

SISTEMA DE LOCALIZACIÓN Y COMUNICACIÓN VÍA RADIO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO BASADO EN LORA



Sebastián Pira Pejendino
Yerson Armando Zuñiga Galindez

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Departamento de Telecomunicaciones

GRIAL - Grupo de Radio e Inalámbricas

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos

Popayán, 2021

SISTEMA DE LOCALIZACIÓN Y COMUNICACIÓN VÍA RADIO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO BASADO EN LORA

Sebastián Pira Pejendino
Yerson Armando Zuñiga Galindez

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca como requisito para obtener el título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Departamento de Telecomunicaciones

GRIAL - Grupo de Radio e Inalámbricas

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos

Popayán, 2021

TABLA DE CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ACRÓNIMOS	xii
1 MARCO TEÓRICO	3
1.1 SISTEMAS DE NAVEGACIÓN GLOBAL POR SATÉLITE	3
1.1.1 Sistema GPS-NAVSTAR	4
1.1.2 Sistema GLONASS	4
1.1.3 Sistema GALILEO	5
1.1.4 Sistema BEIDOU	5
1.2 SERVICIOS BASADOS EN LOCALIZACIÓN	5
1.3 INTERNET DE LAS COSAS	5
1.4 REDES DE ÁREA AMPLIA Y DE BAJA POTENCIA	6
1.4.1 Aplicaciones de Redes de Área Amplia y de Baja Potencia	6
1.4.2 Seguridad en Redes de Área Amplia y de Baja Potencia	7
1.4.3 Tipos de Redes de Área Amplia y de Baja Potencia	7
1.5 LoRa/LoRaWAN	9
1.5.1 LoRaWAN	10
1.5.1.1 Arquitectura de red	11
1.5.1.2 Clases de dispositivos LoRaWAN	12
1.5.1.3 Trama MAC LoRaWAN	13
1.5.2 LoRa	14
1.5.2.1 Espectro ensanchado tipo chirp	15
1.5.2.2 Parámetros de interés en LoRa	15
1.5.2.3 Ganancia de procesamiento	20
1.5.2.4 Formato de trama de LoRa	20
1.6 CORREGIMIENTO DE QUINTANA	21
1.7 MUNICIPIO EL TAMBO	23
1.8 GESTIÓN DEL RIESGO	24
1.8.1 Riesgos de Desastres en Colombia	26
2 MODELO DEL SISTEMA	27
2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA	27
2.2 APLICACIONES DEL SISTEMA	27
2.3 METODOLOGÍA DE DESARROLLO	28
2.4 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS	30
2.4.1 Estación Móvil	30
2.4.1.1 Funciones automáticas	31
2.4.1.2 Funciones manuales	31
2.4.2 Medio de Transmisión Inalámbrico	32

2.4.3	Estación Base	32
2.4.3.1	Funciones automáticas	33
2.4.3.2	Funciones manuales	33
3	DISEÑO DEL SISTEMA	34
3.1	ESTACIÓN MÓVIL	34
3.1.1	Módulo de Geolocalización	35
3.1.2	Controlador Estación Móvil	35
3.1.3	Módulo de Alertas	35
3.1.4	Intercambio de Mensajes entre Componentes	36
3.2	ESTACIÓN BASE	37
3.2.1	Controlador Estación Base	38
3.2.1.1	Microcontrolador	38
3.2.1.2	Controlador del lado del servidor	38
3.2.2	Base de Datos	39
3.2.3	Servidor de Mapas	39
3.2.4	Interfaz Web	39
3.2.5	Intercambio de Mensajes entre Componentes	40
4	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	42
4.1	CONSIDERACIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN	42
4.2	MATERIALES	42
4.2.1	Módulo GPS	43
4.2.2	Módulo de Transmisión	44
4.2.3	Módulo Controlador	47
4.3	TRAMAS DE COMUNICACIÓN	49
4.3.1	Trama en el Enlace Ascendente	49
4.3.2	Trama en el Enlace Descendente	49
4.4	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN MÓVIL	50
4.5	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN BASE	53
4.6	BASE DE DATOS	56
4.7	INTERFAZ WEB	58
4.7.1	Visualización de la Posición Geográfica	58
4.8	INTEGRACIÓN DEL SISTEMA	59
5	PRUEBAS Y RESULTADOS	61
5.1	PROCEDIMIENTO	61
5.2	PRUEBAS	62
5.2.1	Plan de Pruebas	62
5.2.2	Pruebas de Funcionalidad del Sistema	63
5.2.2.1	Pruebas sobre el enlace	64
5.2.2.2	Pruebas sobre la Base de Datos	66
5.2.3	Pruebas para Evaluar el Desempeño del Sistema	70
5.2.3.1	Pruebas servicio de localización	70
5.2.3.2	Pruebas sobre el enlace	71
5.2.3.3	Pruebas sobre el dispositivo	86

