



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y RASTREO DE
PRODUCTOS AGRÍCOLAS UTILIZANDO IOT, CASO DE ESTUDIO CACAO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTORES: MARCELO DAVID LOJANO ANGAMARCA

RAFAEL BERNARDO MÉNDEZ VÁSQUEZ

TUTORA: ING. MÓNICA KAREL HUERTA, PhD.

CO-TUTOR: ING. ESTEBAN FERNANDO ORDOÑEZ MORALES, PhD.

Cuenca - Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Marcelo David Lojano Angamarca con documento de identificación N° 0302032313 y Rafael Bernardo Méndez Vásquez con documento de identificación N° 0105599070; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 13 de marzo del 2023

Atentamente,



Marcelo David Lojano Angamarca
0302032313



Rafael Bernardo Méndez Vásquez
0105599070

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Rafael Bernardo Méndez Vásquez con documento de identificación N° 0105599070 y Marcelo David Lojano Angamarca con documento de identificación N° 0302032313, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico con enfoque general: “Desarrollo de un sistema de monitoreo y rastreo de productos agrícolas utilizando IoT, caso de estudio cacao”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de marzo del 2023

Atentamente,



Marcelo David Lojano Angamarca
0302032313



Rafael Bernardo Méndez Vásquez
0105599070

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Mónica Karel Huerta con documento de identificación N° 0151450426, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y RASTREO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS UTILIZANDO IoT, CASO DE ESTUDIO CACAO, realizado por Marcelo Lojano Angamarca con documento de identificación N° 0302032313 y por Rafael Méndez Vásquez con documento de identificación N° 0105599070, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto técnico con enfoque general que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de marzo del 2023

Atentamente,



Ing. Mónica Karel Huerta, PhD.
0151450426

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento de Marcelo David Lojano Angamarca

A mis padres, les agradezco por su amor incondicional, paciencia y comprensión en todo momento. Su apoyo financiero y emocional fue esencial para alcanzar este logro.

Me siento afortunado de contar con unos padres tan maravillosos que siempre han estado a mi lado. Al grupo GITEL, les doy las gracias por brindarme la oportunidad de trabajar con ellos en este proyecto. Aprecio su confianza, experiencia y sabiduría, ya que fueron factores clave en el éxito de mi trabajo de titulación. Aprendí mucho de cada uno de los miembros del equipo y estoy agradecido por haber podido formar parte de él.

Agradecimiento de Rafael Bernardo Méndez Vásquez

A mi mami y mi hermano no puedo expresar con palabras lo agradecido que estoy por todo el apoyo que me han brindado durante mi tiempo en la universidad.

También quiero agradecer a mis abuelitos por su apoyo. Gracias por ayudarme a terminar mi carrera y por siempre creer en mí. Al grupo de investigación GITEL por darme la oportunidad de hacer mi trabajo de titulación con ellos. Gracias por darme la oportunidad de trabajar con ustedes, aprender de su experiencia y conocimientos, y hacer una contribución a la comunidad académica.

DEDICATORIA

Dedicatoria de Marcelo David Lojano Angamarca.

Dedico este trabajo a mis padres por su amor incondicional, apoyo y sacrificio incesante, y al grupo GITEL por su experiencia y conocimientos en la realización de mi trabajo de titulación. Agradezco a mis profesores por guiarme en mi formación académica, y a todas las personas que me alentaron a seguir adelante en los momentos más difíciles. Sin su ayuda, este logro no habría sido posible.

Dedicatoria de Rafael Bernardo Méndez Vásquez

A mi madre por guiarme en este largo camino que he llevado por delante, por darme sabiduría y valor. También a mi hermano por estar siempre a mi lado y ser mi motivación para ser alguien mejor. Al grupo de investigación GITEL por brindarme experiencia en la realización de este trabajo.

Índice General

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
INTRODUCCIÓN	XIII
0.1. Antecedentes del problema de estudio	XIII
0.2. Justificación del problema	XIV
0.3. Objetivos	XVI
0.3.1. Objetivo General	XVI
0.3.2. Objetivos Específicos	XVI
0.4. Beneficiarios	XVI
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	1
1.1. Internet de las cosas y red de sensores	1
1.1.1. Internet de las Cosas Internet of Things(IoT)	2
1.1.2. Arquitectura IoT	2
1.1.3. Aplicaciones	3

1.1.4.	Hardware y Software del Sistema IoT	3
1.1.5.	Protocolos de Comunicación	4
1.1.6.	Plataformas IoT	7
1.1.7.	Red de Sensores inalámbricos	8
1.1.8.	Características presentes en una red WSN	10
1.1.9.	Topología de WSN	11
1.1.10.	Aplicaciones de una red de sensores inalámbricos	12
1.2.	Sistemas de monitoreo y rastreo de productos agrícolas	12
1.2.1.	Monitoreo del clima	13
1.2.2.	Monitoreo del suelo	13
1.2.3.	Monitoreo de enfermedades	14
1.2.4.	Monitoreo de temperatura	14
1.2.5.	Monitoreo de gases de efecto invernadero	14
1.2.6.	Control de plagas y fertilización	15
1.2.7.	Sistemas tracking	15
1.3.	Redes celulares	15
1.3.1.	Arquitectura de una red 4G LTE	17
1.3.2.	Aplicaciones de la Cuarta Generación de la red móvil	18
1.4.	Del uso de la tecnología en monitoreo y rastreo del cultivo a monitorear	19
1.4.1.	Vehículos Aéreos no Tripulados	19
1.4.2.	Agricultura de Precisión	20
1.4.3.	Implementación de robots basados en Inteligencia Artificial	21
1.4.4.	Realidad Aumentada	21
2.	MARCO METODOLÓGICO	22
2.1.	Análisis de cultivo a monitorear	22
2.1.1.	Taxonomía y descripción botánica del cacao	23
2.1.2.	Tipos de cacao	24
2.1.3.	Características para la siembra del cacao	27
2.2.	Diseño del sistema de monitoreo	30
2.2.1.	Estructura	30

2.2.2.	Fipy	31
2.2.3.	Pytrack	34
2.2.4.	ESP32	35
2.2.5.	SIM808	36
2.2.6.	Gateway LoRa MileSigth UG67	37
2.2.7.	Rastreo GPS con Red celular	38
2.3.	Diseño del software del sistema, visualización y bases de datos.	40
2.3.1.	Amazon Web Service a ChirpStack	40
2.3.2.	Registro de Dispositivos GPS en ChirpStack usando red LoRa	41
2.3.3.	Thingsboard	43
2.3.4.	Visualización	46
2.4.	Diseño de los escenarios de las pruebas.	48
2.4.1.	Primer escenario: Campus Universitario	48
2.4.2.	Segundo escenario: Cultivo de cacao	49
2.5.	Implementación del sistema.	51
2.5.1.	Implementación del Sistema Campus Universitario	51
2.5.2.	Implementación del Sistema Uzhupud	53
3.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	56
3.1.	Resultados de las pruebas e implementación del sistema en el laboratorio de la universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.	56
3.1.1.	Red LoRa	56
3.1.2.	Red Celular	60
3.2.	Resultados de las pruebas e implementación del sistema en Uzhupud.	63
3.2.1.	Red LoRa	65
3.2.2.	Red Celular	71
3.3.	Análisis de costos del sistema	73
3.4.	Conclusiones	75
3.5.	Recomendaciones	76
	GLOSARIO	78

REFERENCIAS

79

APÉNDICES

86

Índice de Figuras

1.	Infografía proceso y sistema.	XVIII
2.	Topología propuesta para el sistema de monitoreo y rastreo.	XIX
1.1.	Arquitectura para IOT.	2
1.2.	Protocolos de comunicación utilizados en IoT.	4
1.3.	Estructura de una red WSN.	9
1.4.	Diagrama de Bloques de un sistema de comunicación digital	10
1.5.	Topologías de una red WSN.	11
1.6.	Evolución de las redes móviles.	17
1.7.	Arquitectura red LTE.	17
2.1.	Cacao Criollo.	24
2.2.	Cacao Forastero Amazónico.	25
2.3.	Cacao Trinitario.	26
2.4.	Cacao nacional del Ecuador.	26
2.5.	Clones de cacao	27
2.6.	Arreglos para optimizar 1 hectárea de plantación.	28
2.7.	Arquitectura de funcionamiento del sistema.	31
2.8.	Diagrama Fipy y principales características.	32
2.9.	Diagrama de pines de Fipy.	33
2.10.	Placa Pytrack	34
2.11.	Módulo ESP32.	36
2.12.	Módulo SIM 808.	37
2.13.	Gateway Milesight para red LoRaWAN.	38
2.14.	Diseño de placa.	39

2.15. Diseño Final.	40
2.16. Dispositivos registrados	41
2.17. Configuración de dispositivo	42
2.18. API KEY	42
2.19. Trama LoRa	43
2.20. Integración ChirpStack con Thingsboard	44
2.21. Integración Thingsboard con ChirpStack	45
2.22. Token de acceso	46
2.23. Telemetría recibida	46
2.24. Dashboard	47
2.25. Alertas	48
2.26. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca	49
2.27. plantación de maíz en el sector de Uzhupud	50
2.28. Cacao usado para pruebas en la Universidad	52
2.29. Registro de movimiento de dispositivos	52
2.30. Registro de alarmas generadas	53
2.31. Registro de movimiento del Gps3	54
2.32. Localizaciones de GPS3	54
2.33. Zona de pruebas	55
3.1. Gateway Milesight utilizado en las pruebas	57
3.2. Dashboard con información de los dispositivos	58
3.3. Movimiento del dispositivo GPS	58
3.4. Registro de movimiento de los dispositivos	59
3.5. Registro de Alertas	60
3.6. Resultado de las pruebas en el campus.	61
3.7. Resultado de las pruebas fuera del campus.	62
3.8. Imagen satelital de la ubicación en Uzhupud	63
3.9. Gateway usado en las pruebas Uzhupud	64
3.10. Escenario de pruebas	65
3.11. SNR vs Distancia SF 11 y 10	66

3.12. SNR vs Distancia SF 9 y 8	67
3.13. RSSI vs Distancia	68
3.14. Rutas tomadas por los diferentes dispositivos en el transcurso de dos días	69
3.15. Alertas producidas	69
3.16. Latitud, longitud, valores de SNR y RSSI	70
3.17. Rango máximo de cobertura alcanzado desde el gateway hacia los dispositivos	71
3.18. Resultado de las pruebas en Uzhupud.	72
3.19. Comprobación de las coordenadas.	73

Índice de Tablas

1.1. Comparación entre los diferentes protocolos de comunicación [1] [2] . . .	6
2.1. Taxonomía del cacao	23
2.2. Especies de planta para sombra temporal.	28
2.3. Especies de plantas para sombra permanente.	29
2.4. Plagas y enfermedades del cacao.	30
2.5. Características del Módulo ESP32	36
2.6. Características Gateway LoRa MileSight UG67	38
3.1. Análisis de costos del sistema	74

RESUMEN

El incremento de la delincuencia a nivel mundial y nacional, afecta a diferentes sectores de la economía, incluyendo el sector agrícola. En particular, el robo de productos agrícolas es un problema común en Ecuador debido a la falta de medidas de seguridad adecuadas en los cultivos y la reincidencia de robos, lo que resulta en pérdidas económicas, disminución de la productividad y escasez de productos en el mercado. A pesar de que existen algunos sistemas antirobo, muchos de ellos ya no son eficaces y se requiere la implementación de sistemas más sofisticados para garantizar la seguridad de los cultivos. Por esta razón, en este proyecto se desarrolló un sistema de monitoreo y rastreo de productos agrícolas, enfocado al cultivo de cacao con el fin de minimizar los robos de este producto. Se analizaron diferentes sistemas de localización y se optó por utilizar el protocolo LoRa y GPRS debido a su amplia cobertura y eficiencia energética. Se emplean placas de desarrollo Fipy, una tarjeta de expansión Pytrack y un módulo SIM800. Los resultados indican que si los dispositivos se salen de una geocelda delimitada, se envía una alarma y si se pierde la conexión con la red LoRa, se cambia automáticamente a la red GPRS y se envía la ubicación del dispositivo a través de un mensaje SMS, mostrando la ruta que ha tomado.

Palabras clave: IoT, LoRa, GPRS, Fipy, Pytrack, SIM800, Dashboard

Abstract

This project has developed a system that allows the monitoring and tracking of agricultural products, specifically cocoa. For this purpose, an analysis of different location systems based on GPS and mobile networks was carried out, taking into account the characteristics of the cocoa crop, such as its growth, cultivation areas and the conditions necessary for its development. After considering parameters such as distance and location of most cocoa crops, the LoRa protocol and GPRS were chosen because of their wide coverage and energy efficiency. The system uses Fipy development boards, a Pytrack expansion card and a SIM800 module. When using the LoRa network, data is sent to a Milesight gateway and displayed on a Thingsboard platform. This allows the location of the devices to be viewed on a map, delimited by a geocell. If the devices leave this area, an alarm is sent. If the connection to the LoRa network is lost, the system automatically switches to the GPRS network and sends the location of the device via SMS message, showing the route it has taken.

Keywords: IoT, LoRa, GPRS, Fipy, Pytrack, SIM800, Dashboard

INTRODUCCIÓN

0.1. Antecedentes del problema de estudio

A nivel mundial el índice delictivo ha sufrido un incremento debido a varios sucesos relacionados con la pandemia y conflictos internacionales. Para el año 2022, Ecuador se posicionó en el puesto 32 con un índice de criminalidad del 57.24 %, superior a los años anteriores [3]. A nivel nacional algunas provincias han reportado incrementos de delincuencia debido a la situación económica, crisis carcelaria y mayor presencia de bandas delictivas en las calles. Para el cierre del año 2021 hubo un incremento del 24.4 % de robo a personas, la mayoría de ellas fue por la tarde y con modalidad de tipo asalto [4]. Esta situación afecta a todos los sectores de la economía del país, como lo son salud, industrial, ganadero, agrícola, entre otros.

El robo de productos agrícolas presenta problemas relacionados con: la pérdida de dinero debido a la reincidencia de robos en este sector, descenso de productividad, y a la escasez de productos en el mercado, ya que los agricultores dejan de cultivar ciertos productos ante el constante robo.

Los sistemas antirrobo en la agricultura son varios desde cámaras que detectan movimiento, alarmas, en la actualidad estos sistemas ya no son tan eficaces al momento de un robo, es por eso que muchas empresas dedicadas a la seguridad en el agro han desarrollado sistemas más sofisticados. Una de estas empresas es NGPRO de España que fabrica sistemas antirrobo para la maquinaria que consta de una alarma que notifica al dueño por SMS, E-mail y por la APP si sale de un perímetro establecido o si la batería es desconectada. Las acciones que toma en estos casos son: seguimiento GPS y con la inmovilización instantánea de la maquinaria al mandar un SMS al dispositivo [5].

Otro sistema antirrobo es implementado en los campos de España, donde el robo de aceitunas es constante. Este sistema fue desarrollado por dos emprendedores de la zona, consta de tecnología de radiofrecuencia encapsulado en un olivo señuelo de silicón que contiene un código único que indica la parcela y el dueño del producto, la policía puede detectar este señuelo con un escáner verificando la información del propietario [6].

El sector agrícola en Ecuador es uno más de los afectados por los robos. Los cultivos de cacao no se escapan de esta realidad, debido a las infraestructuras rudimentarias de seguridad, las cuales son fáciles de burlar y que no presentan ningún nivel de complejidad para la persona que trata de robar al momento de ingresar a las plantaciones privadas. Por ejemplo, uno de los robos de cacao ocurridos en Ecuador, sucedió en el año 2018 en una hacienda ubicada en el kilómetro 12 de la vía Santo Domingo – Quevedo, encapuchados ingresaron amenazando a la familia para luego amarrarlos de pies y manos, según la policía los encapuchados rompieron la pared de la bodega y sustrajeron 45 quintales de cacao seco valorados en 4500\$ y 20 quintales de pimienta seca valorados en 2000\$, junto a una pistola de temperatura y medidor de temperatura valorados en 1000\$ [7]. Es por ello que surge la necesidad de implementar sistemas basados en la tecnología de Internet de las cosas para el rastreo de mazorcas de cacao que permitan minimizar los robos de este tipo de producto.

0.2. Justificación del problema

La tecnología se ha ido innovando día a día con el fin de buscar soluciones a la mayoría de los problemas de la vida cotidiana de las personas y empresas, estos avances van de la mano con las tecnologías de comunicaciones, en particular las inalámbricas. En la actualidad existe la posibilidad de desplegar redes de sensores en diversos campos y aplicaciones como en el cuidado de la salud, procesos industrializados, vida cotidiana, en el deporte, agricultura, entre otros [8, 9, 10]. Dentro de éstos, la agricultura es un sector clave para la economía y desarrollo del país. En este sentido, se necesita de sistemas que puedan precautelar los productos agrícolas que es el sustento de los agricultores [11, 12, 13]. Para ello, se necesitan

tecnologías robustas y de bajo costo frente otras que son de costos elevados como el uso de drones para monitoreo. Un sustituto adecuado podría ser la utilización de una Red de sensores inalámbrica, del inglés wireless sensor networks (WSN) debido a bajos costos de mantenimiento, las hacen adecuadas de implementar en grandes extensiones de terrenos. Este tipo de redes son más fáciles de controlar y monitorear lo que las hacen un candidato ideal para la aplicación en plantaciones de cacao con la intención de evitar su robo dentro de un área de cultivo [14, 15, 16]. En el agro existen otras necesidades que pueden ser cubiertas como (i) monitoreo de animales enfocado en la detección de enfermedades y estados de ánimo, debido a que es importante saber el estado del animal para su máxima rendición en el campo o en los productos derivados [17], (ii) en la pesca y crianza de camarones se necesita tener una idea de cómo está la calidad del agua, temperatura, entre otras [18] y (iii) en plantas ornamentales como las rosas o las orquideas, es necesario el monitoreo de variables como: temperatura, niveles de nutrientes en el suelo, humedad y control de plagas que son parte fundamental para el crecimiento de una planta sana, en el Ecuador este tipo de flores son fuentes principales de ingresos para un agricultor exportador. Como vemos las redes de sensores tienen muchas aplicaciones en el mercado del agro [15, 19]. Es necesario resolver este problema ya que el robo de las mazorcas de cacao significa pérdidas grandes por el esfuerzo, tiempo y dinero invertido en fertilizantes, plaguicidas y demás gastos que incurren en el cuidado y crecimiento de las plantas, mientras no haya algún sistema implementado en el campo las personas seguirán aprovechando estas vulnerabilidades de seguridad. En el presente trabajo se va a desarrollar un sistema de monitoreo y rastreo de productos agrícolas orientado a prevenir los robos de diferentes productos agrícolas, como el caco, todo esto para salvaguardar la economía del agricultor. Este proyecto consiste en diseñar e implementar un sistema de localización GPS de productos agrícolas, utilizando comunicaciones inalámbricas para conocer la ubicación. Con este sistema será posible verificar la posición de las mazorcas de cacao dentro de una determinada área delimitada geográficamente (geocelda) y conocer cuando exista un movimiento del producto. Si esto sucede, se enviará una notificación al propietario. El proyecto plantea utilizar tecnologías de bajo costo lo cual da una mayor posibilidad

de adquisición por parte de la industria del agro, ya sean estas pequeñas o medianas empresas; en este sentido, el presente proyecto se establece como un pilar para un desarrollo más seguro y sostenible de la producción agrícola, mejorando de esta forma la economía del país.

0.3. Objetivos

0.3.1. Objetivo General

- Desarrollar un sistema de monitoreo y rastreo de productos agrícolas utilizando IoT, con caso de estudio cacao.

0.3.2. Objetivos Específicos

- 1. Analizar el estado del arte de los dispositivos y sistemas de monitoreo y rastreo de productos agrícolas basados en IoT; así como, el tipo de cultivo a monitorear.
- 2. Diseñar un sistema de monitoreo y rastreo utilizando geolocalización y red celular para plantaciones de cacao.
- 3. Implementar un sistema de monitoreo y rastreo utilizando geolocalización y red celular para plantaciones de cacao.
- 4. Realizar pruebas del sistema para comprobar su correcto funcionamiento.

0.4. Beneficiarios

El siguiente proyecto está orientado a la implementación de un sistema de monitoreo y rastreo de productos agrícolas utilizando IoT, geolocalización y red celular, los principales beneficiarios serán los agricultores que podrán rastrear sus productos cuando se presente una situación inusual en su campo de cultivo. El Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Telemática (GITEL) también es un beneficiario ya que el desarrollo de este proyecto se enmarca dentro de sus líneas de investigación. Los estudiantes de la UPS y principalmente de la Carrera de

Telecomunicaciones se ven beneficiados al desarrollar el fundamento teórico-práctico de este proyecto ya que podrán tomarlo como referencia para futuros proyectos similares.

DELIMITACIONES

El proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y rastreo basado en enlaces de muy largo alcance (de sus siglas en inglés Long Range, LoRa) y red móvil para productos agrícolas.

El diseño del sistema consta de una geocelda que delimita el perímetro de control, dentro de esta zona se colocará de manera estratégica uno o varios sensores. Cada sensor tendrá un sistema de posicionamiento global (de sus siglas en inglés Global Positioning System, GPS) y una tarjeta de evolución a largo plazo (de sus siglas en inglés Long Term Evolution, LTE) para la adquisición de datos georreferenciados y de rastreo de los productos agrícolas cuando éstos salgan de la geocelda como se muestra en la Figura 1. El uso del protocolo de comunicación dependerá del rango de alcance de estas. LoRa, será el principal recurso para el envío de los datos de la ubicación, el alcance dependerá del número de obstáculos, de la línea de vista que se tenga de la puerta de enlace hacia el sensor que está ubicado en los productos agrícolas. Si el producto sale del alcance de LoRa, se activará el uso de la red 4G LTE.

Los datos transmitidos por los sensores llegarán a un punto de acceso y serán retransmitidos hacia la nube mediante un enlace a Internet. En la nube se almacenará todos los datos, en una plataforma a la cual se tendrá acceso mediante un aplicativo móvil y web. Estos datos transmitidos serán observados en un dashboard que es una herramienta gráfica para la visualización de los datos como se muestra en la Figura 2.

Cuando uno o varios sensores ubicados en una plantación específica salgan de la geocelda se notificará mediante notificaciones push a la aplicación móvil de la persona encargada del cultivo y al dueño de la misma.

Dentro del sector agropecuario el uso de este dispositivo de monitoreo y rastreo es muy útil tanto en ganado como sus derivados y en el campo de diferentes plantaciones ya que facilita la geolocalización del producto en una zona delimitada y en la etapa de transporte del producto final, evitando pérdidas económicas por robos.

Es por eso que, para motivos de estudio y funcionamiento del presente proyecto se delimita al campo del cacao, pero sin dejar de lado que el sistema puede ser utilizado en los diferentes sectores ya mencionados.



Figura 1: Infografía proceso y sistema.

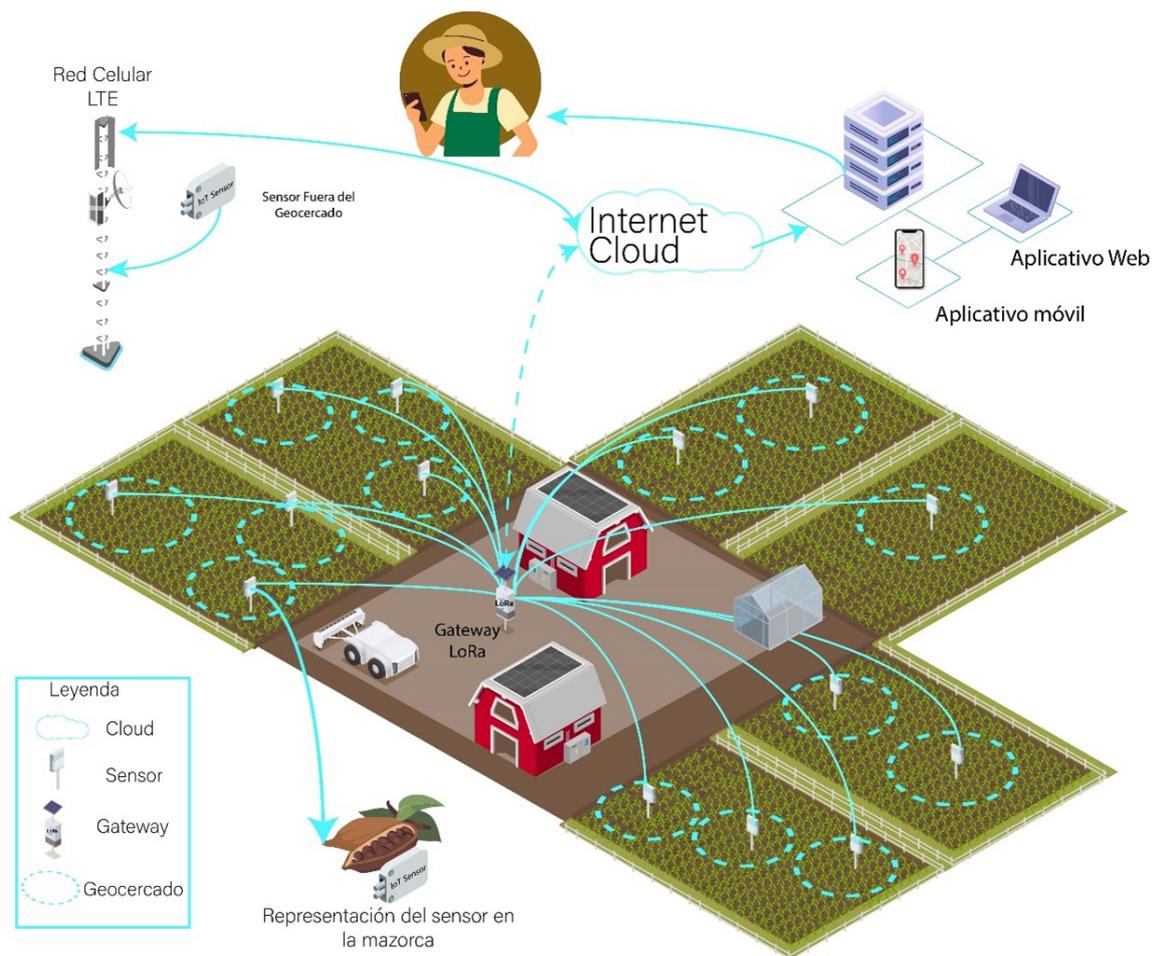


Figura 2: Topología propuesta para el sistema de monitoreo y rastreo.

