que la información proporcionada es verídica.

Nombre: Arlys Hernández

Cargo: Ingeniero Agrónomo

Firma: Arlys Hernández

Agradecemos su tiempo y sus respuestas. Sus comentarios son de gran importancia para nosotros. Si tiene alguna pregunta adicional, por favor contáctenos.

7.11. Anexo 11 - Manual de usuario del sensor NPK meter tester

JXCT[®]



JXBS-3001-NPK-RS

Soil NPK Sensor User Manual

RS485 Modbus
Version: 2.0
Date: 2020-10-24
Status: Released

www.jxct-iot.com

Contents

1 Introduction	3
1.1 Product Overview.....	3
1.2 Parameters	3
1.3 Structure & Size.....	3
1.4 System Frame Diagram	4
2 Installation & Wiring	5
2.1 Product & Accessories	5
2.2 Interface Description	6
2.3 Surface measurement method	6
2.4 Buried measurement method	7
2.5 Remarks	7
3 Software.....	8
3.1 Sensor access to the computer.....	8
3.2 Use of sensor monitoring software.....	8
3.3 Modify the baud rate and device ID.....	9
4 Communication Protocol	10
4.1 Communication Basic Parameters.....	10
4.2 Data Frame Format Definition.....	10
4.3 Register Address	11
4.4 Communication Protocol Examples.....	11

1 INTRODUCTION

1.1 Product Overview

The NPK sensor is designed for detecting the content of nitrogen, phosphorus and potassium in soil, determining the fertility of the soil and facilitating the evaluation of the soil condition by the customer system.

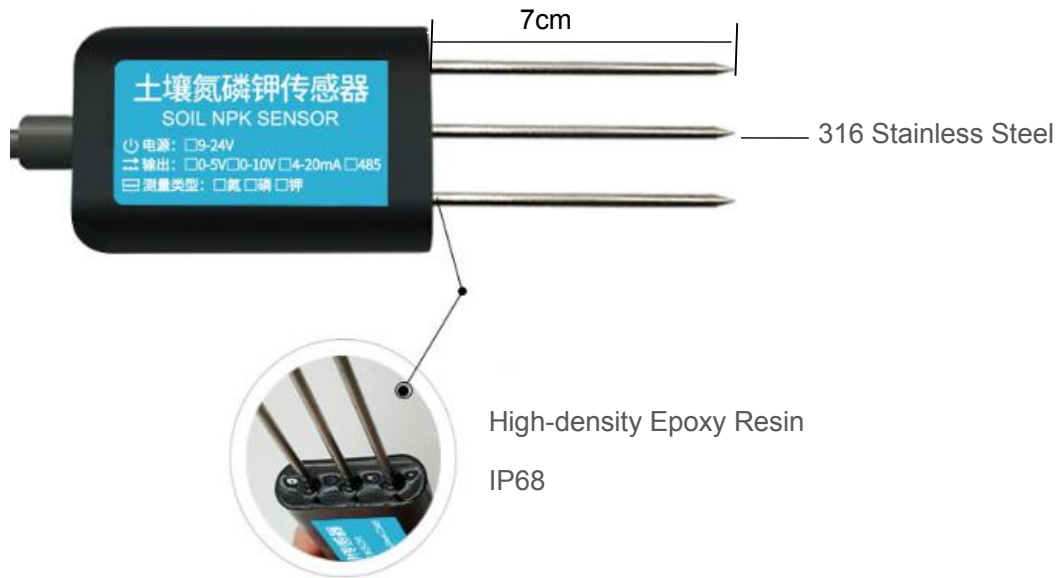
The product can be widely used in rice fields, greenhouse cultivation, rice, vegetable cultivation, orchard nursery, flowers and soil research.