5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	91
6.1	CONCLUSIONES	91
6.2	LECCIONES APRENDIDAS	93
6.3	TRABAJOS FUTUROS	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Comparativa de tecnología LPWAN.	9
Tabla 2	Tipos de mensajes MAC.	14
Tabla 3	Valores de eficiencia espectral.	19
Tabla 4	Principales características del corregimiento de Quintana.	23
Tabla 5	Condiciones para la operación del sistema prototipo.	30
Tabla 6	Dispositivos empleados para la construcción de la MS.	43
Tabla 7	Dispositivos empleados para la construcción de la BS.	43
Tabla 8	Características del módulo GPS NEO 6M.	44
Tabla 9	Características generales de la tarjeta LoRa [®]	45
Tabla 10	Características generales de la tarjeta Arduino nano V2.	48
Tabla 11	Características del sistema.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Arquitectura de un sistema de navegación por satélite	3
Figura 2	Arquitectura de red Sigfox	8
Figura 3	Ubicación de LoRaWAN en la pila de protocolos	10
Figura 4	Arquitectura de red LoRaWAN	11
Figura 5	Ventanas de recepción para nodos clase A	12
Figura 6	Ventanas de recepción para nodos clase B	13
Figura 7	Ventanas de recepción para nodos clase C	13
Figura 8	Trama LoRaWAN	13
Figura 9	Pulso tipo chirp en el dominio del tiempo	15
Figura 10	Frecuencia de un pulso tipo chirp en el dominio del tiempo	15
Figura 11	Parámetros de interés en LoRa [®]	16
Figura 12	Conformación de símbolos empleando CSS, (a) Señal mensaje binaria, (b) Grupos de SF bits, (c) Señal modulada conformada por símbolos.	17
Figura 13	Símbolo de CSS	18
Figura 14	Representación de los cambios de frecuencia en la modulación CSS	19
Figura 15	Formato de Trama LoRa [®]	20
Figura 16	Mensaje de radio LoRa [®] , SF=8, CR=4/8	21
Figura 17	Mapa rural y urbano del municipio de Popayán (Cauca)	22
Figura 18	Municipio El Tambo	24
Figura 19	Gestión del riesgo - Fortalezas, amenaza y vulnerabilidad	25
Figura 20	Modelo general del sistema	27
Figura 21	Clasificación de los riesgos	28
Figura 22	Metodología	29
Figura 23	Diagrama de casos de uso del usuario de la MS	31
Figura 24	Diagrama de casos de uso del administrador	32
Figura 25	Componentes para el diseño del sistema	34
Figura 26	Diagrama de bloques de la MS	35
Figura 27	Mensajes entre componentes de la MS - reporte de una alerta	36
Figura 28	Mensajes entre componentes de la MS - reporte de una alerta desde la BS	37
Figura 29	Componentes generales de la BS	37
Figura 30	Controlador BS	38
Figura 31	Mensajes entre componentes - registro de una alerta	40
Figura 32	Mensajes entre componentes de la BS - atención de una alerta desde la BS	41
Figura 33	Módulo GPS NEO 6M	43
Figura 34	Tarjeta E32-433T30D	44
Figura 35	Conexión de la tarjeta E32-433T30D	45
Figura 36	Antena de la MS	47
Figura 37	Antena de la BS	47
Figura 38	Arduino nano V2	48
Figura 39	Trama para el enlace ascendente	49