Capítulo 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se analizan los sistemas de monitoreo y rastreo, así como, sus características, protocolos de comunicación y sistemas implementados en productos agrícolas. Dentro de estos campos, se explica las tecnologías implementadas en la realización del proyecto como son: Internet de las cosas, redes de sensores y redes celulares.

1.1. Internet de las cosas y red de sensores

En los últimos años internet ha crecido continuamente, Internet se mejora constantemente para crear nuevas aplicaciones. Esto trae como consecuencia nuevos tipos de tráfico, como lo son, manejo de equipos de cirugía con latencias extremadamente bajas y automóviles independientes. Estos equipos trabajan junto con la automatización que utiliza la tecnología para simplificar la vida de las personas. A lo largo de los años, la automatización se ha habilitado en muchos aspectos diferentes de la vida diaria, como el hogar inteligente, que puede controlar varios parámetros mediante una conexión a Internet con dispositivos que permiten medir temperatura, luz, presión atmosférica, etc. En un futuro cercano, se espera que Internet tenga conexiones significativas entre entidades físicas, entre ellos: sensores, controladores industriales y vehículos [20]. Internet se ha convertido en el vínculo principal entre los usuarios y el potencial de innovación y automatización. Esta combinación de dispositivos y objetos en la red conforma lo que se conoce como Internet de las Cosas.

1.1.1. Internet de las Cosas Internet of Things(IoT)

El Internet de las cosas (de sus siglas en inglés *Internet of Things*, IoT) se define como una red en la cual se tiene dispositivos iniciales, que pueden ser sensores, actuadores, etc. Cuya función es adquirir y compartir datos dentro de la red y transmitirlos mediante una comunicación inalámbrica al usuario final. IoT es una "infraestructura de información global para la sociedad" definido en la Recomendación ITU-T Y.2060 [21]. Esta infraestructura conforma diferentes capas jerárquicas que presentan características específicas respectivamente, como se puede ver en la Figura 1.1.



Figura 1.1: Arquitectura para IOT.

1.1.2. Arquitectura IoT

Una arquitectura de comunicación IoT típica se representa en la figura 1.1, esta permite que los dispositivos IoT no solo se conecten a la red troncal (Internet), sino que también se comuniquen de forma autónoma entre sí. Aunque no existen estándares propuestos para las arquitecturas de IoT, los patrones arquitectónicos varían un poco y los sistemas de IoT suelen incluir:

- Clase de cifrado: asigna un identificador único a cada objeto.
- Capa de detección: hace referencia a la detección de diferentes variables físicas que pueden ser obtenidas de un sensor, las cuales son transformadas a señales digitales.
- Capa de red: Encargada del envío y transmisión de datos obtenidos anteriormente, a su respectivo Gateway usando diferentes protocolos de comunicación: WiFi, Bluetooth, LoRa, 4G LTE, 5G, Zigbee y Sigfox.

- Capa de middleware: los datos se procesan en la capa del sensor y se vinculan a la nube. Proporciona acceso a una base de datos a la que se puede hacer referencia en cualquier momento y utiliza la automatización para registrar datos.
- Capa de aplicación: depende de la aplicación de Internet de las cosas en la industria, como las industrias de automóviles, hogares inteligentes, transporte de automóviles, etc.

Tanto los dispositivos de procesado, como de medición de variables físicas, tienen ciertas características como: el tiempo de adquisición, retrasos, capacidad de procesamiento, etc.

1.1.3. Aplicaciones

Debido a su alto factor de escalabilidad y automatización, IoT tiene el potencial de ingresar a varios campos que pueden ser: móvil, doméstico/industrial, seguridad pública, médico y sanitario. El futuro tiene una visión de una red que conecta todos los dispositivos, lo que lleva a aplicaciones de Internet de las cosas, entre ellas:

- Ciudades inteligentes.
- Sistemas de geoposicionamiento.
- Seguridad y emergencias.
- Agricultura inteligente.
- Granja inteligente.
- Domótica y automatización del hogar.
- Salud.
- Entre otras.

1.1.4. Hardware y Software del Sistema IoT

El hardware es la parte tangible del sistema, para el caso de IoT lo conforman varios dispositivos como lo son: sensores, conectores, microcontroladores, entre otros. Estos dispositivos son los principales responsables de la adquisición de datos. Varios

presentan problemas con la compatibilidad, por lo que se crearon nuevos sensores con el objetivo de minimizar el tiempo necesario para que se adaptaran a la compatibilidad.

El software incluirá una fase de conversión de datos para interpretación, una señal analógica que se convierte a digital para análisis y procedimientos operativos, y una fase de programación para que la MCU controle varios parámetros de cada sensor.

1.1.5. Protocolos de Comunicación

El Internet de las Cosas permite el uso de diferentes combinaciones de dispositivos en función de las necesidades del operador. Estos dispositivos pueden tener diferentes capacidades y opciones de configuración, y cada dispositivo debe comunicarse de acuerdo con las variables de su entorno de trabajo. La elección del protocolo de comunicación dependerá de varios factores que afectan al dispositivo/sensor, tales como: distancia de transmisión, seguridad, velocidad, costo, etc. Los protocolos de comunicación inalámbrica más utilizados son: Wi-Fi, Bluetooth LoRa, ZigBee, entre otros. Se pueden clasificar como de área de baja potencia y red de baja potencia, como se puede observar en la Figura 1.2 [22].



Figura 1.2: Protocolos de comunicación utilizados en IoT.

Debido a varias ventajas que presenta LoRa para el envío de datos, como el bajo consumo energético, alcance, penetración de obstáculos, manejo de varios dispositivos para el monitoreo y la flexibilidad para implementar en diferentes aplicaciones, será el enfoque de estudio en el desarrollo del proyecto.

Tecnología de Largo Alcance (LoRa)

LoRa (de sus siglas en inglés *Long Range*, LoRa) es un protocolo de comunicación de largas distancias, con una tasa de velocidad baja, permitiendo realizar una interconexión entre dispositivos y sensores, su consumo de energía es mínimo logrando que las vidas útiles de las baterías puedan durar hasta años seguidos de funcionamiento [23].

Esta red está conformada por varios elementos como: los dispositivos finales, encargados de enviar información los cuales pueden ser sensores y actuadores. Una puerta de enlace que en inglés se define como *gateway*, que funciona como los transmisores de radio de parte de la red. Un servidor encargado de almacenar los datos recopilados y finalmente una plataforma para el manejo y monitoreo de los diferentes datos usados.

Este protocolo se basa en la modulación de Espectro Ensanchado de Chirp (de sus siglas en inglés *Chirp Spread Spectrum*, CSS). La señal de transmisión se modula mediante un pulso de radiofrecuencia que varía en frecuencia con el tiempo, lo que permite una mayor resistencia al ruido, evitar interferencias y transmitir grandes cantidades de datos, permitiendo propagar la señal con mayor distancia y con bajo consumo energético. También presenta un detector de colisiones, si varios dispositivos están transmitiendo al mismo tiempo, esta le asigna un tiempo aleatorio para poder enviar los datos. La red usa una topología tipo estrella, los dispositivos se comunican directamente con la puerta de enlace.

Otro parámetro importante es el factor de dispersión (de sus siglas en inglés *Spread Factor*, SF) determina la duración de un símbolo de transmisión y la cantidad de interferencia y ruido que puede ser tolerada en el canal de comunicación. El SF se refiere a la relación entre la tasa de transmisión de datos y el ancho de banda de la señal, y se define como 2^{SF} .

Los anchos de banda más comunes son 125, 250 y 500 kHz debido a la relación entre el factor de dispersión, es un factor importante para determinar cuánto tarda un paquete en el aire para ser enviado, definido como el retraso o latencia, un resumen comparativo entre las diferentes tecnologías puede ser observado en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Comparación entre los diferentes protocolos de comunicación [1] [2]

	Cellular	LoRa	Sigfox	6LowPAN	WiFi	Bluetooth
Standard	3GPP GSM GPRS LTE 5G	Open Radius	Sigfox	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1
Coverage	B.S zone	3km Urban 20km Rural	50km Rural	10 a 100 meters	15 to 40 m	10m no obstacles
Frequencies	850/900 /1800/1900	915 MHz America 868 MHz UK 433 MHz Asia	902 MHz EEUU 868 MHz UK	868 MHz UK 915 MHz EEUU 2.4 Ghz Global	2.4 GHz 5 GHz	2.4 GHz
Topology	Mesh	Star	Star	Star Mesh	Star	Scattered AD-HOC
Data Rate	Up to 1Gbps	1 kbps	600 bps	250 kbps	2.4 Gbps	1 a 2 Mbps
Energy consumption	High	Low	Low	Low	High	Low if BT is Low Energy High standard BT

Para un sistema de monitoreo y rastreo, el protocolo LoRa puede ser una mejor opción que Sigfox, 6LowPAN, WiFi o Bluetooth por las siguientes razones:

1. LoRa tiene un mayor alcance en comparación con los otros protocolos, lo que significa que los dispositivos pueden comunicarse a largas distancias sin la necesidad de utilizar repetidores. Esto hace que sea ideal para sistemas de monitoreo y rastreo en áreas rurales o remotas.
2. LoRa consume muy poca energía, lo que permite a los dispositivos funcionar durante largos períodos de tiempo con baterías pequeñas.
3. LoRa ofrece una alta capacidad de transmisión de datos, lo que significa que se pueden enviar grandes cantidades de información en un solo paquete. Esto es especialmente importante para sistemas de monitoreo y rastreo que necesitan enviar información detallada y en tiempo real.

En resumen, el protocolo LoRa es una excelente opción para sistemas de monitoreo y rastreo debido a su alcance, eficiencia energética y capacidad de transmisión de datos

Clases LoRa

LoRa WAN presenta tres tipos de clases, mencionadas en [23], según el dispositivo final, reflejadas en una amplia gama de aplicaciones como:

- Clase A: Dispositivos finales bidireccionales de bajo costo. Esta clase es usada de forma por defecto, esta soportada por la mayoría de dispositivos LoRa, la comunicación clase A es iniciada por el dispositivo final de forma asíncrona. Es decir, usando un protocolo ALOHA permite que los dispositivos transmitan datos en cualquier momento sin necesidad de sincronización con otros dispositivos. Cada enlace de subida tiene un periodo de dos ventanas de enlace de bajada.
- Clase B: Dispositivos finales bidireccionales con latencia de enlace descendente determinista. En esta clase se recibe los dispositivos de forma síncrona con una guía para un bloque de pings programados en ciertos periodos de tiempo. La latencia de puede programar hasta 128 segundos, que dependerá de aplicación usada.
- Clase C: Dispositivos finales bidireccionales con la latencia más baja. La clase C se encarga de reducir de mayor forma la latencia al mantener abierto el receptor del dispositivo final en todo momento que no está transmitiendo es decir en modo semidúplex, lo que significa que pueden transmitir y recibir datos, pero no pueden hacer ambas cosas al mismo tiempo.

1.1.6. Plataformas IoT

Una plataforma IoT tiene como objetivo la gestión y control de los diferentes sistemas implementados en una red IoT, permitiendo el monitoreo de las variables tales como luz, temperatura, humedad, etc. Existen diversas plataformas disponibles,

tanto se tiene de código abierto, de pago mensual o anual, dependerá si se requiere el procesamiento de datos de una cantidad básica o masiva al momento de la elección de la plataforma, entre los más comunes se pueden destacar: Chirpstack y Servicio Web de Amazon.

Chirpstack

Es un servidor de código abierto enfocado en la configuración de redes LoRaWAN de tipo públicas o privadas que posee una interfaz web para gestionar Gateways, controla la incorporación de datos con los principales proveedores de servicio de nube, bases de datos y servicios de datos de dispositivos [24]. La plataforma está diseñada para conectar y administrar dispositivos IoT y permitir la recopilación y análisis de datos en tiempo real. También se integra fácilmente con otras aplicaciones y servicios externos, lo que permite la creación de soluciones de IoT más complejas. Además es compatible con dispositivos de unidifusión y multidifusión de clase A, clase B y de unidifusión y multidifusión de clase C.

Servicio Web de Amazon

La nube del Servicio de Amazon (de sus siglas en inglés *Amazon Web Services*, *AWS*) es una plataforma de computación en la nube que ofrece una amplia variedad de servicios, como almacenamiento, computación, redes, seguridad y análisis de datos. AWS proporciona la infraestructura necesaria para ejecutar aplicaciones y servicios en línea de manera escalable y rentable [25]. Esta plataforma funciona como almacenamiento de datos de los dispositivos finales.

1.1.7. Red de Sensores inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos (de sus siglas en inglés *Wireless Sensor Networks*, *WSN*) se componen de nodos inalámbricos, que están equipados con sensores para medir variables como temperatura, humedad, presión, luz, coordenadas geográficas, gases, velocidad, entre otras variables físicas. Los nodos de sensores están diseñados para ser pequeños, de bajo costo y con bajo consumo de energía, y se pueden

distribuir en áreas remotas o de difícil acceso. La información recopilada por los nodos de sensores se transmite a través de la red inalámbrica hasta una estación base, donde se procesa y almacena para su posterior análisis.

Esta red usa diferentes protocolos de comunicación, entre los más comunes pueden denominarse: 6LoWPAN, LoRa, Zigbee y Sigfox [26]. Este tipo de redes inalámbricas presenta una estructura está conformada por un sistema de adquisición de los datos (sensores), transmisor inalámbrico, una unidad de procesamiento, un entorno para el acceso al usuario y almacenamiento de los datos en la nube, como se observa en la Figura 1.3.

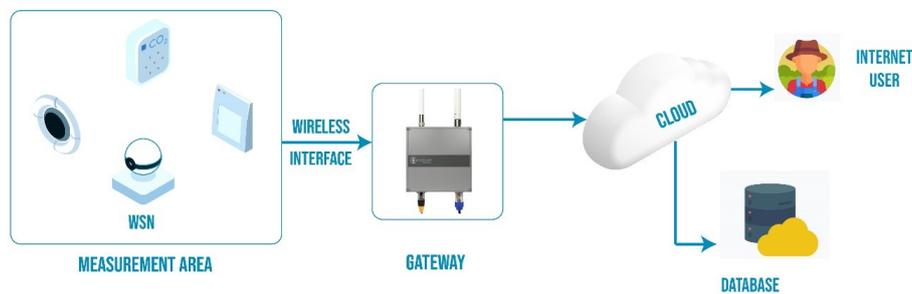


Figura 1.3: Estructura de una red WSN.

Esta WSN está conformada con nodos con capacidades para calcular y establecer conexiones con otros nodos, así como, la implementación de diferentes algoritmos de comunicación. Están distribuidos en un área aleatoria o designada manualmente con el objetivo de cubrir amplias cantidades de terreno [27]. También, lo constituyen los subsistemas de: comunicación, procesamiento, detección y eficiencia energética. Esta red de sensores contiene los componentes básicos de un sistema de comunicación digital, como se presenta en la Figura 1.4 .

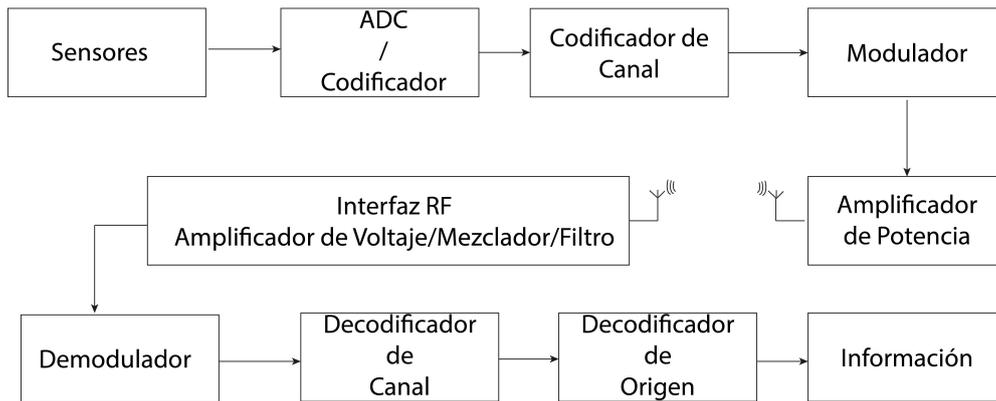


Figura 1.4: Diagrama de Bloques de un sistema de comunicación digital

1.1.8. Características presentes en una red WSN

Las características de los sensores de WSN varían según su uso específico, pero en general, dependerán de diversos factores como la trayectoria de transmisión de los datos desde un nodo sensor al Gateway, es decir la línea de vista y la cobertura que esta ofrezca [27]. Entre otros parámetros mencionan:

- Consumo de energía: dependerá del algoritmo implementado, el cual busca una solución que le permita usar las rutas de menor consumo energético.
- Equilibrio de la carga: La carga debe ser distribuida uniformemente entre cada nodo consiguiendo un consumo de energía para cada cluster de igual forma uniforme.
- Ubicación del nodo: Estos nodos son ubicados de forma aleatoria o de forma manual, se debe descubrir una ruta asegurando la eficiencia energética, conectividad y operación en la red.
- Recopilación de datos: diversos datos pueden repetirse entre nodos, eliminando esta información, permite reducir el número de transmisiones.
- Latencia: Referente al retardo al enviar un paquete, usando saltos múltiples en varios casos puede minimizar el retardo.
- Escalabilidad: El algoritmo implementado debe ser capaz de adaptarse a un cambio en la red de sensores marcando una red escalable.
- Fallas en nodos: Si un sensor presenta un fallo de energía o transmisión, el resto de sensores deben tener la capacidad de enviar la información evitando ese nodo.

1.1.9. Topología de WSN

Se refiere a la forma en que los nodos de la red se organizan y se conectan entre sí. Existen varias topologías de WSN, cada una con sus propias ventajas y desventajas en términos de rendimiento y eficiencia energética.

Las configuraciones de la topología en WSN se muestran en la Figura 1.5. Estas topologías presentan las siguientes características [28]:

- Punto a punto: Los nodos pueden establecer conexión con cualquier otro nodo, usa un solo canal por lo general es implementado para usuario y servidor. Adicionalmente, o requiere de un nodo central.
- Estrella: Este tipo de topología no establece conexiones entre nodos, los nodos son conectados directamente al nodo central de comunicaciones.
- Árbol: Combina la topología *Peer to 2 peer* (P2P) y estrella, la transferencia de datos se basa en un nodo hijo a un padre hasta llegar al nodo central, una de sus mayores ventajas es la minimización del consumo de energía.
- Malla: Permite la comunicación entre nodos, sin la necesidad de un nodo central de comunicación, este tipo de topología es compleja lo que conlleva al mayor consumo energético.

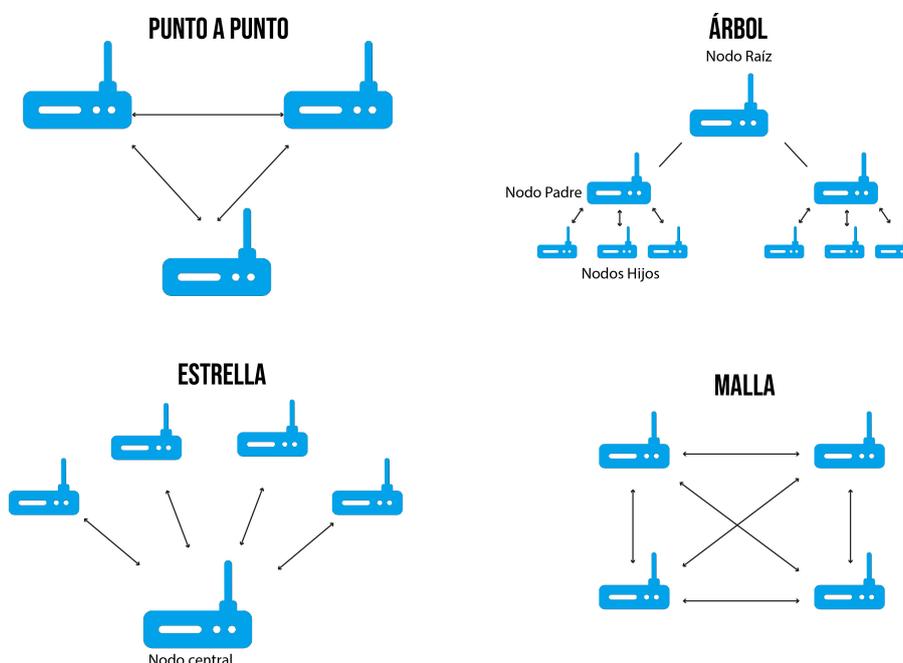


Figura 1.5: Topologías de una red WSN.

1.1.10. Aplicaciones de una red de sensores inalámbricos

En los últimos años han surgido diferentes aplicaciones para las WSN. Estas se pueden clasificar según los protocolos de comunicación, la cantidad de tráfico y los datos a monitorear. Esto permite mejorar cada día la arquitectura de una red y la necesidad de automatizarla, entre las principales aplicaciones en general se tienen: [29]:

- Monitoreo de variables del medio ambiente.
- Desarrollo en la industria.
- Agricultura.
- Aplicaciones en la seguridad.
- Sector automotriz.
- Medicina y cuidado de la salud.
- Automatización.
- Entre otras.

1.2. Sistemas de monitoreo y rastreo de productos agrícolas

Las buenas prácticas agrícolas recomiendan el uso de sistemas de monitoreo y rastreo con el fin de evitar problemas de plagas, enfermedades y analizar el estado del producto dentro y fuera de un establecimiento con el fin de entregar un producto en óptimas condiciones, estos sistemas pueden intervenir desde que germina la planta hasta el momento de llevarlas a su destino final [30].

Dentro de la agricultura podemos definir monitoreo y rastreo como una inspección regular y minuciosa de las plantas cultivadas a lo largo de la temporada de crecimiento. Mientras se lleva a cabo el monitoreo, el agricultor revisa sus cultivos en busca de problemas en las plantas como: insectos, ácaros, enfermedades, malezas, daños por tormentas, estrés climático, carencias nutricionales, etc. El rastreo es

utilizado para prevenir y minimizar robos en las últimas etapas de crecimiento del cultivo, todo esto para evitar pérdidas económicas al momento de cosechar [30].

Uno de los factores importantes del monitoreo de los cultivos es la detección temprana de enfermedades y la prevención de sustracción del producto agrícola, así como, detectar los problemas que se van desarrollando en el crecimiento de la planta. Adicionalmente, monitorear los cultivos permite descubrir posibles daños en las plantas. En el caso del cacao, si no se tiene un monitoreo constante puede ocasionar deformación en la mazorca y la muerte de la planta. También permite el control del uso eficaz de fertilizantes y plaguicidas para el control de plagas y enfermedades.

Dentro de las herramientas que facilitan el monitoreo y rastreo de productos agrícolas, puede partir desde la más rudimentario como una lupa para observar las plagas, cinta marcadora para plantas infectadas, pero en la actualidad estas herramientas no son suficientes debido a que los campos aumentan su producción y por ende existe más riesgo de pérdida en estos casos es recomendable el uso de la tecnología, como IoT, para automatizar los procesos, tal es el caso de las empresas agrícolas [30].