1.2 Parameters

Parameters	Technical Specs
Measure Range	0-1999mg/kg
Accuracy	±2%F.s
Resolution	1mg/kg(mg/l)
Response Time (T90, Seconds)	<10s
Working Temperature	5-45°C
Working Humidity	5-95%RH (Relative humidity), no condensation
Baud Rate	2400/4800/9600
Communication Port	RS485
Power Supply	12V-24V DC

1.3 Structure & Size

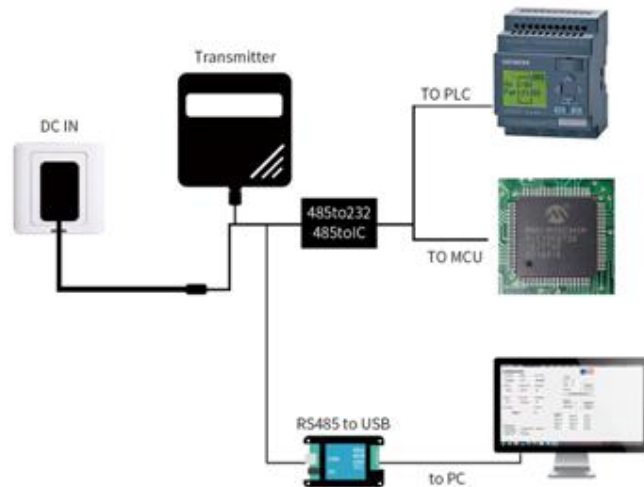
The sensors probes are made of 316 stainless steel for anti-rust and electrolysis resistance, salt and alkali corrosion resistance purpose, to ensure the long-term operation of the probe part. Sensor body is made IP68, filled with high-density epoxy resin for high-temperature vacuum filling, effectively preventing moisture from. Rs485 Cable length is 0.6m by default. Can be customized.



1.4 System Frame Diagram

The device can be connected directly to the PLC with 485 interface, and it can be connected to the MCU through the 485 interface chip. The microcontroller and PLC can be programmed to match the sensor by the modbus protocol specified later. User can also connect the sensor to the computer by using USB to 485 converter, and use the sensor configuration tool provided by JXCT for configuration and testing.

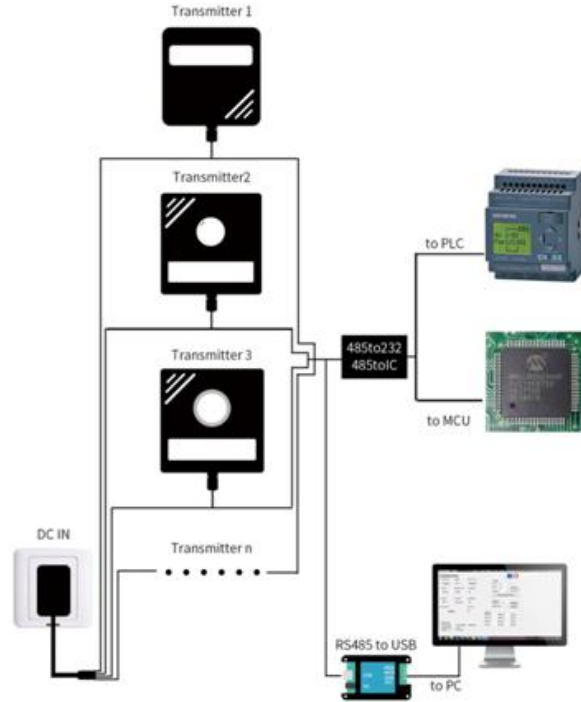
Picture 1: Single Sensor Working Diagram



This product can also be used in combination with multiple sensors on one 485 bus. Please observe the “485 Bus Field Wiring Code” when performing 485 bus combination (see Appendix). In theory, one bus can connect more than 16 485

sensors. If you need to connect more 485 sensors, you can use 485 repeater to expand more 485 devices, and the other end to connect PLC with 485 interface and pass 485 interface chip. Connect to the micro-controller, or use USB to 485 to connect to the computer, use the sensor configuration tool provided by our company for configuration and testing.