Figura 40	Trama para el enlace descendente	49
Figura 41	Circuito de la MS	50
Figura 42	Diagrama de secuencias de operación de la MS	51
Figura 43	Diagrama de operación de la MS en una alerta	52
Figura 44	Diagrama de operación de la MS cuando recibe un mensaje	53
Figura 45	Circuito de la BS	54
Figura 46	Intercambio de mensajes entre controladores de la BS	54
Figura 47	Diagrama secuencia del controlador del lado del microcontrolador	55
Figura 48	Diagrama de secuencia del controlador del lado del servidor	56
Figura 49	Diagrama de base de datos	56
Figura 50	Página web - interfaz de inicio	58
Figura 51	Componentes del sistema	59
Figura 52	Ruta recorrida por la MS	63
Figura 53	Trayecto recorrido por la MS - Prueba de funcionalidad	64
Figura 54	Página web - Mapa de posición del usuario	65
Figura 55	Página web - Gestión de alertas	65
Figura 56	Página web. a) Usuario en estado de operación normal b) Usuario en estado de alerta	66
Figura 57	Página web - atender alertas	66
Figura 58	Página web - Inicio de sesión	67
Figura 59	Página web - Inicio de sesión con credenciales incorrectas	67
Figura 60	Página web - Inicio de sesión con credenciales correctas	68
Figura 61	Página web - Dispositivos	68
Figura 62	Página web - Usuarios	69
Figura 63	Página web - Modificar usuarios	69
Figura 64	Página web - Usuario modificado	70
Figura 65	Recorrido realizado por la MS	70
Figura 66	Exactitud de la posición del sistema	71
Figura 67	Ruta recorrida por la MS	72
Figura 68	Paquetes recibidos contra distancia	72
Figura 69	Tasa de Error de paquete versus distancia	73
Figura 70	Balance del enlace radio	74
Figura 71	BER contra SNR empleando modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata para velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps	77
Figura 72	Cobertura del sistema en Radio Mobile con margen de pérdidas adicionales de 10.7 dB	78
Figura 73	BER contra SNR haciendo uso de herramienta Radio Mobile para velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps	79
Figura 74	BER contra SNR empleando modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata de BER contra SNR haciendo uso de Radio Mobile	80
Figura 75	Cobertura del sistema sin pérdidas adicionales - El Tambo (Cauca)	81
Figura 76	Cobertura del sistema con pérdidas adicionales - El Tambo (Cauca)	81
Figura 77	Perfil a 9.4 Km de la BS	82

Figura 78	Perfil a 7.8 Km de la BS	82
Figura 79	Perfil a 2.3 Km de la BS	83
Figura 80	Relación de potencia de recepción estimada y PER	83
Figura 81	BER contra SNR haciendo uso de herramienta Sigfox <i>Coverage Tool</i> de QGIS para velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps	84
Figura 82	Cobertura del sistema sin pérdidas adicionales - Institución Educati- va Las Huacas	85
Figura 83	Cobertura del sistema con pérdidas adicionales - Institución Educati- va Las Huacas	85
Figura 84	Cobertura del sistema. a) Simulación en el municipio El Tambo (Cauca). b) Simulación en Quintana.	86
Figura 85	Consumo de corriente eléctrica de la MS en estado de operación normal.	87
Figura 86	Consumo de corriente eléctrica de la MS en estado de alerta.	87

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADR	<i>Adaptive Data Rate</i> , Velocidad de Transmisión de Datos Adaptativa.
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> , Estándar de Encriptación Avanzada.
API	<i>Application Programming Interface</i> , Interfaz de Programación de Aplicación.
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i> , Sistema de Navegación por Satélite BeiDou.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base.
BW	<i>Bandwidth</i> , Ancho de Banda.
CR	<i>Coding Rate</i> , Tasa de Código.
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado Tipo Chirp.
ESA	<i>European Space Agency</i> , Agencia Espacial Europea.
EU	<i>European Union</i> , Unión Europea.
FEC	<i>Forward Error Correction</i> , Corrección de Errores Hacia Adelante.
GIS	<i>Geographic Information System</i> , Sistema de Información Geográfico.
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i> , Sistema de Navegación Global por Satélite.
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema de Navegación Global por Satélite.
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , Sistema Global para Comunicaciones Móviles.
IO	<i>Input/Output</i> , Entrada/Salida.
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas.
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i> , Sistema Satelital de Navegación Regional de la India.

ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , Industriales, Científicas y Médicas.
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i> , Modelo de Terreno Irregular.
LBS	<i>Location Based Services</i> , Servicios Basados en Localización.
LED	<i>Light Emitting Diode</i> , Diodo Emisor de Luz.
LoRa	<i>Long Range</i> , Largo Alcance.
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i> , Redes de Área Amplia y Largo Alcance.
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Networks</i> , Redes de Área Amplia y de Baja Potencia.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución a Largo Plazo.
LTE-M	<i>Long Term Evolution for Machines</i> , Evolución a Largo Plazo de las Máquinas.
M2M	<i>Machine to Machine</i> , Maquina a Maquina.
MS	<i>Mobile Station</i> , Estación Móvil.
NB-IOT	<i>Narrow Band Internet of Things</i> , Internet de las Cosas de Banda Estrecha.
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> , Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos.
PER	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquetes.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i> , Sistema Satelital Cuasi-Cenital.
SF	<i>Spreading Factor</i> , Factor de Ensanchamiento.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SQL	<i>Structured Query Language</i> , Lenguaje de Consulta Estructurada.
SSM	<i>Spread Spectrum Modulation</i> , Modulación de Espectro Ensanchado.
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i> , Lógica Transistor a Transistor.
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i> , Banda Ultra Estrecha.
WIFI	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica.

INTRODUCCIÓN

La tecnología evoluciona de manera constante y se convierte en una herramienta útil para mejorar tanto la eficiencia en tareas cotidianas como la calidad de vida de quienes la utilizan. En el área de las telecomunicaciones, el avance tecnológico ha permitido desarrollar e implementar sistemas de comunicación global, en el que la distancia deja de ser un obstáculo para transmitir y recibir información, permitiendo la prestación de servicios relacionados con las áreas de la salud, la educación, el trabajo, el comercio, y la cultura, entre otros [1].

Los sistemas de comunicación global han permitido desarrollar sistemas para localización, posicionamiento y navegación de personas y objetos. Actualmente, se emplean combinaciones tecnológicas para conocer la posición en tiempo real de personas y objetos, tales como: redes de comunicación satelital, redes de comunicación móvil celular, redes de Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), entre otras, las cuales pueden integrar sensores, actuadores o botones para generar alertas, como en el caso de las aplicaciones de localización orientadas a la gestión del riesgo ambiental.

El sistema prototipo de localización y comunicación de datos vía radio utilizando tecnología LoRa[®] para un escenario rural, es una red de dispositivos que permite la combinación de diferentes tecnologías tanto hardware como software: microcontroladores, receptores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*), bases de datos, transceptores LoRa[®] y servidores web. Estas tecnologías permiten desarrollar sistemas para determinar la posición de los usuarios, cuando es necesario conocer su ubicación, o cuando estos reportan un incidente o una posible amenaza que represente riesgo para una persona o para su comunidad.

Al sur occidente de Colombia, en el departamento del Cauca, y más específicamente en la vereda Quintana del municipio de Popayán, niños y niñas recorren distancias de hasta 3 Km desde sus lugares de residencia para asistir a la institución educativa las Huacas. Dependiendo de la época del año se presentan en la región fuertes lluvias, vientos, crecidas de ríos y quebradas, caídas de árboles, deslizamientos de tierra, incendios, entre otros, colocando en peligro a niños y niñas, a sus familias y a los habitantes de la región. Entendiendo este contexto y tomando ventaja de los recursos tecnológicos, es posible establecer la ubicación de ellos en tiempo real o que los niños y las niñas puedan reportar su posición en caso de necesitar asistencia o en caso de reportar un incidente [2].