1.2.1. Monitoreo del clima

Monitorear el clima permite evaluar y determinar las condiciones del medio ambientales para evitar efectos nocivos en las plantas. Las variables más importantes son la humedad, temperatura, presión del aire y velocidad del viento; que pueden afectar el ciclo de crecimiento en la agricultura [31]. La recopilación de datos se realiza mediante los sensores, los cuales son almacenados en la nube, para luego el ser analizados para la toma de decisiones. Este procedimiento permite optimizar los ciclos de crecimiento de la planta [32, 33, 16].

1.2.2. Monitoreo del suelo

El tipo de suelo es vital para la agricultura ya que al analizar el suelo podemos ver que tan factible es colocar un tipo de cultivo en el lugar o cual sería el suelo más óptimo para cierto cultivo, en el proceso de crecimiento el cultivo empezará a consumir

los nutrientes y con el uso de sensores podremos controlar la humedad del suelo, el pH, temperatura y nutrientes. Estos sensores pueden interactuar con el usuario a través de un aplicativo web [32].

1.2.3. Monitoreo de enfermedades

El crecimiento saludable de las plantas infiere en las condiciones de crecimiento de las misma ya que si las condiciones de crecimiento fueran desfavorables para la salud de estas plantas, como estrés hídrico, temperatura demasiado alta, etc. Provocan desequilibrios que conducen a enfermedades, plagas y malezas [34].

Una de las formas de identificar si una planta esta enferma puede ser con el uso de sensores, que protege los cultivos al monitorear varias condiciones climáticas, como la temperatura y la humedad, utilizando WSN. El sistema protege los cultivos mediante el análisis de los datos recopilados sobre enfermedades fúngicas [35].

1.2.4. Monitoreo de temperatura

La temperatura de la tierra va de la mano de la temperatura del medio ambiente, debido a que la tierra actúa como aislante del calor entre la tierra y el aire. Esto se ve claramente en el día ya que la tierra absorbe la energía del sol y se calienta, pero por la noche la tierra libera todo ese calor almacenado en el día y esto puede llegar a afectar a las plantas por los cambios bruscos temperaturas. Para estos casos el monitoreo de temperatura tanto del suelo como del ambiente en las parcelas de cultivos es importante [36, 37].

1.2.5. Monitoreo de gases de efecto invernadero

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) son el principal problema en la agricultura debido a la fermentación (metano), uso de fertilizantes sintéticos (óxido nítrico) y el labrado del suelo (dióxido de carbón), la actividad agrícola representa entre el 10 y 14 % de emisiones de gases de efecto invernadero [38]. El monitoreo de estos gases es necesario, debido a que en los invernaderos la presencia de estos gases en altas concentraciones hacen que la temperatura interna aumente, afectando directamente al

buen funcionamiento de la granja. Para este caso se puede realizar monitoreo con redes de sensores o drones no tripulados de la temperatura de los invernaderos.

1.2.6. Control de plagas y fertilización

Es ampliamente conocido el efecto dañino de las plagas en los cultivos, lo que afecta negativamente el rendimiento y la calidad de los mismos. Para manejar adecuadamente una plaga, primero debemos identificar la plaga, para utilizar el pesticida correcto. Para el caso de que la plaga desarrolle inmunidad al pesticida, se recomienda utilizar un plaguicida más fuerte, pero esta acción puede tener un efecto negativo en el cultivo [39]. No obstante, el uso de sensores permitiría detectar los niveles de nutrientes en el suelo. Si los niveles son bajos, quiere decir que la planta está siendo afectada por alguna plaga que está consumiendo sus nutrientes. Otra forma de combatir las plagas es con el uso de aspersores inteligentes se puede rociar el pesticida apropiado.

1.2.7. Sistemas tracking

En la mayoría de casos los sistemas de rastreo son aplicados al sector agropecuario, específicamente, para la ubicación de animales dentro de la granja o cualquier movimiento fuera de una zona determinada. Este tipo de rastreos puede ser realizada por la identificación por radio frecuencia (de sus siglas en inglés *Radio Frequency Identification*, RFID), WSN o redes celulares, con lo que un granjero puede tener en tiempo real el seguimiento del ganado [40].

1.3. Redes celulares

Para el desarrollo de este proyecto se limitará al análisis de las redes 4G. Con la creación del teléfono y la aparición de la comunicación a larga distancia. Esta tecnología ha pasado por un proceso de evolución, partiendo desde los inicios de 1980. La primera red móvil 1G fue introducido como un sistema de circuito analógico. Usando técnicas de acceso como FMDA (Acceso múltiple por división de frecuencia).

Con rangos de operación de 800 MHz a 900 MHz, sus principales limitaciones fueron la limitación del canal a 30 kHz, recepción con calidad muy baja, percepción de ruido alto [41].

La cuarta generación "4G" lanzada oficialmente en 2010, es un sistema que se basa en el uso de división de frecuencia múltiple ortogonal (OFDMA) o CDMA. En modulación OFDM las altas tasas de datos son divididas y ubicadas en sub portadoras en bandas estrechas moduladas. Las frecuencias generales van desde los 2GHz hasta los 8Ghz usando un espectro de 5Mhz a 20Mhz. Logrando una conexión múltiple (MIMO), soportando aplicaciones como live streaming high definition video, juegos en línea [42]. La principal diferencia entre una red 3G y 4G es la velocidad de transmisión, seguridad y la metodología implementada.

La modulación OFDM, esta técnica de modulación permite al canal ser dividido en varios sub canales independientes y ortogonales en el dominio de la frecuencia, la sub portadora es modulada usando cada sub canal y sub portadora en una transmisión paralela. Cada enlace puede ser modulado independientemente sin importar la tasa de subida o bajada, mencionando que se pueden usar diferentes modulaciones híbridas en un mismo periodo de tiempo [43].

El usuario final puede tener acceso a Internet mediante HSPA (high-speed packet Access). Los sistemas inalámbricos 4G consisten en LTE-Advanced, 3GPP, y red móvil Wi-Max. La división ortogonal de frecuencia múltiple logra una eficiencia espectral de tasa alta. La modulación se encarga de dividir la información en que va a ser transmitida en portadoras de banda angosta que van a ser distribuidas en la frecuencia [44] Usando la técnica MU-MIMO permite aplicar técnicas inteligentes a los arreglos de antenas para mejorar el rendimiento de la señal.

El núcleo principal de la transmisión de datos para una red 4G, se basa en el uso de flujo de datos en función de paquetes basados en IPv6, esta provee un alto índice de espaciado en las direcciones, control autónomo, QoS diferenciado y personalizable, además del control de movilidad dado que el sistema móvil dependerá de la posición en la que se encuentre activo [45].

La tecnología 4G tiene un rango de soporte de 4000 dispositivos por Km². El arreglo de antenas para el soporte MIMO que usa la red 4G (4*4, 8*8).

Tanto LTE como WiMax usan la duplexación por división de tiempo (TDD) y la duplexación por división de frecuencia (FDD). LTE-A ha mantenido un ancho de 100 MHz en pico celdas, femto celdas, y los canales multiportadoras. Presenta flexibilidad en sistema GRPS pueden estar conectados a una red LTE, a causa de esto es la principal solución de la mayoría de operadoras en el resto del mundo [45]. La tecnología 4G provee una velocidad de 1 Gbps para áreas de red con escasa movilidad y 100 Mbps para una red de alta movilidad. La evolución de las redes móviles se puede visualizar en la Figura 1.6.

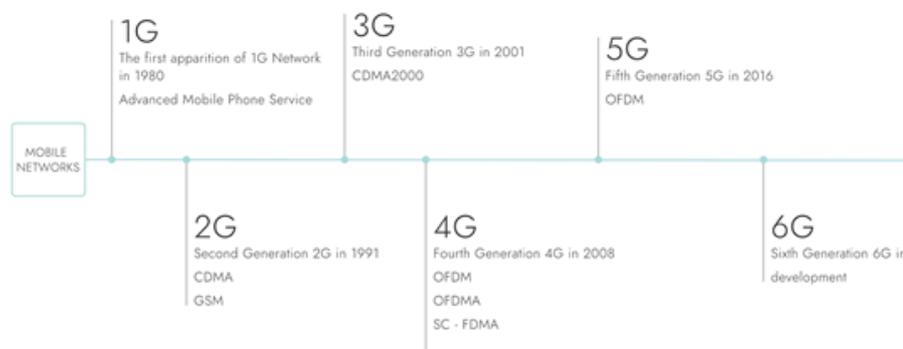


Figura 1.6: Evolución de las redes móviles.

1.3.1. Arquitectura de una red 4G LTE

La arquitectura de una red LTE consiste de cuatro partes principales, el equipo de usuario LTE, las redes de acceso de radio terrestre UMTS (E-UTRAN) y los servicios de IP [46]. La Figura 1.7 muestra los componentes de esta arquitectura.

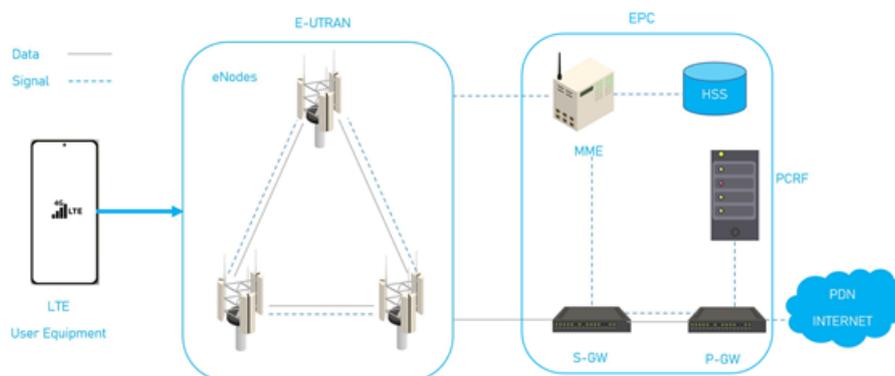


Figura 1.7: Arquitectura red LTE.

Equipo de Usuario LTE: es un equipo móvil construido para procesar una red 4G, contiene una tarjeta SIM 4G. el equipo de usuario es el encargado de toda la comunicación, identifica al usuario en la red y termina los flujos de datos. Redes de acceso de radio terrestre UMTS (E-UTRAN): está constituido por las diferentes estaciones base denominadas nodoBs (eNodeB), ejecuta tareas como control de conexión móviles, control dinámico para el equipo de usuario en subida y bajada de datos. También involucra procesos de comprensión de cabeceras de IP, encriptación, función de Gateway para el MME. EPC: Construido de cinco componentes: S-GW (Gateway de Servicio), P-GW (Red de paquetes de datos), MME, HSS (Servidor de suscriptor doméstico), PCRF (Reglas de política y cobro).

1.3.2. Aplicaciones de la Cuarta Generación de la red móvil

Al momento de elegir la red 4G/LTE como transporte de datos puede presentar las siguientes desventajas:

Primero, la tecnología 4G/LTE se desarrolló para manejar grandes cantidades de tráfico de datos en aplicaciones de uso intensivo de datos, como la transmisión de video y la descarga de archivos de gran tamaño. Esto significa que la tecnología es más adecuada para aplicaciones de alta velocidad y alto volumen que las aplicaciones de baja velocidad y bajo volumen que suele ser IoT.

En segundo lugar, la tecnología 4G/LTE tiene mayores requisitos de energía en comparación con otras tecnologías IoT como LoRaWAN o Sigfox. Esto se debe a que la tecnología 4G/LTE requiere más energía para mantener una conexión de red y transferir datos a altas velocidades.

Finalmente, la tecnología 4G/LTE también tiene mayores requisitos de ancho de banda y latencia, lo que significa que no es ideal para aplicaciones de menor velocidad y menor capacidad que requieren transferencias de datos más pequeñas y más rápidas. Esto afecta la eficiencia energética y el costo de los dispositivos IoT, ya que los dispositivos deben enviar y recibir datos constantemente, lo que puede agotar rápidamente la vida útil de la batería.

Como opción la tecnología 4G/LTE-M (también conocida como LTE-MTC o LTE Cat-M1) está diseñada específicamente para dispositivos IoT de baja velocidad

y baja capacidad, que requieren una conectividad de red confiable y eficiente. Esta tecnología también ofrece un consumo de energía reducido en comparación con el 4G/LTE tradicional, lo que puede mejorar la duración de la batería de los dispositivos IoT.

Entre las aplicaciones podemos mencionar: tráfico aéreo, control, transporte de sistemas, sistemas de seguridad y vigilancia, aplicaciones en detección de químicos y gases, utilidades en el agua, redes públicas seguras, protocolos de comunicación de emergencia, también varios de estos sectores pertenecen al conjunto de la automatización eléctrica como el uso de Smart grid.

1.4. Del uso de la tecnología en monitoreo y rastreo del cultivo a monitorear

La tecnología ha transformado la agricultura, permitiendo el monitoreo y gestión de productos agrícolas de una manera más eficiente y precisa. El uso de sensores, drones, redes de sensores inalámbricos y otros dispositivos inteligentes pueden ayudar a los agricultores a recopilar y analizar datos en tiempo real sobre los cultivos, el clima y el suelo. Esto permite a los agricultores tomar decisiones más informadas y precisas, lo que puede mejorar la eficiencia y la rentabilidad de sus cultivos.

1.4.1. Vehículos Aéreos no Tripulados

Los drones o vehículos aéreos no tripulados (de sus siglas en inglés *unmanned aerial vehicle*, UAV) son una herramienta cada vez más utilizada en la agricultura para la recopilación de datos y la gestión de cultivos. Las aplicaciones más comunes incluyen el monitoreo de cultivos, el mapeo y análisis del terreno, y la aplicación de riego y fertilización. Los drones pueden ser equipados con cámaras y sensores para capturar información en tiempo real sobre el estado de los cultivos y las condiciones del terreno. Esto permite a los agricultores y especialistas en agricultura tomar decisiones más informadas y precisas sobre la gestión agrícola, lo que mejora la eficiencia y

la productividad en la agricultura. También pueden ser utilizados para la detección temprana de plagas y enfermedades, lo que puede ayudar a reducir el uso de pesticidas y mejorar la salud de los cultivos.

Otra ventaja de los drones en la agricultura es su capacidad para cubrir grandes áreas de terreno en poco tiempo y de manera eficiente. Además, los drones pueden ser utilizados en terrenos difíciles de acceder, como laderas pronunciadas o áreas de difícil acceso, lo que permite una mayor precisión y eficiencia en la gestión agrícola.[47].

1.4.2. Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión es definida como un arreglo de diferentes estadísticas en una granja con el objetivo de optimizar las cosechas y producir una reducción de costos. En una granja dedicada a la cosecha de cacao, se tendrán varias constantes e información de las variables que se presentan para el procesado de la toma de decisiones para aumentar el rendimiento, funcionando como un limitante para el impacto que se produce en la naturaleza, obteniendo también el costo-beneficio para los diferentes atributos a monitorear en el campo.

Las principales tecnologías implementadas serán el uso algoritmos para el control de un sistema embebido de riego de agua en el campo, implementación del fertilizante, el uso de pesticidas y control de plagas conjunto con un GPS para el análisis de bloques. La precisión de los sensores lleva a un análisis mecánico de la tecnología, procesamiento de imágenes y el estudio de las variables climáticas [48, 10].

El uso del GPS, será el principal buscador para los agricultores en las que pueden encontrar las diferentes áreas y guías locales con la información recopilada. Los paquetes de envío de datos serán transmitidos mediante gateways de protocolos de comunicación más comunes para el envío a larga distancia como lo son: LoRa, Zigbee, enviando la información a redes celulares 5G con tasas de latencia muy bajas, permitiendo la carga de datos y procesamiento de una forma eficiente y veloz [49].

1.4.3. Implementación de robots basados en Inteligencia Artificial

La implementación de una red 5G ha permitido el despliegue de robots con la capacidad de enviar información con volúmenes grandes. Permitiendo la carga a la red con tasas de velocidades altas para el procesamiento, así como imágenes y vídeos en calidades UHD, además de la información recogida por sus sensores. Los datos son enviados a la nube pueden llegar a almacenar Gb hasta Tb de información recopilada, las que son analizadas en la nube e incluso enviada a analistas en procesamiento de cultivos con el objetivo de la detección temprana de plagas en las plantas, el cual robot se encargará del fotografiado de la planta infectada y subirla a la nube para el análisis y detección del tipo de plaga [50].

Los datos son procesados en la nube para minimizar la complejidad del procesamiento, la nube funciona como almacenamiento y los patrones de ruta de los robots en el seguimiento del plantío. Los robots presentarán tareas como limpieza y sembrado de semillas, regado inteligente y empaquetado.

1.4.4. Realidad Aumentada

El uso de realidad aumentada puede mostrar al agricultor de forma más detallada y sencilla de cómo se comportan sus cultivos, las tareas que realizan los diferentes robots e información básica como temperatura, humedad o la presencia de alguna plaga en los cultivos. Un ejemplo de la realidad aumentada serán lentes con información en la que el agricultor pueda mirar la zona en la que están cultivadas determinadas plantas y ver las variables monitorizadas. Incluso usar la visión de las cámaras implementadas en los robots con el uso de realidad virtual (VR), estas transmisiones ocupan un ancho de banda alta en un vídeo de calidad UHD 4K a 360° requiere una cantidad de 20 a 80 Mbps, con una latencia menor a los 50 ms. Para una inmersión y calidad en 8K, se requiere un ancho de banda de 1.5 Gbps, en la que 5G está en la capacidad de cubrir los gastos de datos en la red con tasas sumamente altas [50].

Capítulo 2

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el cultivo a monitorear, módulos y sensores utilizados en el diseño del sistema, detalles técnicos de los módulos y sensores como también se da a conocer el diseño 3D de un cacao en el que estarán colocados todos los módulos y sensores.

2.1. Análisis de cultivo a monitorear

El cacao tiene sus orígenes en América del Sur, según el arqueólogo Francisco Valdez, líder de la investigación que ubicó el origen de la domesticación del cacao en la Amazonia ecuatoriana hace 5500 años por la cultura prehispanica Mayo-Chinchipec-Marañón, es por ello que Ecuador esta catalogada como la cuna del cacao[51]. En otras culturas, como los Mayas era utilizada como moneda y alimento, en la cultura Azteca elaboraban una bebida llamada "Xocoatl" de sabor intenso y que producía gran energía a quien lo consumía, Hernán Cortés en 1528 llevo la receta de esta bebida a España que no fue bien recibida hasta que le colocaron azúcar [52]. Guayaquil fue reconocido como el primer puerto mundial de exportación del cacao que durante 150 años, hasta que en 1920 sufrieron dos duros golpes por una enfermedad que afecto las cosechas del cacao y llevo a la caída de su producción y comercialización [53].

2.1.1. Taxonomía y descripción botánica del cacao

En la Tabla 2.1 se presenta la Taxonomía del cacao:

Tabla 2.1: Taxonomía del cacao

Reino: Plantae	Subreino: Tracheobionta	Division: Magnoliophyta	Clase: Magnoliopsida
Familia: Malvaceae	Género: Theobroma	Especie: Cacao	Nombre científico: Theobroma cacao L.

Árbol

Los árboles de cacao silvestre pueden alcanzar una altura de más de 20 metros, mientras que las plantas injertadas suelen alcanzar una altura de 4 a 7 metros. Las plantas producidas por propagación vegetativa, como los injertos, tienen más raíces secundarias que forman grupos compactos cerca de la base del tallo en comparación con las plantas sembradas a partir de semillas con raíces primarias [54].

Hojas

Las hojas son coriáceas simples, enteras o sinuadas, ovaladas o elípticas, levemente asimétricas de 17-48 cm de largo y de 7-10 cm de ancho, alternas sin tricomas o con pocos bellos, la punta es larga y afilada [55].

Flores

Las flores se distribuyen en el tronco y ramas principales. Estas son pentalobuladas, sostenidas por un pedicelo delgado, con cinco sépalos en forma de estrella, la corola posee cinco pétalos blancos con líneas de colores en el interior separados por una base cóncava. lígula triangular. El tubo estaminal conformado por cinco estambres cortos y fértiles que se curvan hacia afuera donde se encuentran los sacos polínicos, el ovario es ovalado pentacelular, que contiene de 30 a 50 óvulos, cilíndrico, blanco, apical o estigmático. La intensidad de la floración puede variar considerablemente según el genotipo, aunque también influyen los factores ambientales. Menos del 5% de las flores son fertilizadas y dan fruto debido a la estructura de la flor y su biología [56].

Frutos

Son mazorcas polimorfas, esféricas o fusiformes, según su color ya sean amarillas, anaranjadas o purpuras cuando maduran esto indica el tipo de cacao que es, puede ser liso o rugoso y tiene surcos. Este alcanza la madures a los cinco o siete meses después de la polinización, por dentro contiene cinco hileras de almendras cubiertas de mucílago dulce y de agradable aroma cuando madura [56].

2.1.2. Tipos de cacao

Hoy el cacao ecuatoriano ha vuelto a su antigua gloria y es reconocido como líder en la producción de cacao fino de aroma, Nacional o sabor y el común (CCN51), que a su vez estos están dentro de una clasificación por origen y características que son:

Cacao Criollo

Este tipo de cacao se caracteriza por mazorcas alargadas de color verde y rojo cuando no maduran como se ve en la Figura 2.1, que se vuelven amarillas y de color naranja rojizo cuando maduran, y el chocolate elaborado con este cacao es popular por su sabor a nuez y afrutado. Comercialmente se clasifica como cacao fino [57].



Figura 2.1: Cacao Criollo.

El árbol de este cacao es bajo, su copa es redonda y posee hojas verdes ovaladas, las almendras de este caco son blanco marfil.

Cacao Forastero Amazónicos

Se denominan amazónicos por su distribución en la cuenca del Amazonas y sus afluentes. Las mazorcas son verdes, cuando son inmaduras y amarillas representan que están maduras. Tiene forma de cuello de botella pequeño en la parte inferior como se aprecia en la 2.2. Las almendras son planas y pequeñas con cotiledones morados, el 80 % de producción mundial es de este cacao, y de el se obtiene un chocolate con sabor básico de cacao [57].



Figura 2.2: Cacao Forastero Amazónico.

Cacao Trinitario

Es el resultado del cruce de cacao tipo criollo y forastero en la cuenca del río Orinoco. Este cruce se dio de manera silvestre y fueron seleccionados en Trinidad de ahí viene su nombre, como se puede ver en la Figura 2.3, proporciona el 10-15 % de la producción mundial, muy utilizado en América, es de calidad intermedio con un sabor afrutado y de nuez [57].



Figura 2.3: Cacao Trinitario.

Cacao Nacional del Ecuador

Esta plantación pura es un producto raro, en su mayoría de plantación, derivado de una hibridación natural importados de Venezuela y Trinidad. Las mazorcas tienen forma de melón, pero se estrechan en la base y la punta, con surcos y crestas poco profundos como se ve en la Figura 2.4. El color interno de las almendras es lila o violeta, pero en ocasiones se observan semillas blancas [57].



Figura 2.4: Cacao nacional del Ecuador.

A partir de este tipo de cacao se elabora uno de los mejores chocolates del mundo, gracias a su combinación floral y aromática con sabores afrutados y otros.

Clones

Son variedades artificiales fruto de la investigación identificadas por letras y números con el fin de mejorar en resistencia a plagas y enfermedades como se aprecia

en la Figura 2.5 es el cacao CNN-51 que es el mas comun en plantaciones, como EET-19, EET-48, EET-62, EET-95, EET-96, EET-103, EET-399, EET-400, EET-544, EET-558, EET-559, EET-576, EET-577, EET-800, SIL-1, SIL-5, EETP-801, Pound-12, IMC-67 y CNN-51 (Colección Castro Naranjal 51) este último, su mazorca tiene un color rojizo morado cuando esta tierno y cuando está maduro un color rojizo anaranjado, su calidad de sabor es medio bajo y su potencial radica en la producción de manteca de cacao [57].



Figura 2.5: Clones de cacao .

2.1.3. Características para la siembra del cacao

Clima

En Ecuador la altura máxima para el desarrollo del cacao es de 1400 m. s. n. m, la temperatura mínima es de 18 – 21°C y la máxima es de 30 - 32°C y con una humedad variante desde el 70 a 90 %; las condiciones óptimas son a una altura entre los 400 y 800 m. s. n. m, una temperatura de 25 – 26 °C y una humedad de 80 % [58].

Suelo

El cacao se adapta a los suelos, pero se recomiendan un suelo con un 50 % de arena, 30 – 40 % arcilla, 10 a 20 % de limo y una proporción superior al 3.5 % de material orgánico; el pH del suelo se recomienda en un 6.5 – 7.5 pero tolera un cambio leve de suelos ácidos y alcalinos de 5.0 a 7.5 de pH [59].

El balizado se basa en colocar palos de madera o estacas de 1 – 1.50 m de alto con relación a la distancia de siembra del cacao, se recomienda colocar la planta de cacao a una distancia de 4x4 m de distancia entre cada cacao en arreglos de tipo cuadrado o tresbolillo optimizando el cultivo de 625 plantas por hectárea [57], también

se recomienda realizar canales para el desfogue del agua y evitar el empoce ya que el cacao no soporta el encharcamiento, para los hoyos se deben hacer de 40x40x40 cm este tipo de arreglos se puede apreciar en la Figura 2.6.