Picture 2: Multiple Sensors Working Diagram



2 Hardware Connections

2.1 Product & Accessories

Check the list of devices before installation:

Product Name	Qty
Soil NPK Sensor	1 Pc
12V Power Adapter (Optional)	1 Pc
485 to USB Converter (Optional)	1 Pc

2.2 Interface Description

The power interface can be 12-24V for wide voltage power supply. When wiring the 485 signal line, note that the A/B lines cannot be connected in reverse, and the addresses between multiple devices on the bus cannot conflict.



Function	Cable Color	Specs
Power	Brown	Power supply +
	Black	Power supply -
Communication	Yellow (grey)	485-A
	Blue	485-B

Note: Please be careful not to connect the wrong line sequence. The wrong wiring will cause the device to burn out.

The factory default supply of 1.5 meters long wire, customers can extend the wire as needed or in sequence.

Note that there is no yellow line in the line sequence that may be provided in some factory batches, in which case the gray line is equivalently replaced by the yellow line.

2.3 Surface Measurement Method

Select the appropriate measurement location, avoid the stone, ensure that the steel needle will not touch the hard object, throw off the topsoil according to the required measurement depth, keep the original soil tightness under the ground, hold the sensor vertically into the soil, insert It is not allowed to sway from side to side. It is recommended to measure the average for multiple measurements within a small range of one measurement point.



2.4 Buried Measurement Method

Vertically dig pits with a diameter of >20cm, insert the sensor steel needle horizontally into the pit wall at a given depth, fill the pits tightly, and stabilize for a period of time, then measure and record for several days, months or even longer.



2.5 Remarks

1. The steel needle must be inserted into the soil during the measurement.
2. Avoid strong sunlight directly on the sensor for high temperature. Use in the field to

prevent lightning strikes.

3. Do not violently bend the steel needle, do not pull the sensor lead wire, do not beat or violently hit the sensor.
4. The sensor protection class IP68 can soak the sensor in the water.
5. Due to the presence of radio frequency electromagnetic radiation in the air, it is not suitable to be energized in the air for a long time.

3 Configuration Tool Installation

JXCT provides the matching "SENSOR MONITORING SOFTWARE", which can conveniently use the computer to read the parameters of the sensor, and flexibly modify the device ID and address of the sensor.

3.1 Sensor access to the computer

After the sensor is properly connected to the computer via USB to 485 and powered, find COM port in the computer ("My Computer - Properties - Device Manager - Port" to view the COM port). Shown as in below screenshot:



As shown in above, serial port number is COM10 at this time. Please remember this serial port. It shall be filled in the serial port number in the sensor monitoring software.

If the COM port is not found in the device manager, it means that you have not plugged in the USB to 485 or did not install the driver correctly, please contact the technical staff for assistance.

3.2 Use of sensor monitoring software

The configuration interface is as shown in the figure. First, obtain the serial port number according to the method in section 3.1 and select the correct serial port, then click to automatically obtain the current baud rate and address to automatically detect

all devices and baud rates on the current 485 bus. . Please note that there is only one sensor on the 485 bus that needs to be automatically acquired using the software.



Then click on the connected device to get sensor data information in real time.

If your device is a gas concentration sensor, please select “Gas Concentration Sensor” at the sensor type, “Formaldehyde Transmitter” for the formaldehyde sensor, “Analog Transmitter Module” for the analog transmitter, and “Atmospheric Pressure” for the atmospheric pressure sensor. “Sensor”, the illuminance sensor selects “Optical Light 20W”, the oxygen sensor selects “Oxygen Transmitter”, and the other sensors select the default “No Other Sensor”.

3.3 Modify the baud rate and device ID

In the case of disconnecting the device, click the device baud rate and setting address in the communication settings to complete the relevant settings. Please note that after the setting, please restart the device, and then "automatically obtain the current baud rate and address", you can find the address. And the baud rate has been changed to the address and baud rate you need.

If you need to modify the baud rate and address using the modbus command, you can refer to the appendix "How to Modify the Baud Rate and Address Using the modbus Command".