Este trabajo de grado está asociado al proyecto de investigación denominado “uso y apropiación de las tecnologías de información y comunicación para la gestión del riesgo en el ámbito rural: una respuesta al desafío del cambio climático desde la escuela”, el cual tiene como objetivo principal proponer una estrategia basada en las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) que contribuya a la creación y fortalecimiento de planes y mecanismos de gestión del riesgo desde las instituciones educativas rurales en el municipio de Popayán. Uno de los objetivos a alcanzar por el proyecto es implementar un prototipo

como mecanismo de gestión del riesgo basado en el uso y apropiación de las TIC, evidenciando los efectos generados en la comunidad y documentando las lecciones aprendidas [3].

El presente documento de trabajo de grado consta de las siguientes partes: Capítulo 1, en el cual se presenta el marco teórico, con una descripción general de las tecnologías involucradas en la ejecución del trabajo de grado; Capítulo 2, el cual presenta el modelo general del sistema para comprender su funcionalidad; Capítulo 3, el cual presenta el diseño del sistema prototipo de localización y comunicación de datos; Capítulo 4, el cual presenta los diagramas de conexiones, la implementación de cada uno de los componentes que integran al sistema y el despliegue de la red; el Capítulo 5, presenta las pruebas de funcionalidad y desempeño realizadas al sistema; finalmente, en el Capítulo 6, se mencionan los trabajos futuros relacionados con el sistema y las conclusiones que se obtuvieron con el desarrollo del trabajo de grado.

CAPÍTULO 1

1 MARCO TEÓRICO

1.1 SISTEMAS DE NAVEGACIÓN GLOBAL POR SATÉLITE

Los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) hacen referencia a los sistemas de navegación por satélite, los cuales brindan servicios de posicionamiento, seguimiento y navegación. GNSS es la infraestructura de satélites generadores de señal que permite a los usuarios con un dispositivo compatible, determinar su posición y velocidad mediante el procesamiento de las señales recibidas de los satélites. El objetivo es determinar de forma rápida y exacta la localización y la velocidad instantánea de dispositivos en cualquier parte del mundo. El GNSS también se emplea para medir superficies las cuales se pueden visualizar en mapas y en Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographic Information System*) que almacenan, manipulan y visualizan los datos geográficos referenciados. GNSS se emplea en diversas aplicaciones relacionada con transporte, cartografía, agricultura, investigación y educación, entre otros [1].

Los GNSS se componen de tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario, tal como se representa en la Fig. 1.

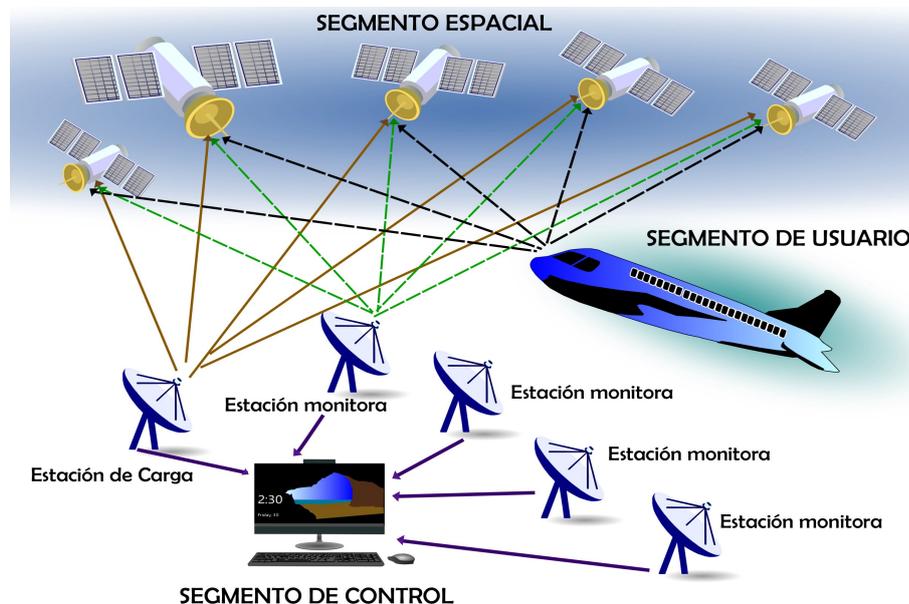


Fig. 1. Arquitectura de un sistema de navegación por satélite.
Tomada de [4].