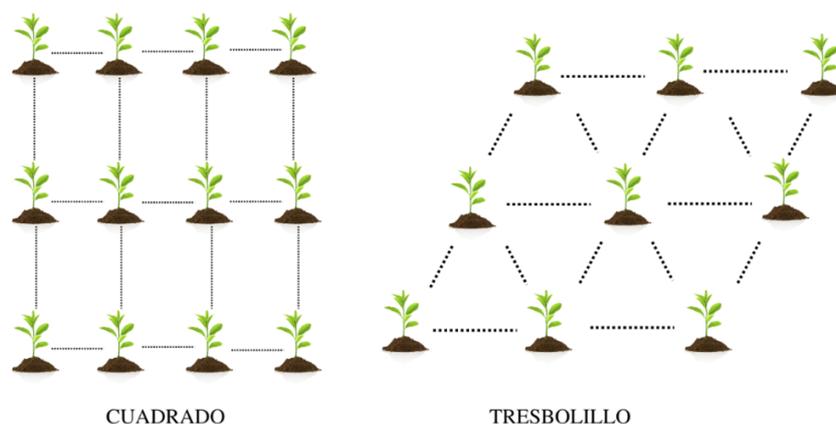


Figura 2.6: Arreglos para optimizar 1 hectárea de plantación.

Sombra

La sombra es fundamental para el crecimiento de la planta, contribuye a regular la temperatura, evapotranspiración y cobertura contra la radiación solar directa, hay dos tipos de sombra que dependerán del lugar.

Temporal: estas especies se deben plantar con anticipación de al menos 1 - 5 meses entre las especies comunes están presentadas en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Especies de planta para sombra temporal.

Especie	Distancia al cacao (m)
Guineo (<i>Musa spp</i>)	6 x 6
Yuca (<i>Manihot esculenta</i>)	3.5 x 3.5
Frejol de palo (<i>Cajanus cajan</i>)	1 x 1.5
Papaya (<i>Carica papaya</i>)	3.5 x 3.5

Estos cultivos deben permanecer hasta que el cacao desarrolle su follaje, depende mucho de las condiciones climáticas y el suelo, para el Ecuador una recomendación es de 3 años, pero puede ser de 1 a 5 años.

Permanente: estas especies ya están preestablecidas en el ecosistema por lo tanto ya se encuentran desarrolladas y listas para brindar sombra, el hecho que sean plantas

nativas no competirán por nutrientes ni agua, su follaje hace que haya tolerancia a los vientos para el cacao entre algunas sugerencias de especies para sombra permanente se encuentran descritas en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Especies de plantas para sombra permanente.

Especie	Distancia al cacao (m)
Cedro (<i>Cedrus</i> sp)	18 x 18
Capirona (<i>Capirona decorticans</i>)	18 x 18
Laurel (<i>Laurus novilis</i>)	18 x 18
Jacaranda (<i>Jacaranda</i> sp)	18 x 18
Higuerón (<i>Ficus citrifolia</i> Mill)	22 x 22
Bálsamo (<i>Myroxylon balsamum</i>)	16 x 16
Caoba (<i>Swietenia macrophylla</i> king)	18 x 18
Caucho (<i>Ficus elástica</i> Roxb)	16 x 16
Manzano Colorado (<i>Clethra fimbriata</i>)	22 x 22

Siembra

En esta etapa es cuando debemos realizar análisis previos del suelo para el uso de fertilizante ya que se debe revisar cuales son los nutrientes necesarios para la zona, el sistema de drenaje y riego debe estar implementado en este punto, siendo uno de los más recomendados el riego por goteo, al momento de realizar la siembra se sugiere incluir 150 – 200 g de abono orgánico con fertilizante químico de 50 a 100 g que será colocado en el fondo para facilitar la absorción de los nutrientes en las raíces y no dejar bolsas de aire en los hoyos por el motivo que se acumula el agua causando podredumbre en las raíces y posterior muerte [60].

Plagas y enfermedades

El control de plagas y enfermedades en el cacao es de gran importancia para garantizar la calidad y la cantidad de la producción de cacao. Las plagas y enfermedades pueden causar una disminución en la producción, una reducción en la calidad del producto, y en casos extremos, pueden llevar a la pérdida total del cultivo. Además, la presencia de plagas y enfermedades en el cacao puede provocar la necesidad de utilizar pesticidas y fungicidas, lo que puede ser costoso y afectar negativamente al medio ambiente, es por eso que se debe tener en cuenta cuales son

las plagas y enfermedades que pueden perjudicar al cacao como se ve en la Tabla 2.4 se aprecia las mas comunes y entre otras las mas peligrosas.

Tabla 2.4: Plagas y enfermedades del cacao.

Plagas	Enfermedades
Ácaros	Escoba de bruja
Cápsidos de cacao o Monalonion (Chinche del Cacao) & La Monilia	La Monilia
Salivazo (Clastoptera globosa)	La mazorca negra (Phytophthora Palmivora)
Barrenador de tallo (Xyleborus)	Mal de machete
Termitas del cacao (Nasutitermes)	
Perforadores de la mazorca	
Joboto (Phyllophaga)	
Ardillas	

Cosecha

La recolección de las mazorcas se da luego de que haya transcurrido un lapso de 120 – 150 días posteriores a la fecundación, esto dependerá de la variedad, debemos evitar la recolección de mazorcas verdes, enfermas o con plagas y demasiado maduras ya que afectaran a las almendras que estén en óptimas condiciones para su cosecha, así evitaremos afectar a la calidad del producto.

2.2. Diseño del sistema de monitoreo

En esta sección se diseñará la red utilizando la tecnología LoRaWAN y la red móvil, la cual consistirá en nodos ubicados en el cacao con la característica de poder enviar datos GPS a un gateway, el terreno estará delimitado con el uso de un geocercado virtual, cada uno de estos nodos usarán la topología estrella, la cual si el cacao sale de la zona delimitada, se enviará una alerta a la plataforma thingsboard, notificando al agricultor. Seguido de eso pasará a usar la red móvil, la cual en zonas que tenga señal, enviará los datos de ubicación mediante un mensaje SMS con la ubicación detallada en google maps.

2.2.1. Estructura

La red planteada se puede observar en la Figura 2.7, la cual se encuentra conformada por los dispositivos Pytrack, Módulo SIM808, gateway y la red móvil.

Los dispositivos Pytrack serán los encargados de enviar la ubicación de la mazorca de cacao, la conexión entre los datos y el servidor se realiza mediante un enlace a el Gateway MilesightUG67 con una conexión LoRaWAN a 915 MHz. Los dispositivos estarán registrados en ChirpStack, para luego sincronizar los datos con la plataforma Thingsboard. La visualización de los datos se hará en un mapa proporcionado por OpenStreetMapsde, donde se vera la latitud, longitud y la ubicación.

La geocelda virtual es definida mediante un radio determinado, lo que será un parámetro para la elección de la red entre LoRaWAN y la red móvil. Este procedimiento se define en la programación de los dispositivos Fipy y Pytrack. Una vez que el dispositivo Fipy salga de la geocelda el modulo SIM808 obtendrá las coordenadas GPS y con el uso de la red móvil el dispositivo enviara un mensaje de texto al teléfono con un enlace directo a con las coordenadas.

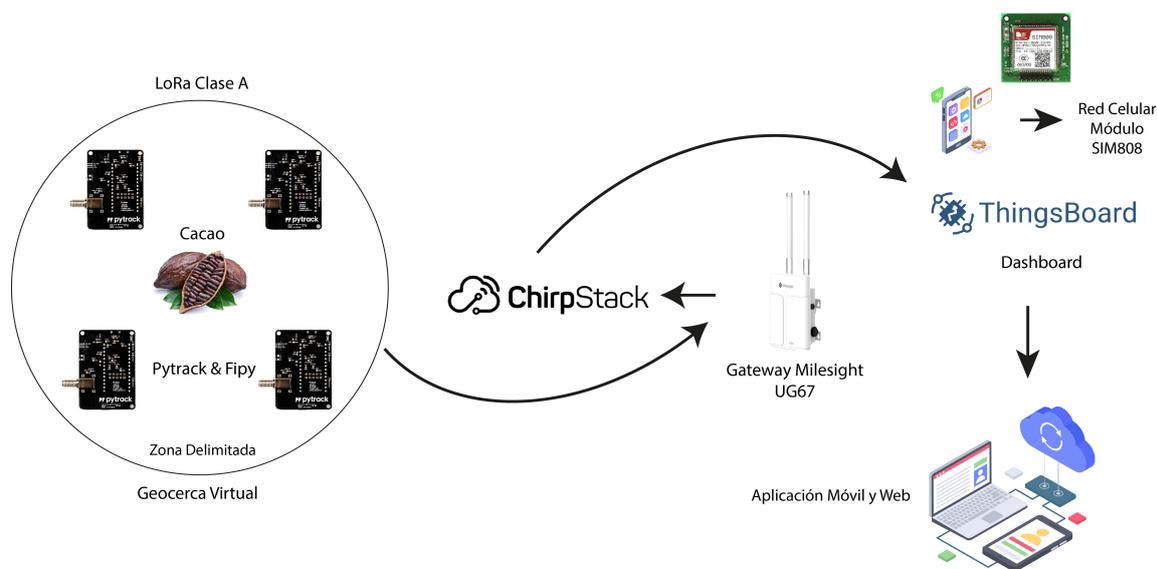


Figura 2.7: Arquitectura de funcionamiento del sistema.

2.2.2. Fipy

FiPy es un dispositivo de desarrollo para IoT creado por Pycom que permite la creación de soluciones de IoT en diversas redes de comunicación, como LoRaWAN, Sigfox, LTE-M, NB-IoT y Wi-Fi. El dispositivo es muy versátil como se puede observar en la Figura 2.8 [61].

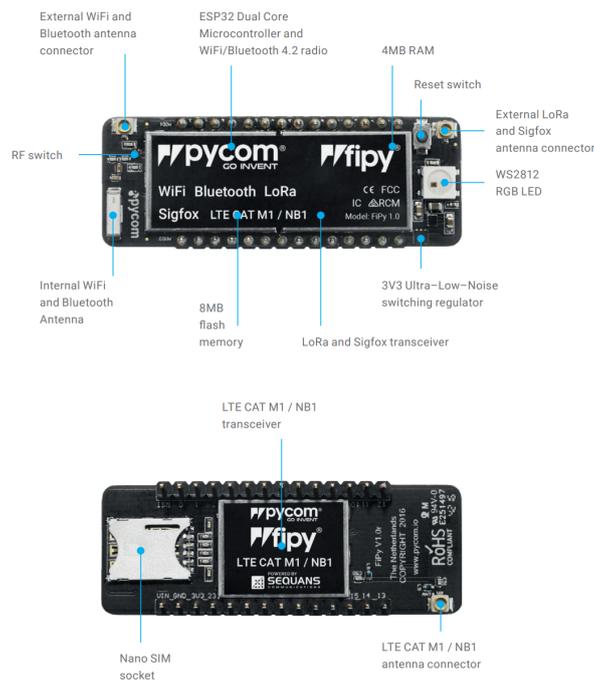


Figura 2.8: Diagrama Fipy y principales características.

Para mejorar la funcionalidad del dispositivo se utiliza Pytrack la cual es una tarjeta de expansión que agrega varios sensores y características adicionales, como GPS, brújula, acelerómetro, sensor de luz ambiental y un conector para una antena externa, lo que permite al FiPy conectarse a varias redes de comunicación. FiPy con Pytrack es una plataforma completa de desarrollo de IoT que permite la creación de soluciones avanzadas de IoT con una amplia gama de sensores y capacidades de comunicación.

El dispositivo es compatible con varias redes de comunicación, se puede programar en MicroPython y C, e integra varios sensores y características adicionales a través de Pytrack, lo que permite a los usuarios agregar fácilmente capacidades de monitoreo y seguimiento a sus proyectos de IoT [61]. Además, el dispositivo es compatible con varias plataformas en la nube, lo que permite a los usuarios enviar datos a la nube y analizarlos para obtener información útil.

2.2.3. Pytrack

Pytrack es un complemento diseñado para la placa Pycom, una plataforma de IoT basada en microcontroladores de bajo consumo de energía. Pytrack contiene una amplia variedad de sensores, incluyendo un acelerómetro, magnetómetro, giroscopio, barómetro, sensor de luz ambiental y GPS como se aprecia en la figura 2.10, lo que lo convierte en una solución ideal para aplicaciones de monitoreo ambiental, seguimiento de activos, seguimiento de fitness y otras aplicaciones de IoT [62]. Pytrack también posee un puerto de expansión que permite la conexión de módulos adicionales, como sensores externos y módulos de comunicación. Debido a esta característica, Pytrack es altamente personalizable y es adecuado para una amplia variedad de aplicaciones de IoT.

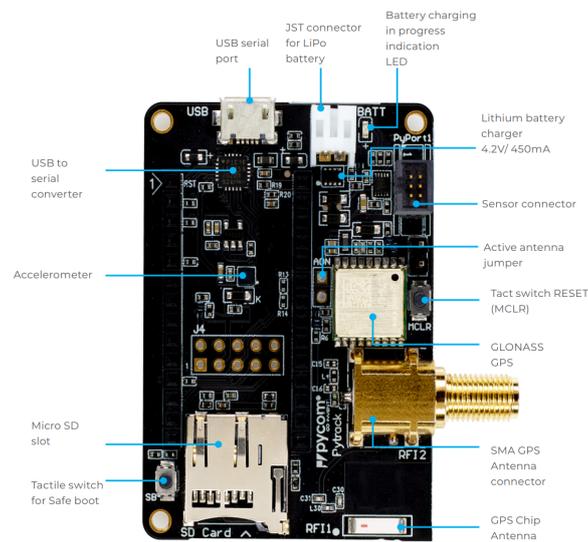


Figura 2.10: Placa Pytrack

Características Pytrack

Pytrack 2.0 es una versión mejorada del módulo Pytrack para dispositivos de IoT basados en la placa Pycom. A continuación se presentan algunas de sus características y sus diferencias con la versión anterior [62]:

- Mejora del chip GNSS: cuenta con el chip GNSS ublox MAX-M8Q, que ofrece una mayor precisión y mejor desempeño en entornos urbanos y con obstáculos. La versión anterior utilizaba el chip GNSS SAM-M8Q.

- Integración de sensores: tiene incorporados más sensores que la versión anterior, incluyendo un acelerómetro de tres ejes, un magnetómetro y un sensor de luz ambiental.
- Compatibilidad con redes LPWAN: puede conectarse a redes de baja potencia y largo alcance (LPWAN) como LoRaWAN, NB-IoT y LTE-M. La versión anterior solo era compatible con la red Sigfox.
- Conectividad mejorada: cuenta con un puerto USB-C y un conector para tarjeta microSD. La versión anterior tenía un puerto micro-USB y no tenía soporte para tarjetas microSD.
- Mayor eficiencia energética: utiliza menos energía que la versión anterior, lo que permite una mayor duración de la batería.

En resumen, ofrece mejoras significativas en términos de precisión, conectividad, eficiencia energética y características adicionales de sensores.

2.2.4. ESP32

El ESP32 es un dispositivo de bajo coste diseñado para aplicaciones de IoT con alta eficiencia. Ha sido desarrollado por Espressif Systems y es una opción popular gracias a su conectividad Wi-Fi y Bluetooth, bajo consumo de energía y capacidad de procesamiento. Cuenta con un procesador de doble núcleo que le permite realizar cálculos complejos de forma rápida y eficiente, y una gran cantidad de memoria integrada, lo que lo hace ideal para proyectos que requieren mucho procesamiento de datos. También tiene soporte para protocolos de seguridad para garantizar una comunicación segura y confiable. El ESP32 es compatible con una variedad de plataformas de desarrollo, incluyendo el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, lo que facilita su integración en proyectos existentes y acelera el proceso de desarrollo. En resumen, el ESP32 es una opción popular para proyectos de IoT que requieren conectividad inalámbrica, procesamiento de datos y bajo consumo de energía[63], como se puede observar en la Figura 2.11.



Figura 2.11: Módulo ESP32.

En la Tabla 2.5 se muestran las características del Módulo ESP32.

Tabla 2.5: Características del Módulo ESP32

Procesador	Dos núcleos de CPU Xtensa de 32 bits a 240 MHz Procesador de señal digital (DSP) para cálculos complejos
Memoria	520 KB de SRAM 4 MB de memoria flash
Conectividad	Wi-Fi 802.11 b/g/n Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE Puerto Ethernet MAC Admite criptografía de hardware AES, RSA, SHA, ECC y RNG
Interfaces	34 pines de E/S GPIO 12 bits de conversión analógico a digital (ADC) con hasta 18 canales de entrada 2 DAC de 8 bits 2 módulos I2C 2 módulos SPI 2 módulos UART Puerto de cámara serie de alta velocidad (HSPI) y puerto de cámara paralela (DCMI) Puerto de bus de memoria externa (EMM) y puerto de interfaz de memoria (SPIRAM)
Energía	Rango de voltaje de entrada: 2,2 V a 3,6 V Consumo de energía extremadamente bajo en modo de espera (hasta 5 μ A) y en modo de sueño profundo (hasta 10 μ A)

2.2.5. SIM808

El módulo SIM808 es un dispositivo electrónico que combina un módulo GSM/GPRS y GPS en un solo paquete. Este dispositivo permite realizar llamadas y enviar mensajes de texto a través de la red móvil GSM, así como enviar y recibir datos a través de la conexión GPRS. Además, el módulo SIM808 también incluye un receptor GPS integrado para conocer la ubicación geográfica precisa del dispositivo [64].

El módulo SIM808 es ampliamente utilizado en proyectos de seguimiento de vehículos, sistemas de seguridad, monitoreo remoto, sistemas de telemetría y otros dispositivos IoT que requieren conectividad móvil y GPS. El módulo SIM808 es compatible con una amplia variedad de microcontroladores y placas de desarrollo y cuenta con un conjunto de pines de entrada y salida para integrar otros dispositivos y sensores [64].

El uso del módulo SIM808 ofrece varias ventajas, incluyendo la capacidad de comunicación remota en cualquier momento y lugar, la precisión del módulo GPS integrado para conocer la ubicación exacta del dispositivo, y su facilidad de uso y fiabilidad gracias a su compatibilidad y calidad de diseño y fabricación. En resumen, el módulo SIM808 es una solución completa y versátil para proyectos que requieren conectividad móvil y GPS en la Fig 2.12.

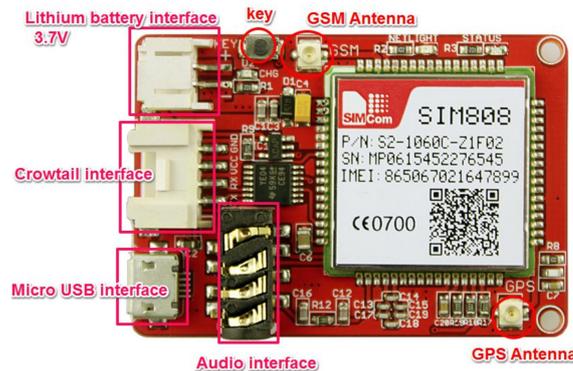


Figura 2.12: Módulo SIM 808.

2.2.6. Gateway LoRa MileSight UG67

La Gateway LoRaWAN para exteriores UG67 de Milesight es un dispositivo de vanguardia diseñado para la conectividad IoT en entornos exteriores. Su tecnología de largo alcance, su diseño resistente y sus avanzadas capacidades de seguridad de red la hacen esencial en aplicaciones de ciudades inteligentes, agricultura inteligente e IoT industrial como se muestra en la Figura 2.13. La UG67 permite la transmisión de datos de baja potencia a larga distancia, con una comunicación inalámbrica de hasta 10 km en aire libre. También cuenta con una carcasa de metal resistente a la intemperie y cifrado AES-128 para proteger los datos transmitidos. Además, la interfaz web de la UG67 es fácil de usar y brinda a los usuarios una gran cantidad de herramientas para controlar y administrar la gateway y los dispositivos conectados a ella. En resumen, la UG67 es una gateway avanzada y eficiente que ofrece soluciones robustas para la conectividad IoT en ambientes exteriores [65]. Las especificaciones del Gateway se muestran en la tabla 2.6.



Figura 2.13: Gateway Misesight para red LoRaWAN.

Tabla 2.6: Características Gateway LoRa MileSight UG67

Conectividad	LoRaWAN: 868 MHz (EU) / 915 MHz (US) / 923 MHz (AS923) LAN: 10/100 Mbps, RJ45 WAN: 10/100 Mbps, RJ45
Protocolos	LoRaWAN 1.0/1.0.2/1.0.3/1.1
Interfaz de usuario	Interfaz de usuario web basada en HTTP / HTTPS SNMP v1/ v2c/ v3, SSH v2.0
Características de hardware	Procesador: ARM Cortex-A7, 1GHz Memoria: 256 MB memoria Flash, 256 MB de RAM Alimentación: 9-48V DC, PoE opcional (802.3af) Consumos de energía: 5W típico, 10W máximo
Características ambientales	Temperatura de operación: -40°C a 70°C Humedad: 10 % a 95 % sin condensación Protección contra rayos; 1KV Protección IP: IP67
Seguridad	Cifrado AES-128 Firma digital Verificación de certificados

2.2.7. Rastreo GPS con Red celular

Se planteó inicialmente utilizar el FiPy con PyTrack para la parte de GPS con red celular. Sin embargo, debido a los problemas presentados con la red CAT-M1 de la empresa Claro y los altos costos de implementación, se decidió utilizar un módulo aparte para este propósito. Para el rastreo GPS, se emplea la SIM 808 con la red celular suministrada por una SIM y las antenas incluidas en el módulo. En el diseño inicial, se controló este módulo con un Arduino Uno. No obstante, debido a las limitaciones del tamaño del circuito, se optó por utilizar el módulo ESP32 y diseñar una placa.

El diseño de la placa se ha llevado a cabo mediante el software Eagle de Autodesk y cuenta con un ESP 32 que se encarga de controlar el módulo SIM808 que

se presenta en la Figura 2.14. Además, dispone de botones de reinicio y un botón para capturar las coordenadas de latitud y longitud, las cuales se utilizarán para comprobar si el dispositivo se mueve. Asimismo, se incluyen pines para grabar y subir el programa, pines para conectar actuadores y conectores de alimentación tanto para la placa como para el módulo, las medidas de la placa son de 5.41x4.77cm.

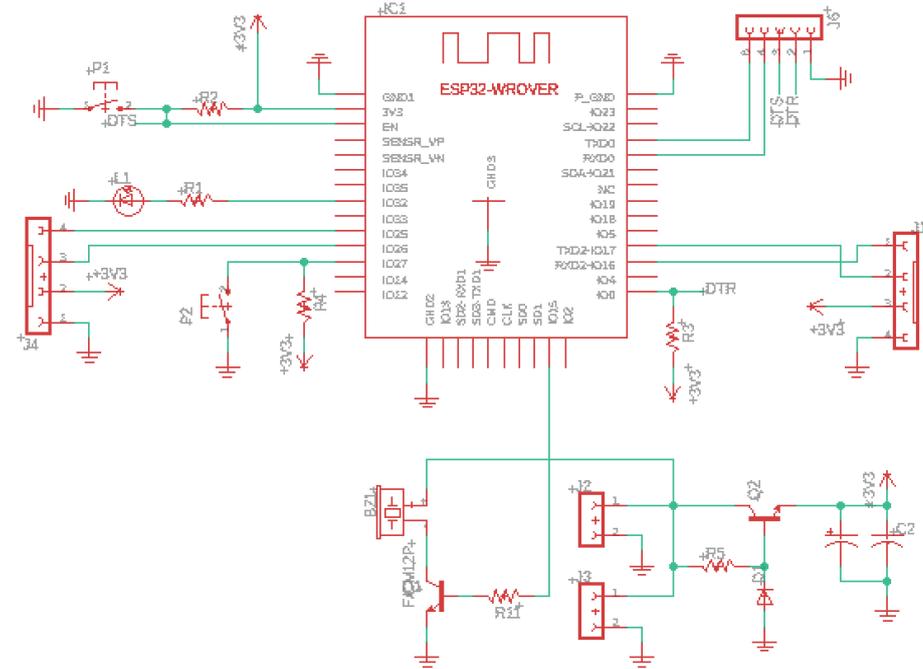


Figura 2.14: Diseño de placa.

Después de haber fabricado la placa, se añadió una batería de litio de 2000 mAh, la cual se encuentra sujeta a una base de vidrio con el objetivo de separarla de la placa y evitar posibles cortocircuitos. Encima de la placa se sitúa el módulo SIM808 como se muestra en la Figura 2.15.