4 Communication Protocol

4.1 Communication Basic Parameters

Parameters	Specs
Coding	8-bit binary
Data bit	8-bit
Parity bit	no
Stop bit	1-bit
Error check	CRC(redundant cyclic code)
Baud Rate	2400bps/4800bps/9600bps.Can customize. Default 9600bps

4.2 Data Frame Format Definition

Adopt Modbus-RTU communication protocol, the format is as follows:

- Initial structure ≥ 4 bytes of time
- Address code = 1 byte
- Function code = 1 byte
- Data area = N bytes
- Error check = 16-bit CRC code
- End structure ≥ 4 bytes of time

Address code: is the address of the transmitter, which is unique in the communication network (factory default 0x01).

Function code: The instruction function of the command sent by the host. This transmitter only uses function code 0x03 (read register data).

Data area: The data area is the specific communication data. Note that the 16-bit data high byte is in front!

CRC code: Two-byte check code.

Inquiry Frame					
Address Code	Function Code	Register Start Address	Register Length	CRC_L	CRC_H
1bit	1bit	2bit	2bit	1bit	1bit

Answer Frames

Address code	Function Code	Effective number of bytes	Data area	Second data area	Nth data area	Check code
1bit	1bit	2bit	2bit	1bit	2bit	2bit

4.3 Register Address

Register Address	PLC or configuration address	Content	Operating
001E H	4001F (40021)	Nitrogen content (unit mg/kg)	Read-Only
001F H	40020 (40022)	Phosphorus content(unit mg/kg)	Read-Only
0020 H	40021 (40023)	Potassium content (unit mg/kg)	Read-Only
0100 H	40101	Device address(0-252)	Read/Write
0101 H	40102	Baud rate(2400/4800/9600)	Read/Write

4.4 Communication Protocol Examples

4.4.1 Read the Soil NPK Value from Device Address 0x01

Inquiry Frame

Address	Code	Function Code	Register Start Address	Register Length	CRC_L	CRC_H
0x01		0x03	0x00 0x1E	0x00 0x03	0x34	0x0D

Answer Frame

Address Code	Function Code	Effective number of bytes	Nitrogen content	Phosphorus content	Potassium content	CR C_L	CRC_H
0x01	0x03	0x06	0x00 0x20	0x00 0x25	0x00 0x30	0x5 A	0x3D

NPK content:

0020 H (hexadecimal) =32=>Nitrogen=32mg/kg

0025 H (hexadecimal) =37=>Phosphorus=37mg/kg

0030 H (hexadecimal) =48=>Potassium=48mg/kg

4.4.2 Reading the value of soil nitrogen at device address 0x01

Inquiry Frame

Address Code	Function Code	Register Start Address	Register Length	CRC_L	CRC_H
0x01	0x03	0x00 0x1e	0x00 0x01	0xB5	0xCC

Answer Frame

Address Code	Function Code	Effective No. of bytes	Nitrogen content	CRC_L	CRC_H
0x01	0x03	0x02	0x00 0x20	0x5A	0x3D

Nitrogen content : 0020 H (hexadecimal) =32=>Nitrogen=32mg/kg

4.4.3 Reading the Value of Soil Phosphorus in Device Address 0x01

Inquiry Frame

Address Code	Function Code	Register start address	Register length	CRC_L	CRC_H
0x01	0x03	0x00 0x1f	0x00 0x01	0xE4	0x0C

Answer Frame

Address Code	Function Code	Effective No. of bytes	Phosphorus content	CRC_L	CRC_H
0x01	0x03	0x02	0x00 0x25	0x5A	0x3D

Phosphorus content : 0025 H (16hexadecimal) =37=>Phosphorus=37mg/kg

4.4.4 Reading the Value of Soil Potassium in Device Address 0x01

Inquiry Frame						
Address Code	Function Code	Register start address	Register length	CRC_L	CRC_H	
0x01	0x03	0x00 0x20	0x00 0x01	0x85	0xC0	

Answer Frames						
Address Code	Function Code	Effective No. of bytes	Potassium content	CRC_L	CRC_H	
0x01	0x03	0x02	0x00 0x30	0x5A	0x3D	

Potassium : 0030 H (16hexadecimal) =48=>Potassium=48mg/kg