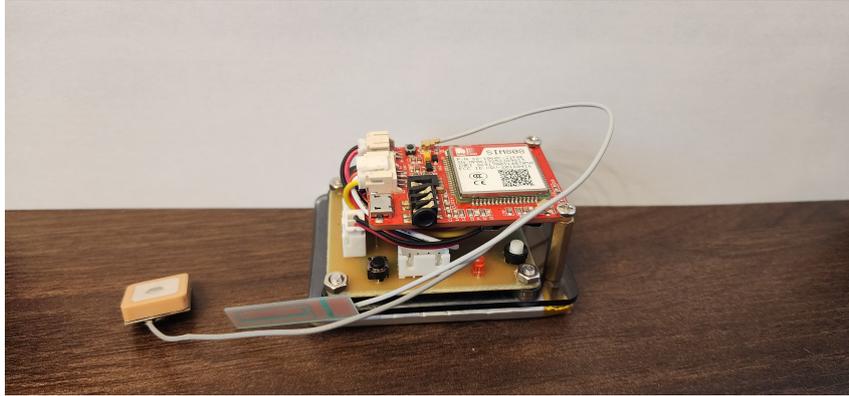


Figura 2.15: Diseño Final.

2.3. Diseño del software del sistema, visualización y bases de datos.

El software del sistema utiliza una base de datos denominada Amazon Web Services (AWS), que se encarga de almacenar la información que llega a la puerta de enlace de Milesight. Esta base de datos puede generar registros detallados de los distintos dispositivos conectados a la plataforma. Una vez que se completa la configuración del dispositivo, se debe implementar una plataforma de visualización de datos. Para ello se utilizó Thingsboard, una plataforma que permite visualizar y analizar datos en tiempo real. Gracias a la combinación de estas herramientas, el sistema puede almacenar y visualizar de manera eficiente los datos generados por varios dispositivos conectados a la plataforma. Esto permite un óptimo seguimiento y control de los procesos y operaciones que se realizan en la plataforma, aumentando la eficiencia y productividad de todo el sistema.

2.3.1. Amazon Web Service a ChirpStack

Para implementar Debian/Ubuntu desde AWS hacia ChirpStack, es necesario instalar y configurar ChirpStack Gateway Bridge en una instancia de Debian/Ubuntu en AWS. Una vez instalado y configurado, ChirpStack Gateway Bridge permitirá que los datos de los dispositivos LoRaWAN sean enviados al servidor de aplicaciones

ChirpStack para su posterior procesamiento y análisis. Para lograr esto, se debe asegurar que la instancia de Debian/Ubuntu esté configurada correctamente, se haya asignado una dirección IP elástica y se hayan establecido las reglas de seguridad adecuadas para permitir el tráfico SSH. Una vez completada la instalación y configuración de ChirpStack Gateway Bridge, la aplicación puede ser iniciada en la instancia de Debian/Ubuntu para recibir los datos de los dispositivos LoRaWAN y enviarlos al servidor de aplicaciones ChirpStack.

2.3.2. Registro de Dispositivos GPS en ChirpStack usando red LoRa

La Figura 2.16 representa los dispositivos Fipy con su respectivo shield Pytrack registrados en el servidor para ellos se tiene que seguir un instructivo que se puede encontrar en la pagina de ChirpStack.

Last seen	Device name	Device EUI	Device profile	Link margin	Battery
<input type="checkbox"/> a day ago	Gps	70b3d549947c3b98	GpsOTAA	n/a	n/a
<input type="checkbox"/> 2 days ago	Gps2	70b3d549958d8656	GpsOTAA	n/a	n/a
<input type="checkbox"/> a day ago	Gps3	70b3d54999563625	GpsOTAA	n/a	n/a
<input type="checkbox"/> a day ago	Gps4	70b3d5499fb0986c	GpsOTAA	n/a	n/a
<input type="checkbox"/> a day ago	Gps5	70b3d5499b5e44d5	GpsOTAA	n/a	n/a

Figura 2.16: Dispositivos registrados

Para registrar los dispositivos en el servidor es necesario conocer dos parámetros de identificación el device EUI, que puede ser generado mediante código en micropython en VisualBasic.

Listing 2.1: Código para generar ID EUI

```
from network import LoRa
import ubinascii
```

```
lora = LoRa()
print("DevEUI: \u2013" % (ubinscii.hexlify(lora.mac()).
decode('ascii')))
```

Una vez generado el EUI se insertan los campos en el servidor como Nombre, tipo de codificación que se usará para el envío de datos como se aprecia en la figura 2.17, como puede ser OTAA o ABP

The screenshot shows a web form for creating a device. It has three tabs: 'GENERAL' (selected), 'VARIABLES', and 'TAGS'. The 'GENERAL' tab contains the following fields and options:

- Device name ***: A text input field with a note: "The name may only contain words, numbers and dashes."
- Device description ***: A text input field.
- Device EUI ***: A text input field with a "MSB" label and a refresh icon.
- Device-profile ***: A dropdown menu currently showing "Device-profile".
- Disable frame-counter validation**: A checkbox with a note: "Note that disabling the frame-counter validation will compromise security as it enables people to perform replay-attacks."
- Device is disabled**: A checkbox with a note: "ChirpStack Network Server will ignore received uplink frames and join-requests from disabled devices."

A blue "CREATE DEVICE" button is located at the bottom right of the form.

Figura 2.17: Configuración de dispositivo

Para posteriormente generar la appKey, como se puede observar en la Figura 2.18.

The screenshot shows the 'KEYS (OTAA)' tab in the ChirpStack Network Server interface. The breadcrumb is "Applications / Cacao / Devices / Gps". There is a "DELETE" button in the top right corner. The "KEYS (OTAA)" tab is selected, and it contains the following elements:

- Application key ***: A text input field containing a masked key (represented by dots) and a toggle icon.
- A note: "For LoRaWAN 1.0 devices. In case your device supports LoRaWAN 1.1, update the device-profile first."
- A blue "SET DEVICE-KEYS" button at the bottom right.

Figura 2.18: API KEY

Finalmente se pueden verificar las tramas recibidas al momento de realizar la configuración en el código, para la recepción y envío de datos en LoRa como se aprecia en la figura 2.19.

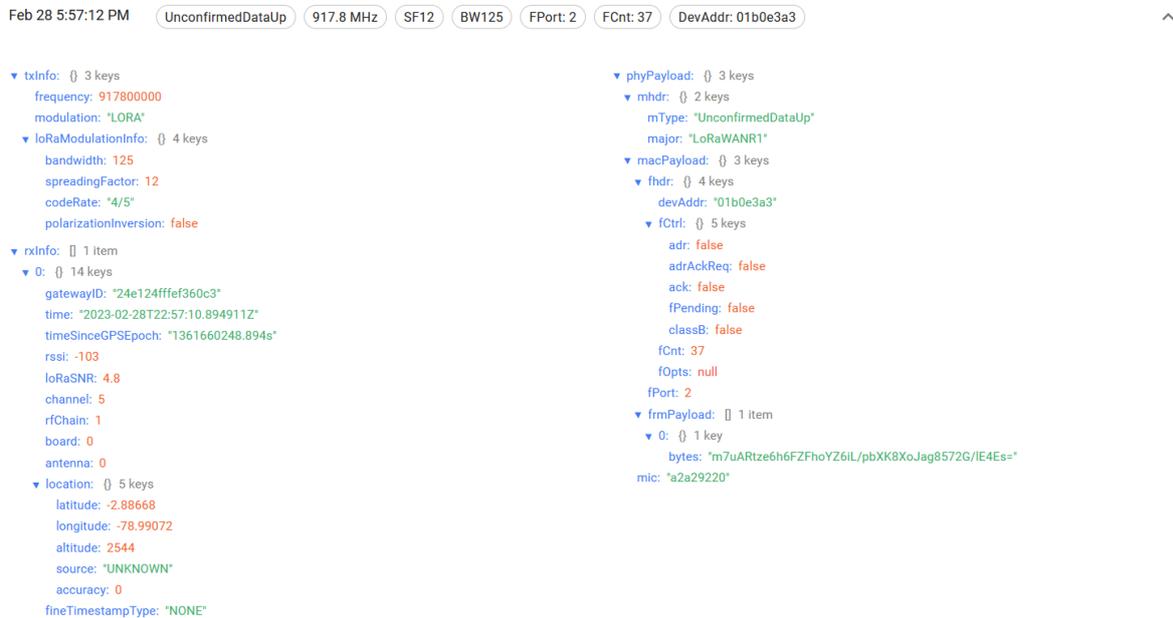


Figura 2.19: Trama LoRa

2.3.3. Thingsboard

Thingsboard es una plataforma de código abierto para la gestión de dispositivos y la recopilación, procesamiento y visualización de datos en tiempo real. Está diseñada para IoT, permite a los usuarios conectar dispositivos de diferentes fabricantes y protocolos, así como, crear paneles de control personalizados para visualizar datos y enviar comandos a los dispositivos. En este caso se usará una integración con la plataforma ChirpStack, mediante HTTP como se ve en la Figura 2.20. Esta muestra el tipo de payload, la cabecera que debe ser igual al que se usa en la plataforma Thingsboard así como su endpoint.

DEVICES MULTICAST GROUPS APPLICATION CONFIGURATION **INTEGRATIONS**

Update HTTP integration

Payload marshaler *
JSON

This defines how the payload will be encoded.

Headers

Header name	Header value	
Content-Type	application/json	🗑️

Endpoints

Endpoint URL(s) for events
`https://thingsboard.cloud/api/v1/integrations/chirpstack/8eef2302-8a20-ed97-e5e3-7cada98ed26b`

ChirpStack will make a POST request to this URL(s) with 'event' as query parameter. Multiple URLs can be defined as a comma separated list. Whitespace will be automatically removed.

[UPDATE INTEGRATION](#)

Figura 2.20: Integración ChirpStack con Thingsboard

En esta integración se deben ingresar los siguientes campos: el nombre, el Uplink encargado de analizar la carga útil y mediante código poder transformarlo para que pueda ser entendido por la plataforma. Además, se debe ingresar la Base URL de la plataforma Thingsboard y la dirección del servidor de aplicaciones de ChirpStack junto con el puerto asignado anteriormente mostrada en la Fig. 2.21. También es necesario ingresar el token generado en ChirpStack, el cual solo se puede ver una vez y debe ser guardado cuidadosamente.

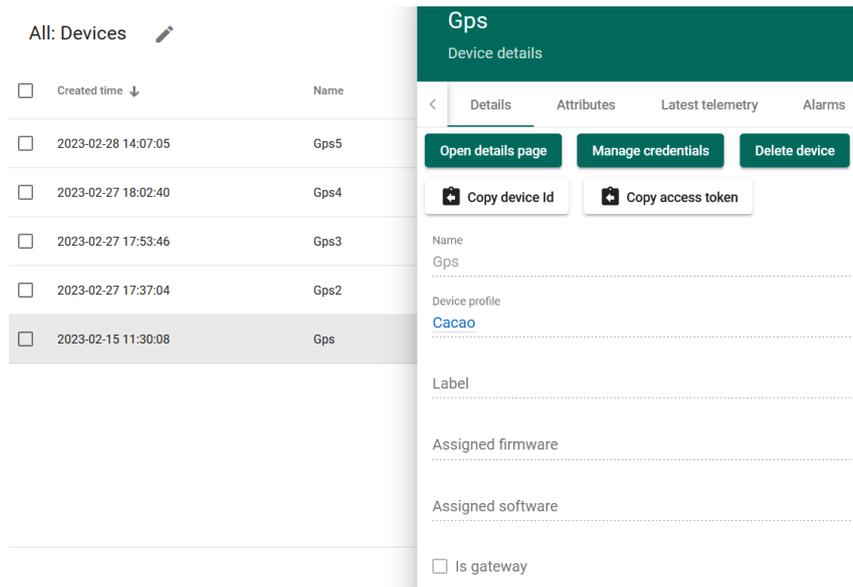


Figura 2.22: Token de acceso

Se puede observar la telemetría recibida datos tanto de longitud, latitud, niveles de batería y el radio de la geocerca que esta establecido como se aprecia en la Figura 2.23.

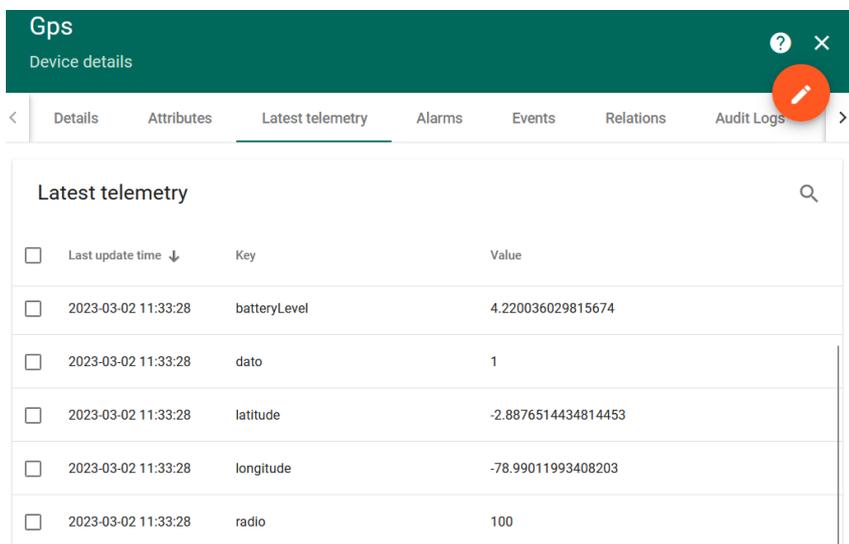


Figura 2.23: Telemetría recibida

2.3.4. Visualización

La plataforma mostrará los detalles de ubicación de cada uno de los dispositivos GPS registrados, incluyendo información como la latitud y la longitud de cada

dispositivo. Para ayudar a visualizar la ubicación de los dispositivos como se ve en la Figura 2.24, se ha integrado un mapa proporcionado por OpenStreetMaps, que permitirá a los usuarios observar la ubicación exacta de cada dispositivo GPS.

Además, se ha implementado una sección de alertas críticas que permitirá a los usuarios saber si una mazorca ha salido de la zona delimitada como se aprecia en la Figura 2.25. Cada alerta será presentada de diferentes tipos de severidad, mostrando si está dentro de la geocerca, fuera de la geocerca o si no se pueden obtener los datos del gps, esto será útil para los agricultores que desean monitorear el crecimiento de sus cultivos de cacao y asegurarse de que están creciendo dentro de los límites de la zona delimitada. También se ha implementado una alerta para indicar que la mazorca se encuentra dentro de la zona delimitada y una alerta indeterminada para señalar que no hay señal del GPS, lo que puede ser útil para identificar problemas de conectividad con los dispositivos GPS. En general, estas alertas críticas ayudarán a los usuarios a tomar medidas rápidas y efectivas para garantizar el crecimiento y la salud de sus cultivos de maíz.

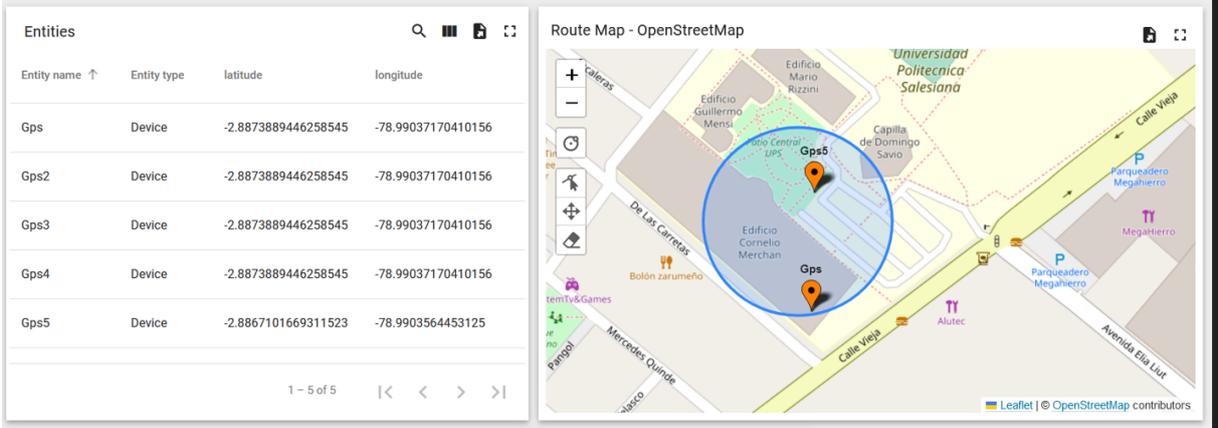


Figura 2.24: Dashboard

Alarms 🔍 ☰ 📄 🗑️

🕒 Realtime - last day

<input type="checkbox"/>	Created time	Originator	Type	Severity	Status ↓			
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 16:59:26	Gps3	Dentro de la Geocelda	Minor	Cleared Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 14:18:34	Gps5	Fuera de la Geocelda	Critical	Cleared Acknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 14:20:41	Gps5	Dentro de la Geocelda	Minor	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 14:07:06	Gps5	Sin Información no hay datos del GPS	Indeterminate	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 17:01:34	Gps3	Fuera de la Geocelda	Critical	Active Unacknowledged	...	✓	✕

Figura 2.25: Alertas

2.4. Diseño de los escenarios de las pruebas.

Se plantean dos escenarios de pruebas para los dispositivos. En la que dependerán factores como el tipo de terreno, línea de vista, obstáculos y vegetación.

2.4.1. Primer escenario: Campus Universitario

El primer escenario consiste en llevar a cabo pruebas de cobertura en el campus universitario de la Universidad Politécnica Salesiana con el objetivo de comprobar la calidad de la señal de los dispositivos utilizados. La prueba se realizará mediante el recorrido completo del campus como se puede apreciar en la figura 2.26 para identificar áreas donde los dispositivos no tengan señal. Para garantizar el correcto funcionamiento de estos dispositivos, es necesario contar con señal satelital para el GPS y cobertura de la red LoRa y red celular para el envío de los datos GPS. Es fundamental contar con una buena cobertura en todas las áreas del campus para garantizar que los dispositivos puedan transmitir información de manera efectiva.

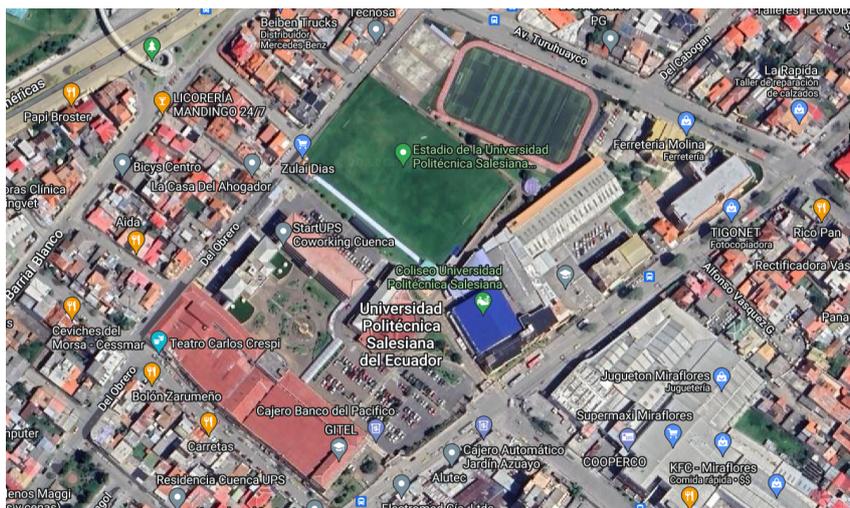


Figura 2.26: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca

En este sentido, las pruebas de cobertura permitirán identificar áreas donde se requiere mejorar la señal satelital o la cobertura de la red LoRa y red celular. Una vez que se hayan identificado estas áreas, se podrán tomar medidas para mejorar la calidad de la señal y garantizar un mejor funcionamiento de los dispositivos.

Además, las pruebas de cobertura también permitirán identificar posibles problemas con los dispositivos, como fallas en el GPS o en la transmisión de datos. Esto permitirá a los desarrolladores del proyecto tomar medidas para solucionar estos problemas y garantizar un mejor funcionamiento de los dispositivos en el futuro.

2.4.2. Segundo escenario: Cultivo de cacao

Las pruebas en una plantación de cacao real no pudieron llevarse a cabo debido a los problemas presentados por las vías y el huracán Yaku, que en el momento de las pruebas se encontraba en el Pacífico. Debido a este cambio repentino del clima, se presentaron constantes deslaves, fuertes lluvias e inundaciones en la región costa donde se pretendía realizar las pruebas. Por estos motivos, se decidió desarrollar las pruebas en un sector rural de Paute llamado Uzhupud que se muestra en la figura 2.27, donde existe una plantación de maíz que, debido a la densidad de vegetación y árboles, asimila las condiciones de prueba de una plantación de cacao.



Figura 2.27: plantación de maíz en el sector de Uzhupud

Es importante destacar que, debido a los problemas presentados en la plantación de cacao, se ha tomado la decisión de realizar las pruebas en un sector rural de Paute, el cual ha sido seleccionado cuidadosamente para garantizar que las condiciones de prueba sean similares a las que se presentarían en una plantación de cacao. De esta manera, se espera obtener resultados precisos y fiables que permitan evaluar adecuadamente la conectividad de la red LoRa, red celular, determinar su eficiencia y rendimiento.

En el segundo escenario, se llevarán a cabo pruebas de cobertura en un cultivo para evaluar la conectividad de la red LoRa y determinar hasta dónde llega la señal. Además, se comprobará si las condiciones climáticas, geográficas y el follaje tienen consecuencias negativas para la red. También se probará la eficiencia y el rendimiento de la red al utilizar diferentes spread factors para el envío y recepción de datos. Finalmente, se verificará la calidad de la señal de la red celular para el envío de la posición del producto, y se evaluará si las condiciones del lugar afectan el envío de SMS cada 20 segundos, tal como está establecido.

2.5. Implementación del sistema.

La implementación del sistema es un paso esencial en el proceso de verificación del dispositivo final, ya que permite verificar su correcto funcionamiento en diversos escenarios. Para ello, se han considerado dos escenarios. Primero en el campus universitario, con el fin de detectar posibles fallas o problemas que puedan comprometer su funcionamiento en el escenario final y en una plantación real para poder verificar los resultados reales.

2.5.1. Implementación del Sistema Campus Universitario

El sistema ha sido planteado mediante la red LoRa existente en la zona de la universidad Politecnica Salesiana sede Cuenca, la cual permite la conexión de los dispositivos y el envío de datos hacia la plataforma Thingsboard para la respectiva visualización.

Para las respectivas pruebas se estableció un radio de 100 metros en la zona del gateway, para delimitar la geocelda. Si un dispositivo se sale de esta área se enviarán alarmas al respectivo dashboard.

Para la simulación del sistema se utilizó una mazorca de cacao y se procedió a realizar una incisión, retirar las semillas que contienen adentro, esperando a un proceso de secado debido a que la mucosidad que presenta el cacao es corrosiva para los dispositivos, como se observa en la Figura 2.28.



Figura 2.28: Cacao usado para pruebas en la Universidad

En las Figuras 2.29 y 2.30 muestran los diferentes movimientos de los dispositivos y la generación de las alertas si salen de la geocelda.

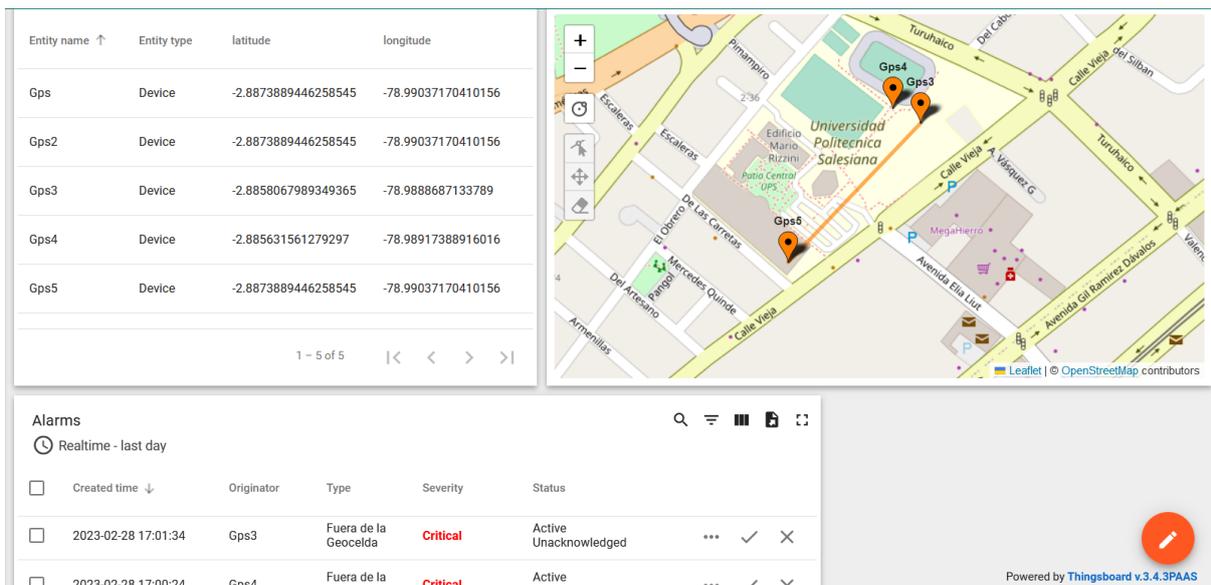


Figura 2.29: Registro de movimiento de dispositivos

Alarms 🔍 📄 🗑️ 🔄

🕒 Realtime - last day

<input type="checkbox"/>	Created time	Originator	Type	Severity	Status ↓			
<input type="checkbox"/>	2023-02-27 17:37:07	Gps2	Sin información no hay datos del GPS	Indeterminate	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 17:01:34	Gps3	Fuera de la Geocelda	Critical	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-27 17:53:49	Gps3	Sin Información no hay datos del GPS	Indeterminate	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 17:00:24	Gps4	Fuera de la Geocelda	Critical	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 16:58:16	Gps4	Dentro de la Geocelda	Minor	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 14:20:41	Gps5	Dentro de la Geocelda	Minor	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-27 18:02:44	Gps4	Sin Información no hay datos del GPS	Indeterminate	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-02-28 14:07:06	Gps5	Sin Información no hay datos del GPS	Indeterminate	Active Unacknowledged	...	✓	✕

Items per page: 10 ▾ 1 - 10 of 10 ⏪ ⏩

Figura 2.30: Registro de alarmas generadas

2.5.2. Implementación del Sistema Uzhupud

Una vez montado el gateway, se procedió a realizar la instalación eléctrica y de red, lo que permitió la comunicación entre los dispositivos y el gateway. Para las pruebas, se establecieron diferentes dispositivos en un cacao, los cuales se movieron a diferentes localizaciones para salir del radio de la geocelda.

El objetivo de estas pruebas fue comprobar el funcionamiento de la tecnología LoRa en un entorno real y evaluar su alcance y capacidad de cobertura. En caso de que los dispositivos salieran del alcance de la geocelda, se activaría automáticamente la red móvil para garantizar la continuidad de la comunicación.

Durante las pruebas, se monitoreó de cerca el comportamiento de los dispositivos y se registraron todos los datos relevantes. Se evaluaron la calidad de la señal, la velocidad de transmisión de datos y la eficacia de la conmutación automática entre la red LoRa y la red móvil.

La zona designada presenta alta cantidad de vegetación, para probar la penetración que tiene la red LoRa, ante este tipo de plantíos. Observados en la Figura 2.33

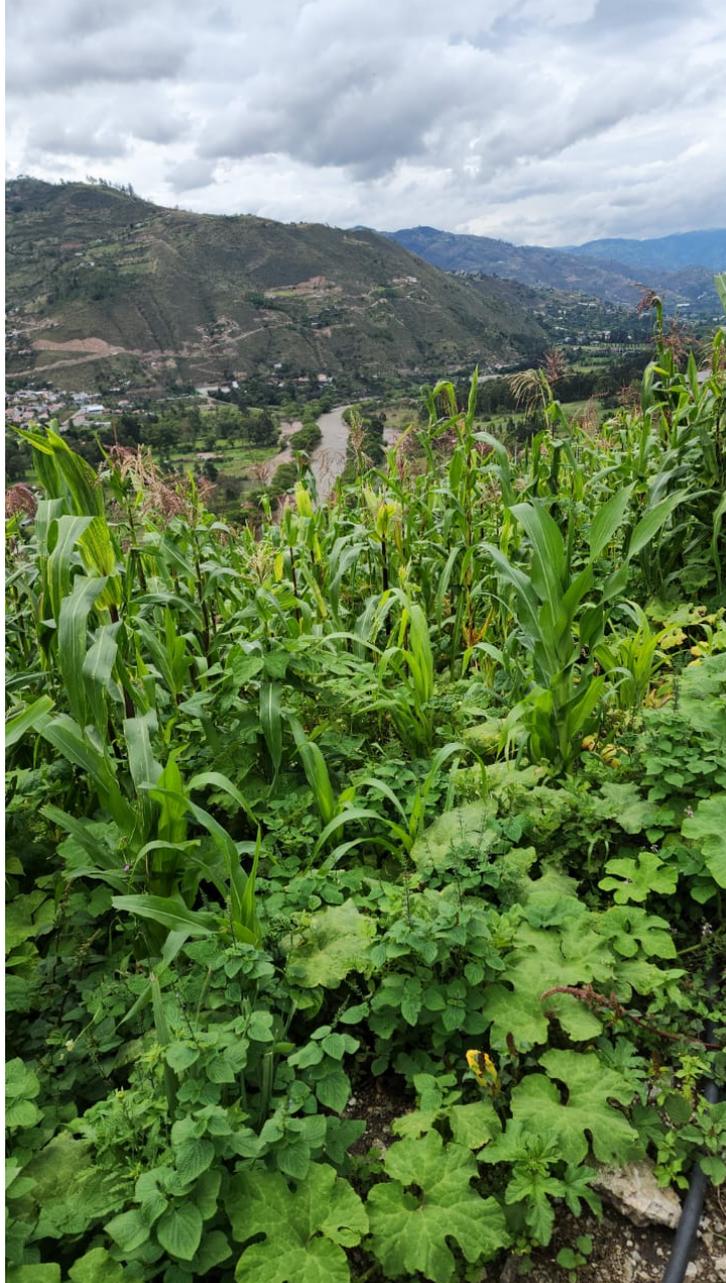


Figura 2.33: Zona de pruebas

Capítulo 3

ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1. Resultados de las pruebas e implementación del sistema en el laboratorio de la universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

Se llevaron a cabo pruebas dentro del campus universitario para evaluar la cobertura y el rendimiento del sistema en entornos. Durante estas pruebas, se analizaron las diferencias en la calidad de la señal en función de la presencia de obstáculos físicos. Se identificaron áreas donde la señal de LoRa y la señal GPS no llegaban, y se registraron observaciones relevantes durante las pruebas. Los resultados de estas pruebas fueron muy satisfactorios y demostraron la capacidad del sistema para integrarse y trabajar en conjunto con otros sistemas. De esta manera se describen los resultados seccionando el sistema de monitoreo y rastreo en dos partes: Con la red LoRa y la red celular.

3.1.1. Red LoRa

La red LoRa de la universidad ha sido probada en diferentes lugares, llevando los dispositivos, a varias localizaciones para determinar si salían o entraban a la geocelda, para posteriormente analizar cuando este fuera del alcance de la red LoRa pueda usar la red celular. Para realizar estas pruebas se utilizó un gateway que se

puede observar en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Gateway Milesight utilizado en las pruebas

La plataforma de monitoreo y rastreo Thingsboard, mostrada en la Figura 3.2, permite la visualización de la información como latitud, longitud, la ubicación en el mapa de los dispositivos y las alertas generadas si estos salen de la geocelda.

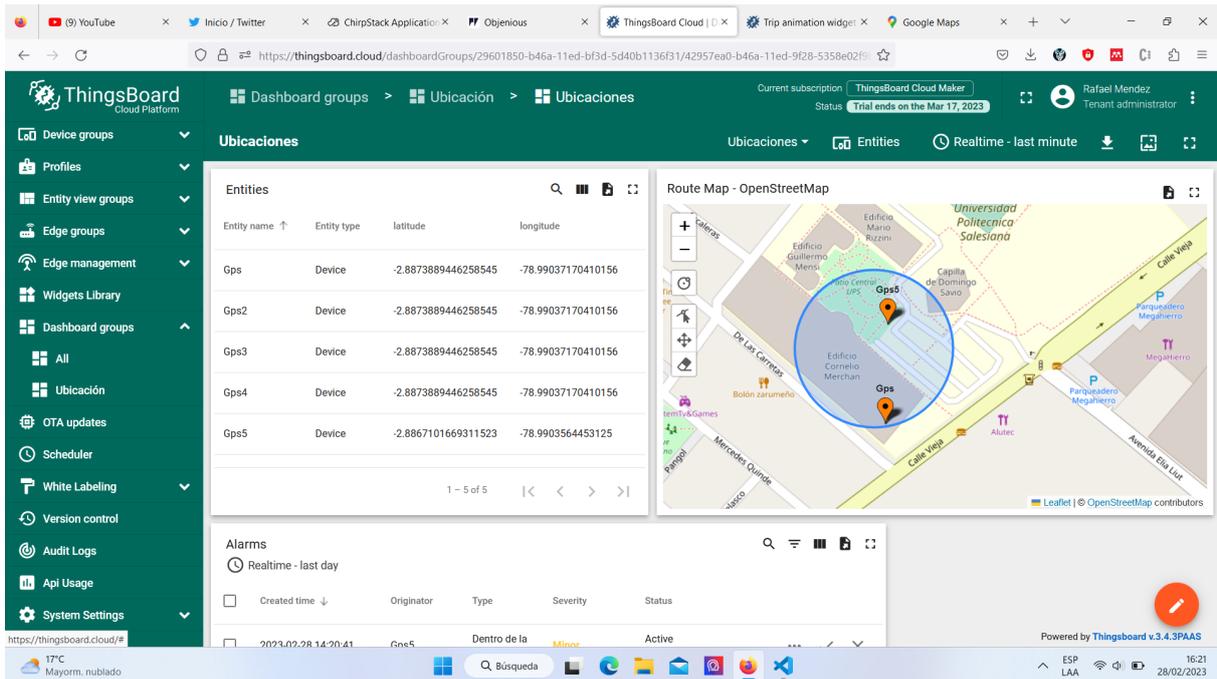


Figura 3.2: Dashboard con información de los dispositivos

Si el dispositivo se sale de la geocelda se puede observar la trayectoria de los mismos, la cual generará una alarma, como se puede ver en la Figura 3.3 y 3.4.

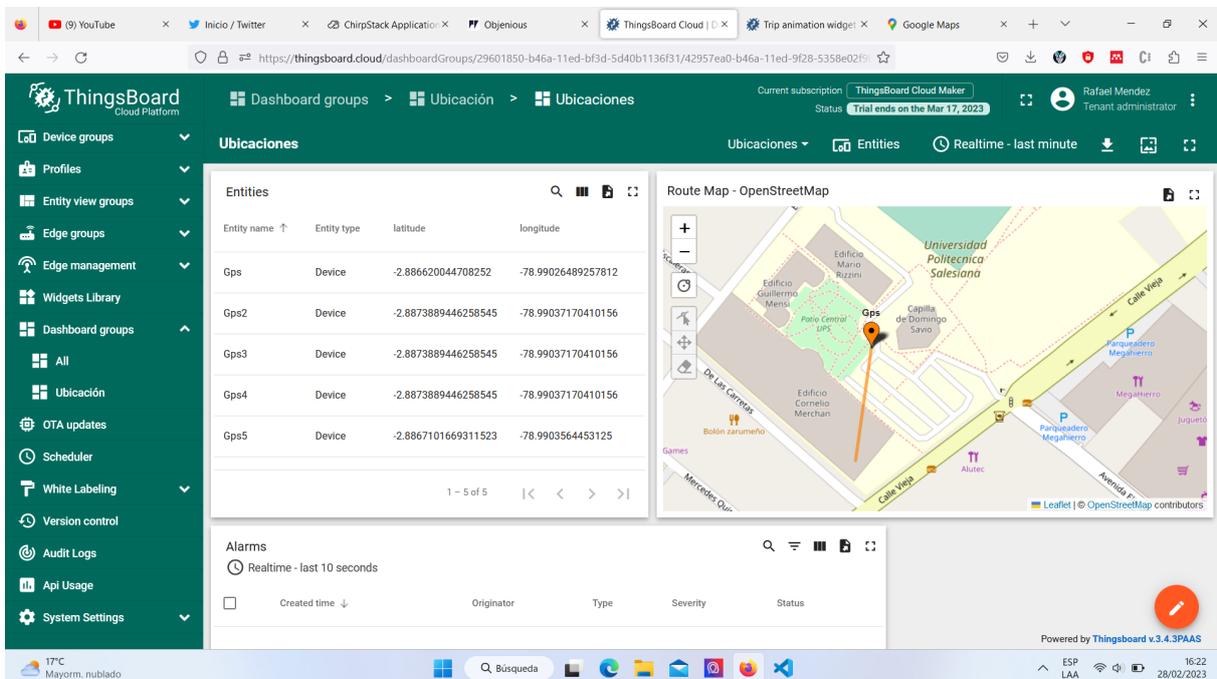


Figura 3.3: Movimiento del dispositivo GPS

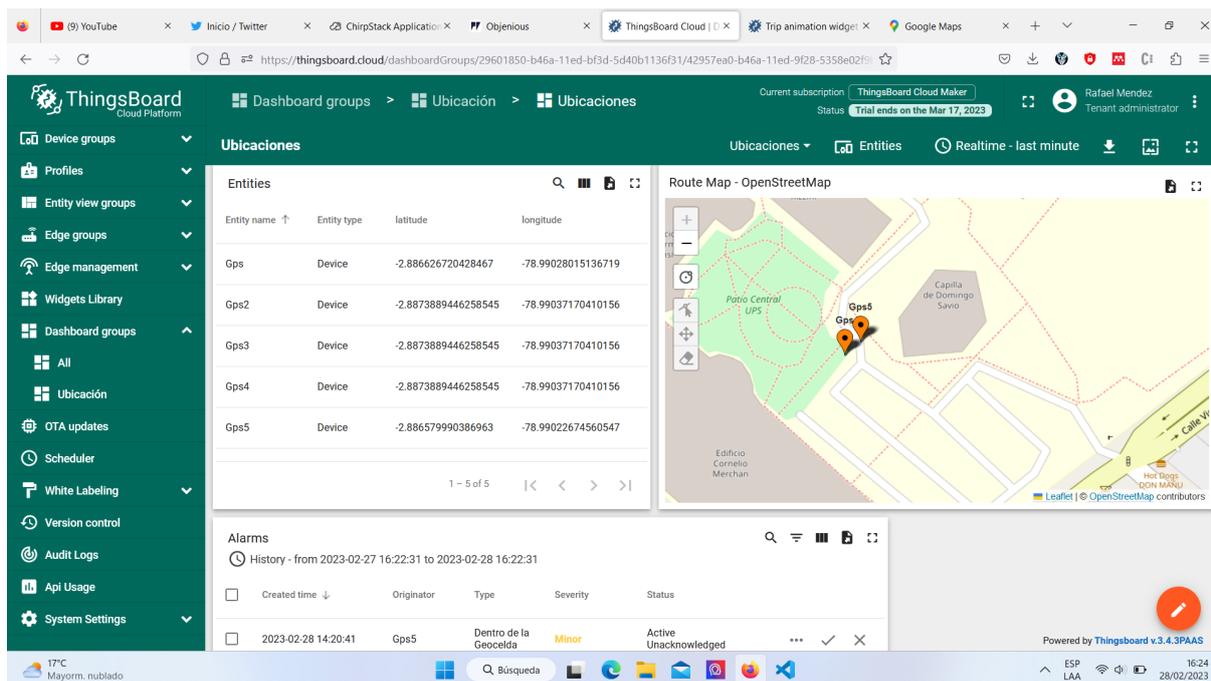


Figura 3.4: Registro de movimiento de los dispositivos

Cuando se activa una alarma, la red LoRa notifica al usuario de manera inmediata. El usuario puede ver la alerta en su panel de control, donde se muestran los detalles de la misma, así como, el dispositivo que la activó, la hora en que se activó y el estado actual de la alarma.

Esta información detallada proporciona al usuario una visión completa de la situación y le permite tomar medidas rápidas y efectivas para abordar el problema, como se observa en la Figura 3.5. Además, la capacidad de la red LoRa para enviar notificaciones en tiempo real ayuda a garantizar que las alarmas se atiendan rápidamente y se minimice cualquier posible daño o pérdida.

La red LoRa es capaz de registrar los diferentes cambios de alarma y mostrarlos en el registro, teniendo en cuenta la variable de la geocelda. Cuando se detecta una alarma, la red LoRa registra el dispositivo que la activó, la hora en que se activó y el tipo de alarma que se activó. Además, la red LoRa también puede registrar la ubicación del dispositivo, lo que permite a los usuarios ver en qué geocelda se activó la alarma, este registro se puede observar en la Figura 3.5.

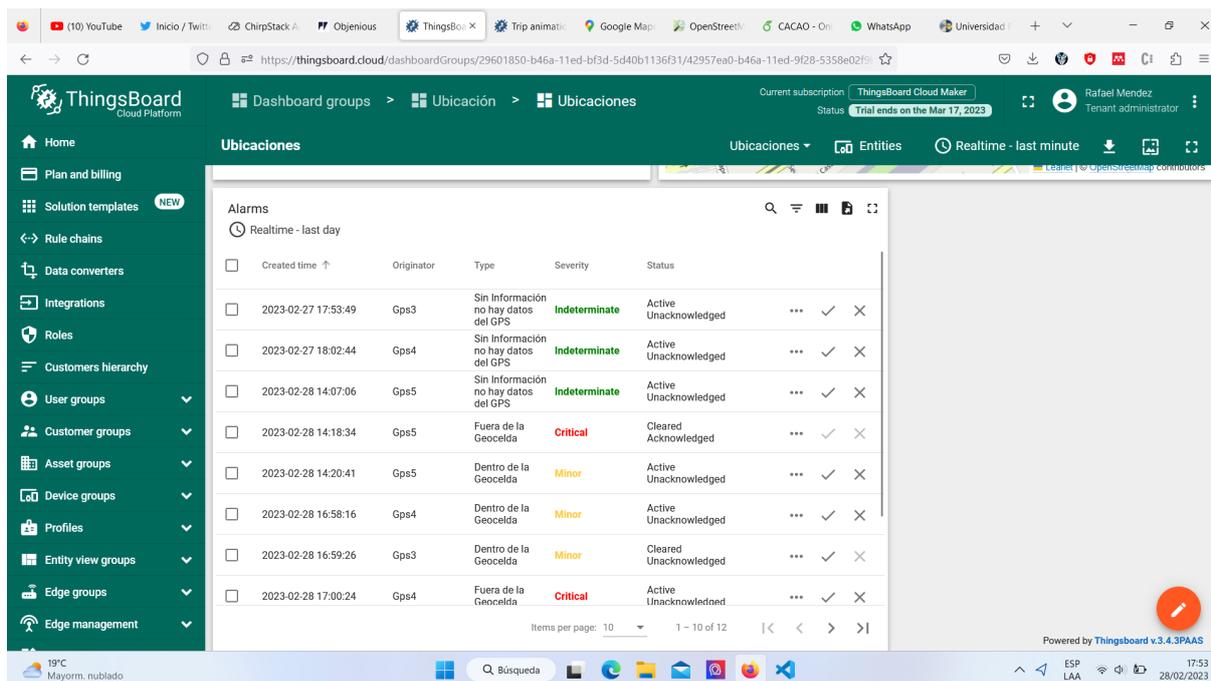


Figura 3.5: Registro de Alertas

3.1.2. Red Celular

La red móvil de la universidad está disponible para cualquier dispositivo, aunque su alcance varía según la antena que dispone cada uno de ellos. Después de realizar pruebas, se ha observado que la antena GPS puede presentar variaciones en su funcionamiento debido a la disponibilidad de una línea de vista directa al espacio exterior para conectarse con los satélites. Si las pruebas se realizan dentro de un edificio, que impide esta conexión, la búsqueda de satélites y las coordenadas pueden verse afectadas. Por lo tanto, se recomienda dejar el dispositivo sin moverse durante un minuto para estabilizar y capturar las coordenadas de origen.

Para comprobar la precisión del GPS, se realizaron pruebas alrededor del campus, tomando como punto de partida las oficinas de GITEL. Se permitió que el dispositivo se estabilizara durante un minuto y, a pesar de estar dentro de un edificio, se logró una buena ubicación del dispositivo con una tasa de error de 5 metros. Luego, el dispositivo compara la coordenada capturada con las demás coordenadas para calcular cuánto se ha movido del lugar original. Si el dispositivo sigue dentro

del rango de tolerancia, que es configurable y se ha probado con rangos de 10 y 50 metros, permanecerá en el bucle de comparación de coordenadas. Sin embargo, si el dispositivo sale del rango de tolerancia, enviará un mensaje con las coordenadas en forma de enlace de Google Maps cada 20 segundos hasta que el dispositivo vuelva al punto de origen o pierda la señal. En este último caso, enviará la última ubicación conocida hasta que recupere la señal y pueda enviar su ubicación actualizada.

Después de realizar las pruebas en el campus universitario, la red celular proporcionó las ubicaciones que se muestran en la Figura 3.6. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas ubicaciones pueden no ser exactas y pueden tener un error de hasta 5 metros, lo cual depende en gran medida de la señal GPS que reciba el dispositivo.

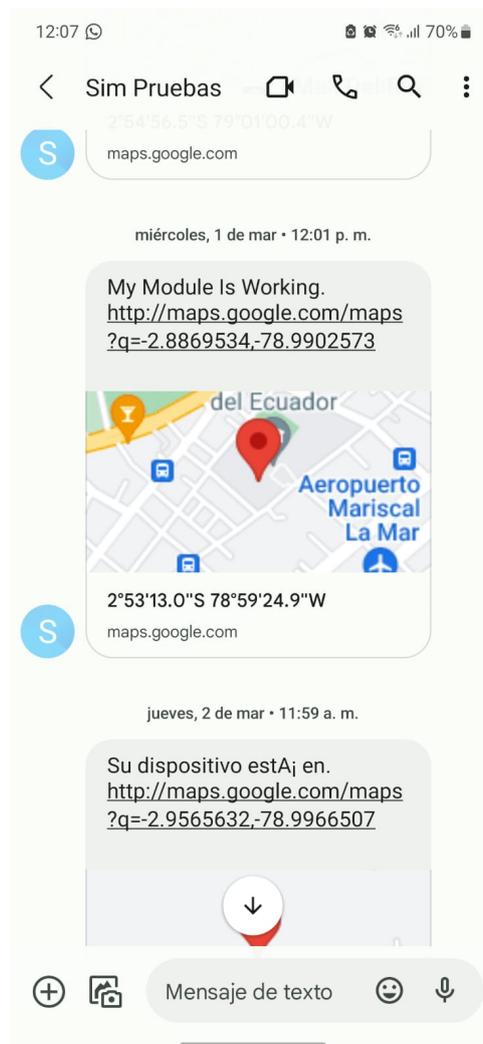


Figura 3.6: Resultado de las pruebas en el campus.

También se realizaron pruebas fuera de la universidad con el fin de comprobar su funcionamiento en áreas aledañas o lejanas como se muestran en la Figura 3.7

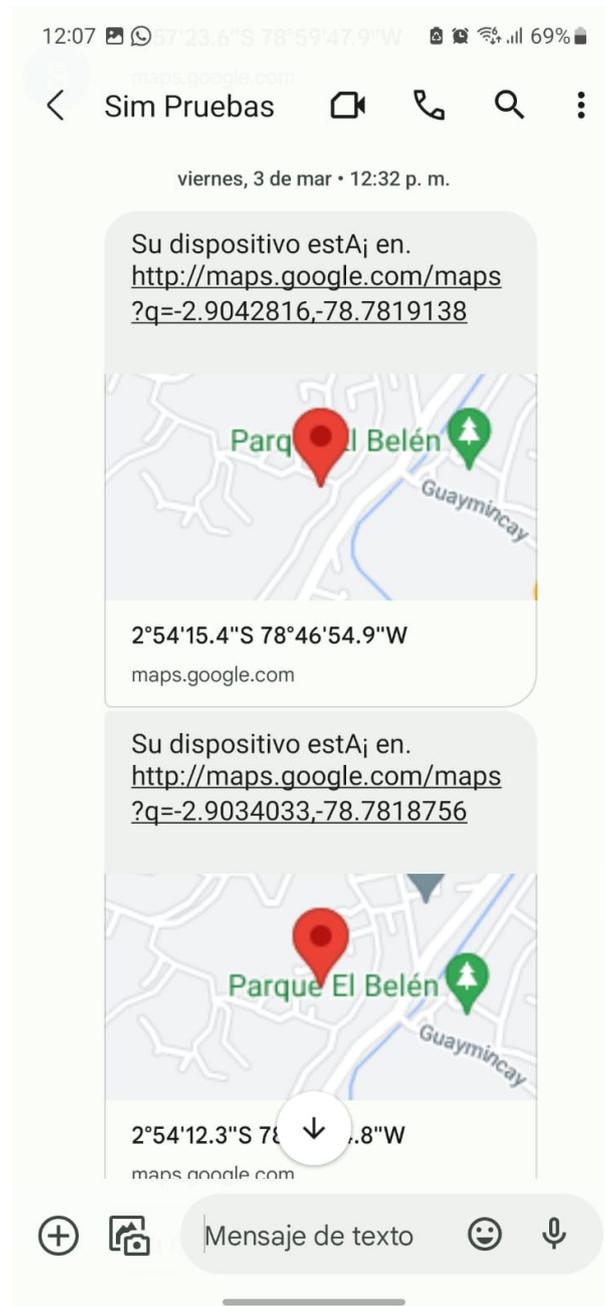


Figura 3.7: Resultado de las pruebas fuera del campus.

3.2. Resultados de las pruebas e implementación del sistema en Uzhupud.

Inicialmente, se tenía previsto llevar a cabo las pruebas del dispositivo en un cultivo de cacao en la provincia del Oro, específicamente en Pasaje. Sin embargo, estas pruebas no pudieron realizarse debido al repentino cambio climático generado por el Ciclón Yaku que afectó la región, ocasionando deslaves, socavones y daños en las vías de acceso al sector, lo que imposibilitó la movilización. En su lugar, se decidió realizar las pruebas en un sector de Uzhupud, ubicado en el cantón Paute, donde se logró realizar las pruebas en un cultivo de Maíz, que presenta características similares de follaje que el cultivo de cacao. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

El terreno elegido en Uzhupud se puede ver en la imagen satelital mostrado en la Figura 3.8. El gateway se instaló en el centro de la propiedad en un segundo piso. Esta ubicación va a permitir realizar las respectivas pruebas en el cultivo, delimitando la geocelda a la nueva zona, y poder observar su movimiento en el dashboard, ver Figura 3.9.

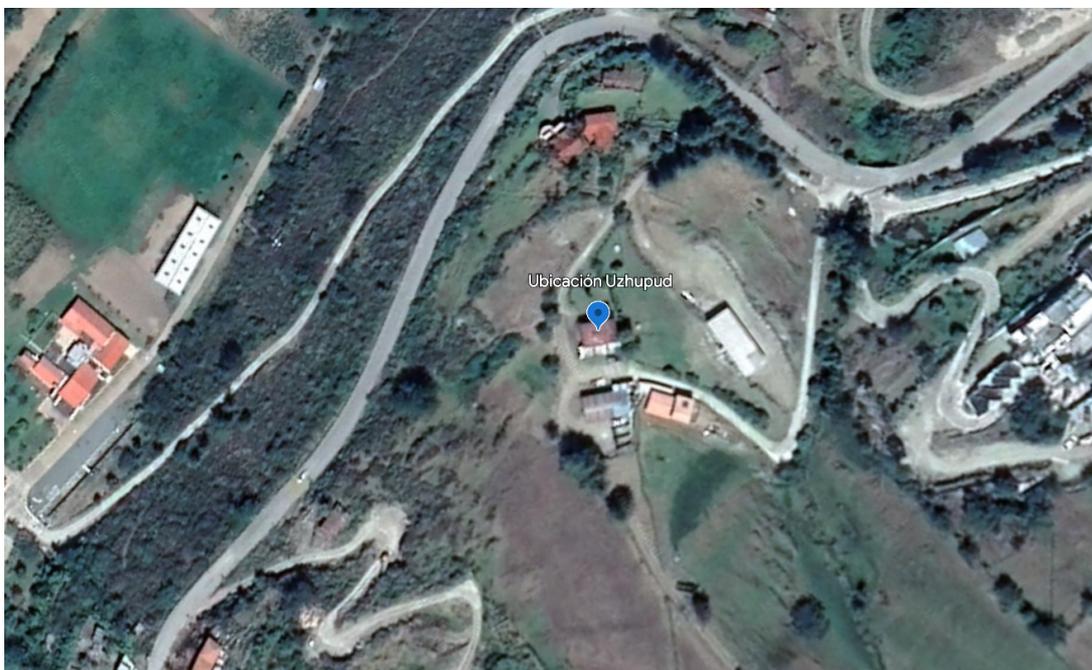


Figura 3.8: Imagen satelital de la ubicación en Uzhupud



Figura 3.9: Gateway usado en las pruebas Uzhupud

Para simular un entorno similar al cultivo de cacao y evaluar el funcionamiento del dispositivo en una situación real, se realizaron pruebas en un maizal. Para ello, se colocó el dispositivo dentro de la mazorca de maíz, tal como se puede apreciar en la Figura 3.10. De esta forma, se buscó evaluar si el follaje del maíz afectaba la transmisión de datos mediante la red LoRa, lo que podría ser un problema en un entorno real en el cultivo de cacao. La elección del maizal como entorno de prueba se debió a su

similitud con el follaje denso y tupido que rodea los cultivos de cacao, lo que permitió evaluar de manera más realista el comportamiento del dispositivo y asegurar que su funcionamiento fuera óptimo. Con estas pruebas se logró verificar que la transmisión de datos del dispositivo no se veía afectada por el follaje, esto confirma la efectividad del dispositivo en condiciones similares a las del entorno real del cultivo de cacao.



Figura 3.10: Escenario de pruebas

3.2.1. Red LoRa

En primer lugar, se evaluó la relación señal-ruido (de sus siglas en inglés *signal-to-noise ratio*, SNR) de los diferentes dispositivos. Para ello, se cambió el SpreadFactor en la programación y se seleccionaron cuatro valores: 8, 9, 10 y 11.

Se observó en las Figuras 3.11 y 3.12 que, a medida que disminuía el valor del SpreadFactor, el SNR también disminuía. Esto se debe a que un valor de SpreadFactor más bajo permite que la señal se extienda a una distancia mayor, pero con una calidad de señal inferior. Por el contrario, un valor de SpreadFactor más alto proporciona una señal de mayor calidad, pero con un alcance limitado. Además de tener picos que vuelven al origen de la gráfica que se dieron generalmente por la estabilidad del GPS y la pérdida de señal.

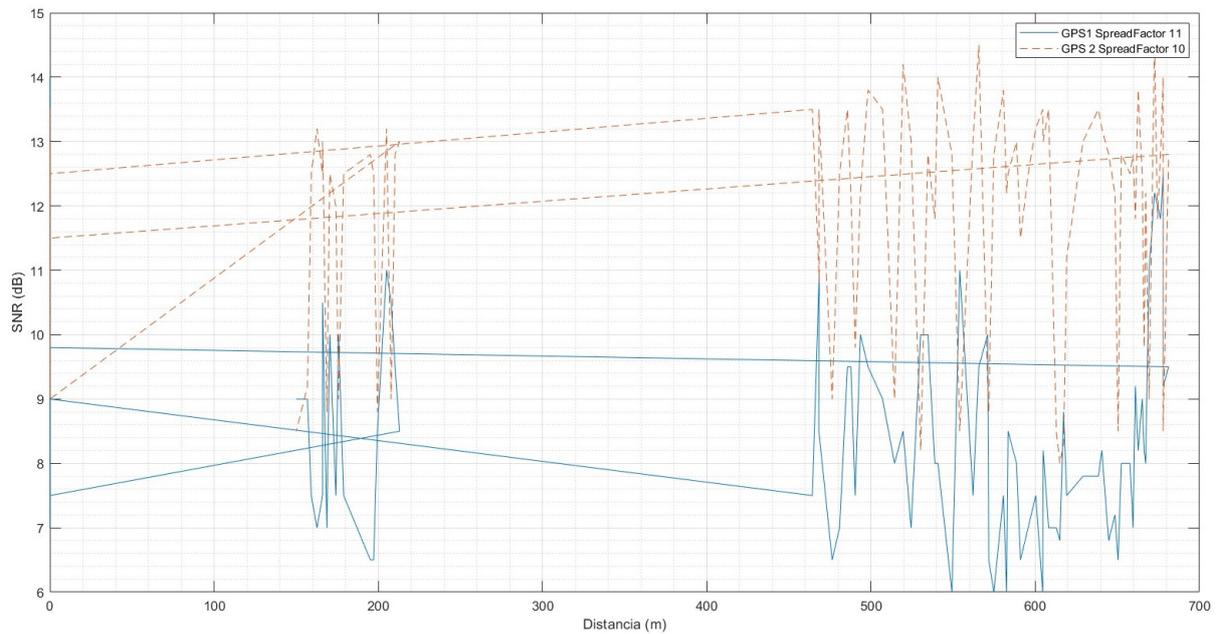


Figura 3.11: SNR vs Distancia SF 11 y 10

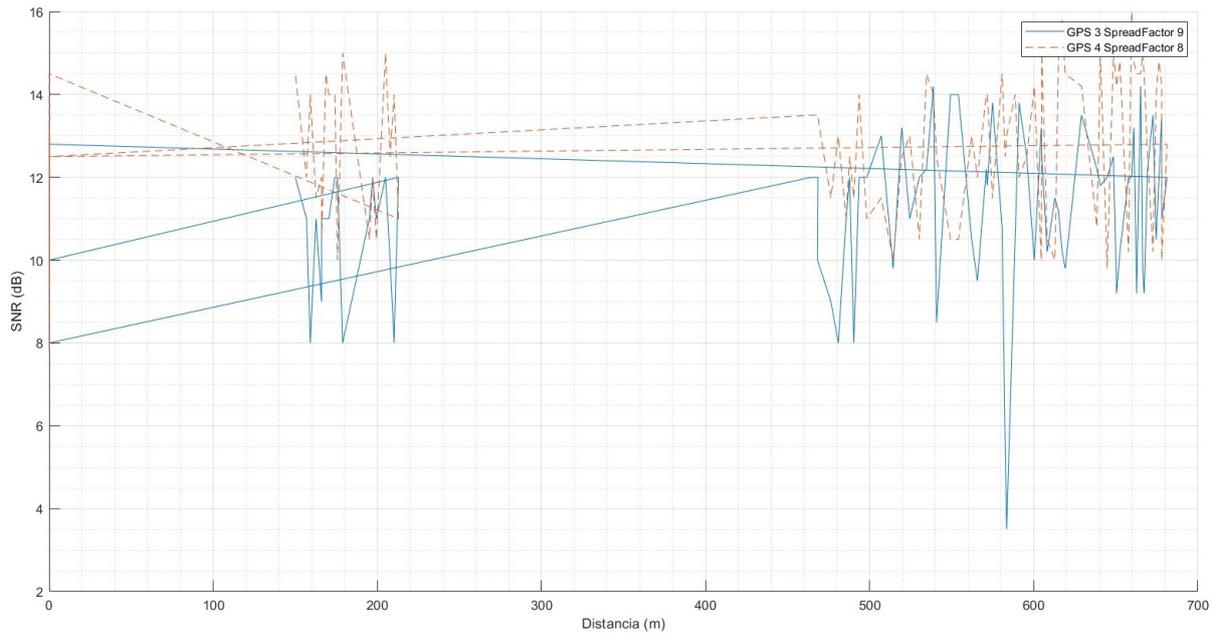


Figura 3.12: SNR vs Distancia SF 9 y 8

En general, se encontró que un valor de SpreadFactor de 9 ofrecía el mejor equilibrio entre alcance y calidad de señal. Sin embargo, en algunas situaciones, como en entornos urbanos con muchas interferencias, un valor de SpreadFactor más alto (como 12) puede ser necesario para asegurar una transmisión confiable, el cual fue comprobado en las instalaciones de la universidad.

En cuanto a valores de RSSI mostrados en la Figura 3.13, se tendrá mayor potencia de la señal a los -59 dBm en SpreadFactor de 9 en la que la menor potencia será de -104dBm. Mientras que si se usa un spreadfactor de 10 se tendrá una conexión mas estable y con más potencia que va decreciendo de acuerdo a la distancia.

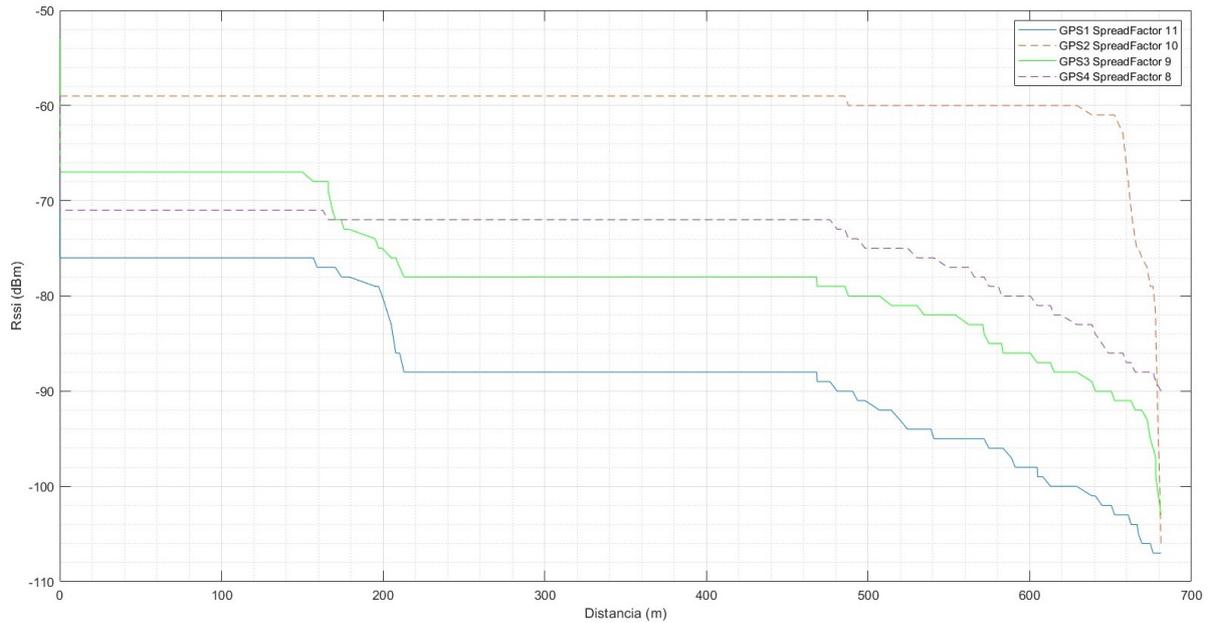


Figura 3.13: RSSI vs Distancia

En el entorno gráfico se pudo observar los diferentes dispositivos dispersos, en la zona de pruebas. Así como el historial del trayecto que han tomado los dispositivos y datos como latitud, longitud y alarmas.

Se aprecia en la Figura 3.14 las diferentes rutas tomadas de los dispositivos en el sector de pruebas. Estos datos han sido registrados de manera exitosa, lo que permite un análisis detallado de los mismos en cualquier momento. Es posible revisar con precisión la fecha y hora exacta en la que se tomaron los datos, lo que proporciona una gran cantidad de información útil para el análisis y la evaluación de los resultados. Gracias a esta información detallada, se puede obtener una visión clara y completa del comportamiento de los dispositivos en el sector de pruebas, lo que facilita la toma de decisiones informadas y la optimización del rendimiento en futuras pruebas.

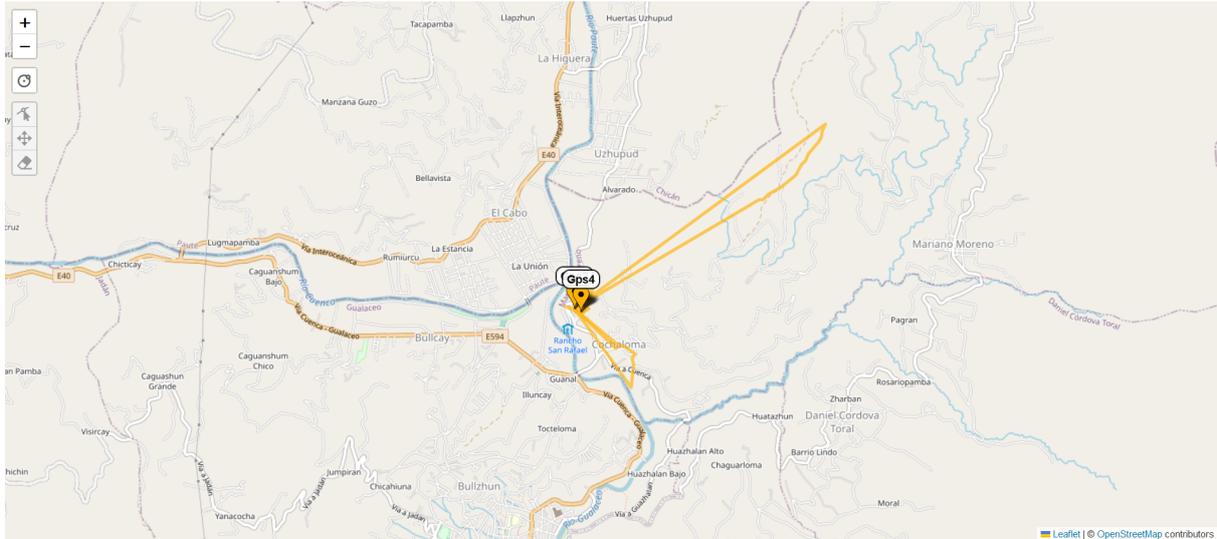


Figura 3.14: Rutas tomadas por los diferentes dispositivos en el transcurso de dos días

El dashboard nos brinda información esencial, entre ella la ubicación del dispositivo, las alarmas generadas para señalar si el dispositivo está dentro o fuera del área del geofencing y si el dispositivo carece de señal, como se muestra en la figura 3.15.

Alarms						🔍 ⬇️ ✕		
🕒 Realtime - last 7 days								
<input type="checkbox"/>	Created time ↓	Originator	Type	Severity	Status			
<input type="checkbox"/>	2023-03-12 16:56:41	Gps3	Dentro de la Geocelda	Minor	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-03-12 14:50:48	Gps4	Fuera de la Geocelda	Critical	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-03-12 14:49:24	Gps3	Fuera de la Geocelda	Critical	Active Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-03-10 21:49:53	Gps3	Fuera de la Geocelda	Critical	Cleared Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-03-10 21:25:02	Gps5	Fuera de la Geocelda	Critical	Cleared Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-03-10 21:24:58	Gps	Fuera de la Geocelda	Critical	Cleared Unacknowledged	...	✓	✕
<input type="checkbox"/>	2023-03-10 21:23:34	Gps	Fuera de la Geocelda	Critical	Cleared Unacknowledged	...	✓	✕

Items per page: 10 1 - 10 of 20 ⏪ ⏩

Figura 3.15: Alertas producidas

Para el análisis de datos, se dispone del SNR y el RSSI, cuya representación gráfica permite observar el comportamiento de la señal recibida del dispositivo a

medida que se mueve. Estos datos son recopilados en la plataforma gráfica como se muestra en la Figura 3.16.

Gps5	Gps4	Gps3	Gps2	Gps
Timestamp ↓	latitude	longitude	RxLoRaSNR	RxRssi
2023-03-12 17:42:38	-2.86320161819458	-78.7707748413086	8	-98
2023-03-12 17:39:46	-2.863231658935547	-78.77079772949219	7	-96
2023-03-12 17:39:03	-2.8632149696350098	-78.77070617675781	7.5	-98
2023-03-12 17:38:20	-2.8632516860961914	-78.77075958251953	7	-98
2023-03-12 17:37:37	-2.8632917404174805	-78.77082824707031	7	-107
2023-03-12 17:36:54	-2.8632233142852783	-78.77082061767578	6.8	-92
2023-03-12 17:36:11	-2.8632516860961914	-78.77082061767578	5.8	-98
2023-03-12 17:35:28	-2.8632266521453857	-78.77079772949219	7.5	-93
2023-03-12 17:34:45	-2.8632500171661377	-78.77078247070312	7.5	-98
2023-03-12 17:34:02	-2.8632349967956543	-78.77079772949219	9	-95
2023-03-12 17:33:19	-2.863288402557373	-78.77082824707031	7.2	-97
2023-03-12 17:31:53	-2.8632633686065674	-78.77082824707031	7.8	-91

Figura 3.16: Latitud, longitud, valores de SNR y RSSI

Rango de Cobertura

Se realizaron dos pruebas para determinar el rango máximo de cobertura de un sistema de comunicación. La primera prueba se llevó a cabo en una zona urbana, donde el gateway tenía una línea de vista directa con toda la zona. Durante esta prueba, se determinó que el rango máximo de cobertura fue de 1302 metros, ya que no se obtenía información más allá de esta distancia. Este resultado se observó en la plataforma de monitoreo utilizada durante la prueba.

La segunda prueba se realizó en una zona montañosa, donde el rango máximo de cobertura fue de 1146 metros con el marcador de GPS2, como se puede observar en la Figura 3.17. La diferencia en el rango máximo de cobertura entre ambas pruebas podría deberse a factores como la presencia de obstáculos en la zona urbana, que podrían interferir en la propagación de la señal, o la topografía de la zona montañosa, que podría afectar la señal de manera diferente.

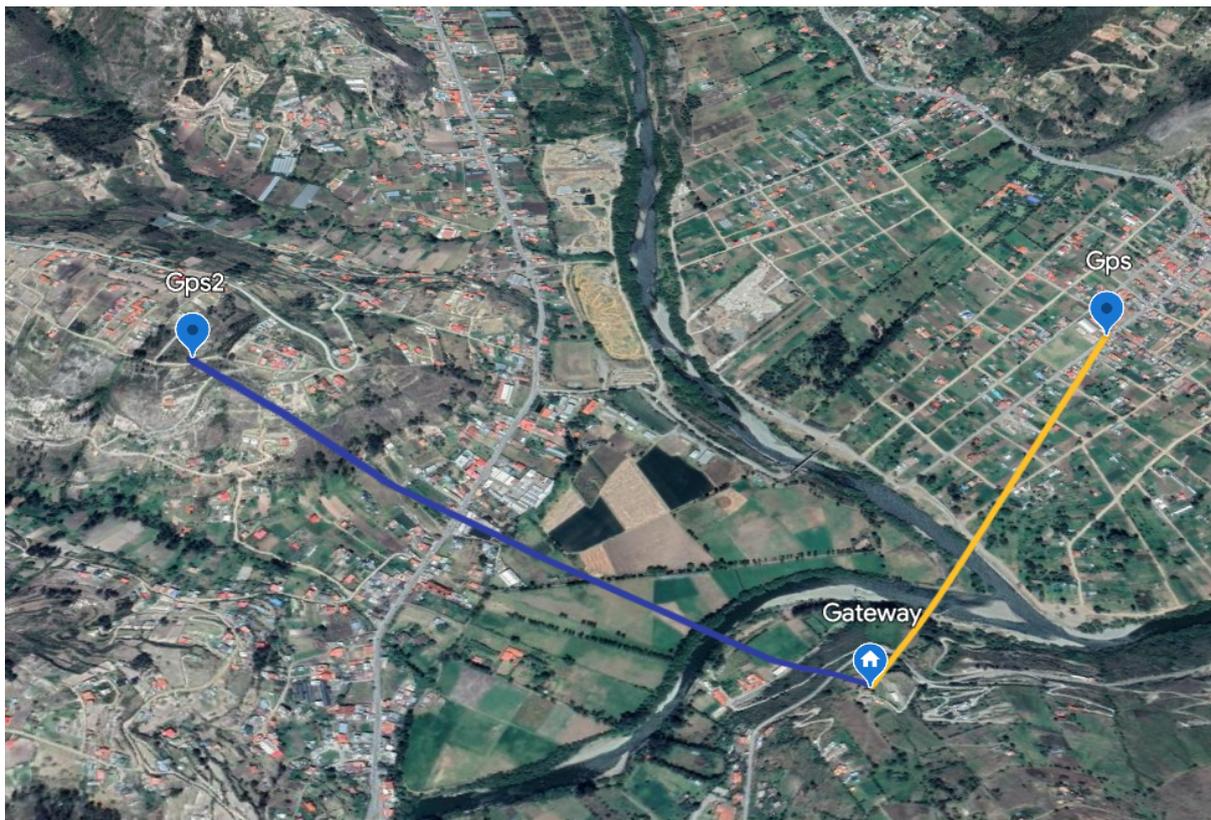


Figura 3.17: Rango máximo de cobertura alcanzado desde el gateway hacia los dispositivos

3.2.2. Red Celular

Es importante tener en cuenta que la eficacia de la red celular depende en gran medida de la ubicación geográfica del sector en el que se realiza la prueba. En este caso, se buscó simular las condiciones de los cultivos de cacao que suelen ubicarse fuera de las zonas urbanas. Se utilizó un chip de la compañía Movistar, aunque se tuvo dificultades para acceder a la red y realizar las pruebas fuera del área delimitada por la red LoRa, los resultados se muestran en la Figura 3.18 las cuales son realizadas caminando con el dispositivo fuera de la zona.

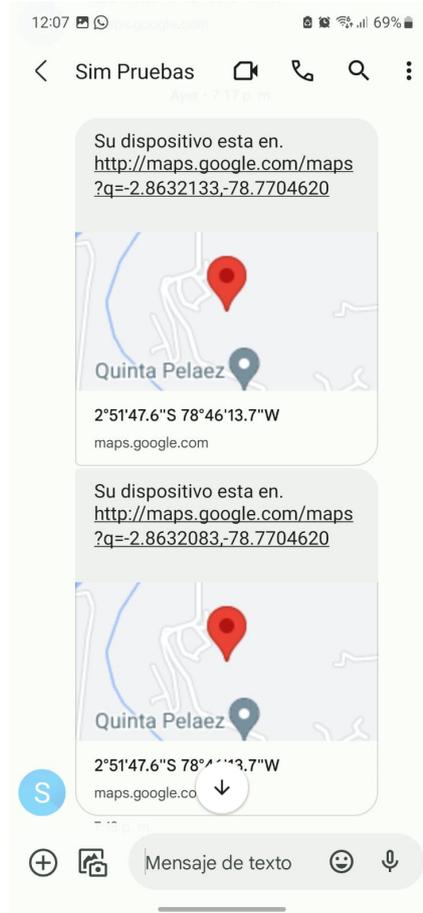


Figura 3.18: Resultado de las pruebas en Uzhupud.

Se puede apreciar que la zona en la que se realizaron las pruebas está bastante alejada, y aun así, las coordenadas enviadas por el dispositivo son precisas. Sin embargo, como se había previsto, en ciertas áreas con poca cobertura de señal, el envío de la ubicación cada 20 segundos, se vio interrumpido y hubo lapsos de tiempo de hasta 5 minutos para que el dispositivo se volviera a conectar con la red y enviar los datos.

Se realizó una prueba con el dispositivo fuera del área del geofencing para comprobar si este enviaba la ubicación cuando el vehículo estaba en marcha. No obstante, esto dependía en gran medida de la cobertura de red celular, la zona y la velocidad del vehículo, ya que en algunas áreas no había señal debido a la ubicación y si el vehículo se movía a una velocidad elevada, el dispositivo no enviaba los datos cada 20 segundos. Sin embargo, al llegar a una zona con buena cobertura y a una velocidad constante de 40 km/h, el dispositivo comenzó a enviar las ubicaciones. Para

verificar la precisión de estas coordenadas, se utilizó Google Maps y se constató que correspondían con la ubicación del vehículo, tal como se puede apreciar en la figura 3.19.

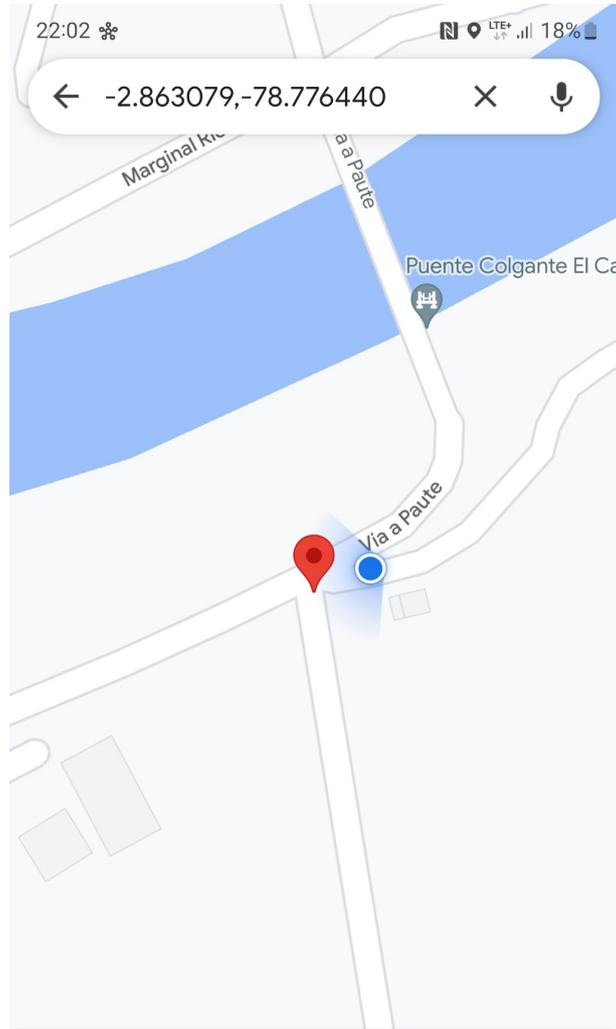


Figura 3.19: Comprobación de las coordenadas.

3.3. Análisis de costos del sistema

Realizar un análisis de costo es una tarea fundamental en cualquier proyecto, ya que permite determinar de manera detallada y precisa cuáles son los recursos necesarios para llevarlo a cabo y cuánto va a costar. El análisis de costo es una herramienta clave para la toma de decisiones en cualquier organización, ya que ayuda a evaluar la viabilidad financiera del proyecto y a definir el presupuesto necesario

para su ejecución. Además, el análisis de costo permite identificar los costos fijos y variables, así como los costos directos e indirectos, lo que permite una mejor planificación y control del gasto. En definitiva, un análisis de costo adecuado es un factor determinante para el éxito de del proyecto, ya que permite tomar decisiones informadas y garantiza una gestión financiera responsable y eficiente. El análisis de costos del proyecto se puede ver en la Tabla 3.1. Este análisis está proyectado para 10 dispositivos, el cual podrá variar en función del número de dispositivos que se requiera implementar.

Tabla 3.1: Análisis de costos del sistema

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
INVERSIÓN			
DISPOSITIVOS			
5	FIPY	\$74,12	\$370,60
5	PYTRACK 2.0	\$43,13	\$215,65
5	LTE-M ANTENNA	\$10,30	\$51,50
5	ENSAMBLES DE CABLE RF 3"SMA FEMALE	\$3,73	\$18,65
5	LORA 915 MHZ ANTENNA	\$9,40	\$47,00
5	SIM 808	\$48,00	\$240,00
5	ESP 32	\$5,00	\$25,00
1	GATEWAY MILESIGHT UG67	\$896,00	\$896,00
10	SOCKET PARA BATERIA	\$1,00	\$10,00
5	TARJETAS SIM	\$3,00	\$15,00
10	BATERIAS	\$18,00	\$180,00
COSTOS POR SERVICIOS			
10	PROGRAMACION DE NODOS	\$10,00	\$100,00
1	PROGRAMACION DE GATEWAY	\$15,00	\$15,00
1	MANO DE OBRA	\$450,00	\$450,00
COSTOS DE LOS SERVIDORES POR MES			
1	Servidor deAmazon (AWS)	\$11,00	\$11,00
1	ThingsBoard	\$100,00	\$100,00
COSTOS VARIOS			
4	SOCKET RJ45	\$1,00	\$4,00
20	CABLE ETHETRNET	\$0,50	\$10,00
2	COURIER	\$50,00	\$100,00
Total			\$2.859,40

El costo de implementación puede reducirse si se cuenta con un servidor propio en lugar de pagar mensualmente a terceras empresas. Asimismo, el valor de las baterías puede variar según su calidad. Es importante tener en cuenta que el valor presentado en la tabla considera baterías genéricas que pueden ser inestables. Si se busca mayor estabilidad y duración, se recomienda invertir en baterías de mayor calidad, las cuales pueden tener un precio más elevado. Por otro lado, el valor de la Gateway incluye impuestos, pero es posible encontrar otras opciones de Gateway que se adapten a las necesidades específicas del proyecto, dependiendo del terreno donde

se vaya a utilizar. En conclusión, es importante evaluar detalladamente cada elemento que influye en el costo de implementación para tomar decisiones informadas y lograr una gestión financiera efectiva del proyecto.

3.4. Conclusiones

Se desarrolló un sistema para el monitoreo y rastreo de productos agrícolas, en este caso, para mazorcas de cacao. Para ello se implementó el uso de dispositivos Fipy, debido a su tamaño y la capacidad de integración con las diferentes plataformas, bajo consumo energético y la flexibilidad al momento de elegir una antena con diferentes ganancias.

La programación se realizó en micropython, la cual facilitó el desarrollo del código, debido a la alta capacidad para obtener librerías. Además, la documentación que presenta el fabricante pueden generar varios parámetros de configuración que dependerán de las necesidades para las que se fuesen a usar.

Se utilizó un gateway Milesight que enlazó la base de datos, para este caso Amazon Web Service con un servidor Ubuntu para conectarse con Chirpstack, un servidor de código abierto que sirvió para manejar el gateway y agregar los respectivos dispositivos para evaluar las tramas de LoRa.

Se observaron las diferentes rutas que realizaron los dispositivos mediante Thingsboard como plataforma de visualización. Para ello se configuró una integración HTTP entre esta y ChirpStack, los cuales muestran los dispositivos disponibles. Adicionalmente, se crearon las alertas para la geocelda, lo que permitió establecer que el sistema notificará al propietario si hay un robo.

Tras realizar diversas pruebas en la plantación de Uzhpud, se puede concluir que el SpreadFactor de 9 se presenta como la mejor opción en términos de distancia de pruebas. Esta elección permite obtener una buena potencia de señal y una calidad excelente, especialmente en el terreno analizado. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos valores pueden variar en función de la ubicación del gateway y en otras áreas geográficas.

Los resultados de las pruebas del dispositivo diseñado para rastrear un

producto en la red celular mostraron que cumple su propósito. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre las pruebas realizadas en el campus y en un entorno real, especialmente en relación con la cobertura de la red celular y la recepción del GPS. La falta de cobertura en la zona rural limita el funcionamiento del dispositivo, y el GPS puede tener dificultades para conectarse con los satélites en edificios o condiciones climáticas desfavorables. Aunque el dispositivo enfrentó problemas de cobertura durante el recorrido en auto por fuera de la propiedad, en general cumplió con los objetivos establecidos. Se debe tener en cuenta que el entorno en el que se desarrolle el proyecto puede influir en las limitaciones del dispositivo.

Se realizaron dos pruebas para determinar el rango máximo de cobertura de un sistema de comunicación. La primera prueba en una zona urbana arrojó un rango máximo de 1302 metros debido a la presencia de obstáculos que podrían haber interferido en la propagación de la señal. Mientras que la segunda prueba en una zona montañosa obtuvo un rango máximo de 1146 metros, posiblemente debido a la topografía del terreno.

3.5. Recomendaciones

Se recomienda analizar el retardo que pueden tener los datos en el módulo Fipy, para evitar grandes retrasos en el caso que se quiera rastrear un vehículo a altas velocidades y cambiar así el spreadfactor.

El GPS requiere un tiempo estar al aire libre para poder establecer la conexión con el satélite. Es recomendable realizar pruebas adicionales en diferentes condiciones para evaluar la efectividad del dispositivo en diversos entornos y situaciones climáticas.

Glosario

AWS Amazon Web Service.

GPS Global Positioning System.

HSPA High-Speed Packet Access.

IoT Internet of Things.

ITU International Telecommunication Union.

LORA Long Range.

LoRaWAN Long Range Wide Area Network.

LPWAN Low Power Wide Area Network.

LTE Long-Term Evolution.

MIMO Multiple-Input Multiple-Output.

NB-IoT Narrow Band Internet of Things.

OFDM Orthogonal frequency division multiplexing.

RFID Radio Frequency Identification.

RSSI Received Signal Strength Indicator.

SNR Signal-to-noise ratio.

TCP/IP Transfer control protocol, Internet Protocol.

UMTS Universal Mobile Telecommunications System.

WISP Wireless Identification and sensing Platform.

WLAN Wireless Local Area Network.

WSN Wireless Sensor Networks.

Bibliografía

- [1] S. Dimitrov and H. Haas, "Information rate of ofdm-based optical wireless communication systems with nonlinear distortion," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 918–929, 2012.
- [2] A. Khanna and S. Kaur, "Evolution of internet of things (iot) and its significant impact in the field of precision agriculture," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 157, pp. 218–231, 2019.
- [3] Numbeo. (2022) Índice de criminalidad por país 2022. [Online]. Available: <https://es.numbeo.com/criminalidad/clasificaciones-por-pa%C3%ADs>
- [4] F. G. del Estado, "Cifras de robos," Tech. Rep., 12 2021. [Online]. Available: <https://www.fiscalia.gob.ec/estadisticas-de-robos/>
- [5] NGPRO. Sistemas antirrobo para maquinaria agrícola. [Online]. Available: <https://www.ngpro.es/14/sistemas-antirrobo-maquinaria-agricola>
- [6] C. SER and J. Herreros. (2018, 2) Inventan como atrapar a los ladrones de aceituna | actualidad. [Online]. Available: https://cadenaser.com/emisora/2018/02/17/radio_ubeda/1518870677_486432.html
- [7] D. L. Hora. (2020, 5) En atahualpa se roban hasta las cebollas. [Online]. Available: <https://www.lahora.com.ec/noticias/en-atahualpa-se-roban-hasta-las-cebollas/>
- [8] M. E. Villapol, H. Jansen, A. Morales, J. Flores, H. Rodrigues, and M. Huerta, "Recording, storing and querying judo match data using an android tool and cloud computing," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, vol. 231, no. 4, pp. 243–252, 2017.

- [9] H. G. Espinosa, J. Lee, J. Keogh, J. Grigg, and D. A. James, "On the use of inertial sensors in educational engagement activities," *Procedia engineering*, vol. 112, pp. 262–266, 2015.
- [10] M. K. Huerta, A. García-Cedeño, J. C. Guillermo, and R. Clotet, "Wireless sensor networks applied to precision agriculture: A worldwide literature review with emphasis on latin america," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 209–222, 2021.
- [11] M. Díaz, J. Bernabe, Garizurieta, R. González, J. Morales, and M. Huerta, "Bibliometric analysis of the use of the internet of things in precision agriculture," in *2021 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*. IEEE, 2021, pp. 1–5.
- [12] J. C. Guillermo, A. García-Cedeño, D. Rivas-Lalaleo, M. Huerta, and R. Clotet, "Iot architecture based on wireless sensor network applied to agricultural monitoring: A case of study of cacao crops in ecuador," in *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change II: Proceedings of the 2nd International Conference of ICT for Adapting Agriculture to Climate Change (AACC'18), November 21-23, 2018, Cali, Colombia*. Springer, 2019, pp. 42–57.
- [13] F. SichiQUI, J. G. Huilca, A. García-Cedeño, J. C. Guillermo, D. Rivas, R. Clotet, and M. Huerta, "Agricultural information management: A case study in corn crops in ecuador," in *Advances in Emerging Trends and Technologies: Volume 1*. Springer, 2020, pp. 113–124.
- [14] G. Carrión, M. Huerta, and B. Barzallo, "Monitoring and irrigation of an urban garden using iot," in *2018 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [15] M. Erazo, D. Rivas, M. Pérez, O. Galarza, V. Bautista, M. Huerta, and J. L. Rojo, "Design and implementation of a wireless sensor network for rose greenhouses monitoring," in *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, 2015, pp. 256–261.
- [16] A. García-Cedeño, J. C. Guillermo, B. Barzallo, C. Punín, A. Soto, D. Rivas, R. Clotet, and M. Huerta, "Platano: Intelligent technological support platform for azuay province farmers in ecuador," in *2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*, vol. 1. IEEE, 2019, pp. 1–7.

- [17] J. Veintimilla, M. Huerta, and J.-I. Castillo-Velazquez, "Development of system for monitoring and geopositioning for cattle using iot," in *2022 IEEE ANDESCON*. IEEE, 2022, pp. 1–6.
- [18] C. Tayo, N. D. Perez, and J. Villaverde, "Design and development of a wsn for water quality monitoring system of shrimp aquaculture," in *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. IEEE, 2022, pp. 1–6.
- [19] L. Fernandez, M. Huerta, G. Sagbay, R. Clotet, and A. Soto, "Sensing climatic variables in a orchid greenhouse," in *2017 International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDCS)*, 2017, pp. 101–104.
- [20] M. Bezahaf, D. Hutchison, D. King, and N. Race, "Internet evolution: Critical issues," *IEEE Internet Computing*, vol. 24, no. 4, pp. 5–14, 2020.
- [21] ITU. Internet of things global standards initiative. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>
- [22] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, "Internet of things (iot) communication protocols," in *2017 8th International conference on information technology (ICIT)*. IEEE, 2017, pp. 685–690.
- [23] L. ALLIANCE, "What is lorawan® specification," Nov 2022. [Online]. Available: <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>
- [24] Chirpstack, "The chirpstack project." [Online]. Available: <https://www.chirpstack.io/docs/index.html>
- [25] J. Varia, "Best practices in architecting cloud applications in the aws cloud," *Cloud Computing: Principles and Paradigms*, vol. 18, pp. 459–490, 2011.
- [26] I. E. Agbehadji, S. O. Frimpong, R. C. Millham, S. J. Fong, and J. J. Jung, "Intelligent energy optimization for advanced iot analytics edge computing on wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 16, no. 7, p. 1550147720908772, 2020.
- [27] Z. Al Aghbari, A. M. Khedr, W. Osamy, I. Arif, and D. P. Agrawal, "Routing in wireless sensor networks using optimization techniques: A survey," *Wireless Personal Communications*, vol. 111, no. 4, pp. 2407–2434, 2020.

- [28] M. K. Singh, S. I. Amin, S. A. Imam, V. K. Sachan, and A. Choudhary, "A survey of wireless sensor network and its types," in *2018 international conference on advances in computing, communication control and networking (ICACCCN)*. IEEE, 2018, pp. 326–330.
- [29] J. Hemanth, R. Bestak, and J. I.-Z. Chen, *Intelligent data communication technologies and internet of things: proceedings of ICICI 2020*. Springer, 2021.
- [30] B. J. Lingbeek, C. L. Higgins, J. P. Muir, D. H. Kattes, and T. W. Schwertner, "Arthropod diversity and assemblage structure response to deforestation and desertification in the sahel of western senegal," *Global ecology and conservation*, vol. 11, pp. 165–176, 2017.
- [31] N. Watthanawisuth, A. Tuantranont, and T. Kerdcharoen, "Microclimate real-time monitoring based on zigbee sensor network," in *SENSORS, 2009 IEEE*. IEEE, 2009, pp. 1814–1818.
- [32] M. R. M. Kassim, "Iot applications in smart agriculture: Issues and challenges," in *2020 IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, 2020, pp. 19–24.
- [33] D. Rivas-Lalaleo, A. M. S. Gallo, C. Molina, M. Huerta, R. Clotet, A. Pérez, L. Santana, and F. Oñate, "Mashca: Monitoring and hydro climatological analysis of the urban microclimate of latacunga." in *SENSORNETS, 2022*, pp. 134–143.
- [34]
- [35] K. Langendoen, A. Baggio, and O. Visser, "Murphy loves potatoes: Experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture," in *Proceedings 20th IEEE international parallel & distributed processing symposium*. IEEE, 2006, pp. 8–pp.
- [36] C. A. Jamhari, W. K. Wibowo, A. R. Annisa, and T. M. Roffi, "Design and implementation of iot system for aeroponic chamber temperature monitoring," in *2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*, 2020, pp. 1–4.
- [37] J. Abad, J. Farez, P. Chasi, J. C. Guillermo, A. García-Cedeño, R. Clotet, and M. Huerta, "Coffee crops variables monitoring: a case of study in ecuadorian andes," in *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change II: Proceedings of the 2nd International Conference of ICT for Adapting Agriculture to Climate Change (AACC'18), November 21-23, 2018, Cali, Colombia*. Springer, 2019, pp. 202–217.

- [38] K. Jantke, M. J. Hartmann, L. Rasche, B. Blanz, and U. A. Schneider, "Agricultural greenhouse gas emissions: Knowledge and positions of german farmers," *Land*, vol. 9, no. 5, p. 130, 2020.
- [39] S. Azfar, A. Nadeem, A. Alkhodre, K. Ahsan, N. Mehmood, T. Alghmdi, and Y. Alsaawy, "Monitoring, detection and control techniques of agriculture pests and diseases using wireless sensor network: a review," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, no. 12, 2018.
- [40] S. K. Roy, A. Roy, S. Misra, N. S. Raghuwanshi, and M. S. Obaidat, "Aid: A prototype for agricultural intrusion detection using wireless sensor network," in *2015 IEEE international conference on communications (icc)*. IEEE, 2015, pp. 7059–7064.
- [41] J. M. Khurpade, D. Rao, and P. D. Sanghavi, "A survey on iot and 5g network," in *2018 International conference on smart city and emerging technology (ICSCET)*. IEEE, 2018, pp. 1–3.
- [42] Q. K. U. D. Arshad, A. U. Kashif, and I. M. Quershi, "A review on the evolution of cellular technologies," in *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. IEEE, 2019, pp. 989–993.
- [43] A. M. Jaradat, J. M. Hamamreh, and H. Arslan, "Ofdm with hybrid number and index modulation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55 042–55 053, 2020.
- [44] E. Ezhilarasan and M. Dinakaran, "A review on mobile technologies: 3g, 4g and 5g," in *2017 second international conference on recent trends and challenges in computational models (ICRTCCM)*. IEEE, 2017, pp. 369–373.
- [45] L. Qinghua, L. Guangjie, L. Wookbong, and M.-i. Lee, "Mazzarese d.; clerckx b.; li zexian;," "MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview" *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 86–92, 2010.
- [46] L.-N. Degambur, A. Mungur, S. Armoogum, and S. Pudaruth, "Resource allocation in 4g and 5g networks: A review," *International Journal of Communication Networks and Information Security*, vol. 13, no. 3, pp. 401–408, 2021.
- [47] Y. Tang, S. Dananjayan, C. Hou, Q. Guo, S. Luo, and Y. He, "A survey on the 5g network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 180, p. 105895, 2021.

- [48] S. Shetty and A. Smitha, "Smart agriculture using iot and machine learning," *Smart Agriculture Automation Using Advanced Technologies: Data Analytics and Machine Learning, Cloud Architecture, Automation and IoT*, pp. 1–16, 2021.
- [49] G. Yascaribay, M. Huerta, M. Silva, and R. Clotet, "Performance evaluation of communication systems used for internet of things in agriculture," *Agriculture*, vol. 12, no. 6, p. 786, 2022.
- [50] G. Valecce, S. Strazzella, and L. A. Grieco, "On the interplay between 5g, mobile edge computing and robotics in smart agriculture scenarios," in *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks: 18th International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, ADHOC-NOW 2019, Luxembourg, Luxembourg, October 1–3, 2019, Proceedings 18*. Springer, 2019, pp. 549–559.
- [51] E. Mercurio, "Una misión gastronómica francesa analiza el origen del cacao en ecuador," Sep 2022. [Online]. Available: <https://elmercurio.com.ec/2022/09/12/ecuador-distingue-al-descubridor-del-origen-de-la-domesticacion-del-cacao/>
- [52] CEFA-Ecuador, "Cacao," Oct 2021. [Online]. Available: <https://cefaecuador.org/productos/cacao/>
- [53] "Ecuador, la cuna del cacao," 2017. [Online]. Available: <https://republicadelcacao.com/es/blogs/news/ecuador-the-home-of-cacao>
- [54] E. Gustavo and INIAP, "Cacao orgánico: Guía para productores ecuatorianos," Jan 2010. [Online]. Available: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4571>
- [55] D. Zhang, M. Boccara, L. Motilal, S. Mischke, E. S. Johnson, D. R. Butler, B. Bailey, and L. Meinhardt, "Molecular characterization of an earliest cacao (*Theobroma cacao* L.) collection from upper amazon using microsatellite dna markers," *Tree Genetics & Genomes*, vol. 5, pp. 595–607, 2009.
- [56] B. Bartley, "The terminology specific to cacao." in *The genetic diversity of cacao and its utilization*. CABI Publishing Wallingford UK, 2005, pp. 14–24.
- [57] N. Paredes Andrade, "Manual de cultivo de cacao para la amazonia ecuatoriana," Jan 2009. [Online]. Available: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4786>

- [58] A.-A. F. d. Almeida and R. R. Valle, "Ecophysiology of the cacao tree," *Brazilian Journal of Plant Physiology*, vol. 19, pp. 425–448, 2007.
- [59] H. Hall, Y. Li, N. Comerford, and G. Arévalo, "E.; zuniga, cl; baligar, v.; popenoe, h.(2010). cover crops alter phosphorus soil fractions and organic matter accumulation in a peruvian cacao agroforestry system," *Agroforest Syst*, vol. 80, pp. 447–455.
- [60] A. Chávez Vargas and J. Mansilla Rivera, "Manual del cultivo del cacao," 2004. [Online]. Available: <http://canacacao.org/wp-content/uploads/Cultivo-del-Cacao-Amazonas-Peru-2004.pdf>
- [61] Pycome, "Fipy datasheet," 2017. [Online]. Available: https://docs.pycom.io/.gitbook/assets/specsheets/Pycom_002_Specsheets_FiPy_v2.pdf/
- [62] —, "Pytrack 2.0 datasheet," Jul 2019. [Online]. Available: https://docs.pycom.io/gitbook/assets/PyTrack2X_specsheets.pdf
- [63] ESPRESSIF, "Esp32," 2016. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- [64] Crowtail, "Crowtail-sim808-gprs-gsm+gps-v1.1," Aug 2021. [Online]. Available: <https://www.elecrow.com/crowtail-sim808-p-1590.html>
- [65] M. IOT, "Ug67 datasheet ug67 - milesight iot," 2020. [Online]. Available: <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/ug67-datasheet-en.pdf>

APÉNDICES