El segmento espacial consiste en una constelación de satélites que transmiten señales de radiofrecuencia a los dispositivos de usuario. El segmento de control corresponde al conjunto de estaciones presentes en la superficie del planeta encargadas de rastrear los satélites, monitorear sus transmisiones, realizar procesamiento de señal y enviar comandos y respuestas al segmento espacial. El segmento usuario está conformado por equipos, terminales, receptores y dispositivos que reciben las señales procedentes del segmento espacial [4].

Los sistemas GNSS actuales son: el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) o GPS-NAVSTAR de origen estadounidense [5]; el Sistema Satelital de Navegación Global (GLONASS, *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) de origen ruso [6]; y están en fase de desarrollo: el sistema europeo de radionavegación y posicionamiento por satélite GALILEO [7]; el Sistema Satelital de Navegación BeiDou (BDS, *BeiDou Navigation Satellite System*) de China [1]; el Sistema Satelital Cuasi-Cenital (QZSS, *Quasi-Zenith Satellite System*) de Japón [1]; y el Sistema Satelital de Navegación Regional de la India (IRNSS, *Indian Regional Navigation Satellite System*) [1]. El Sistema GPS es el más utilizado y conocido. El mercado GNSS se puede dividir en diferentes aplicaciones clave, algunas de ellas son: ingeniería civil, cartografía, topografía, geodesia, geofísica, medio ambiente, agricultura y los servicios basados en localización [1]. A continuación, se hace una introducción a las características más importantes de los sistemas de navegación global más representativos.

1.1.1 Sistema GPS-NAVSTAR

El sistema GPS o GPS-NAVSTAR es un sistema de radio navegación controlado y financiado por el gobierno de los Estados Unidos, el cual permite determinar en la Tierra la posición de cualquier objeto. El GPS funciona mediante una constelación de 24 a 27 satélites en órbita sobre el planeta, a una altura de aproximadamente 20,200 Km de la superficie terrestre, en seis planos con una inclinación de 55 grados y con órbitas distribuidas para que en todo momento haya al menos 4 satélites (un plano) visibles en cualquier punto de la tierra. Inicialmente fue construido solo para uso militar, pero desde el año 1980 el gobierno estadounidense decidió que el sistema fuera abierto para su uso gratuito en aplicaciones civiles. El sistema GPS ofrece servicios de posicionamiento, navegación y cronometría. Algunas de sus aplicaciones son control de tráfico aéreo, navegación en automóviles y servicios de emergencia, entre otros [5].

1.1.2 Sistema GLONASS

El sistema GLONASS pertenece y es administrado por la Federación Rusa por medio de su agencia espacial. GLONASS proporciona la posición en tiempo de real y está diseñado para calcular el desplazamiento de un usuario. El sistema emplea un conjunto de 31 satélites (24 activos) que orbitan sobre la superficie terrestre a una altura aproximada de 19,100 Km [6].

1.1.3 Sistema GALILEO

GALILEO es una iniciativa de la Unión Europea (EU, *European Unión*) y la Agencia Espacial Europea (ESA, *European Space Agency*), para desarrollar un sistema de radio-navegación por satélite de última generación con alcance mundial. GALILEO comprende una constelación de 30 satélites (27 y 3 de reserva) divididos en tres órbitas circulares, a una altura de aproximadamente 24,000 Km, que cubren toda la superficie de la Tierra, los cuales son apoyados en su operación por una red de estaciones terrestres. A diferencia del sistema GPS y el sistema GLONASS, el sistema GALILEO es totalmente civil [7].

1.1.4 Sistema BEIDOU

BeiDou es el sistema de navegación por satélite en desarrollo por la República Popular de China. El sistema ofrecerá dos servicios: el primero será abierto y permitirá calcular una posición con un margen de error de 10 m, 0.2 m/s y 0.000005 s. El segundo servicio será autorizado solo para determinados clientes y ofrecerá servicios de mayor precisión y con mayores medidas de seguridad [1].

A diferencia de los sistemas GPS-NAVSTAR, GLONASS y GALILEO, BEIDOU usa satélites en órbita geostacionaria. Esto implica que el sistema no emplea un considerable número satélites, por lo tanto limita su cobertura [8].

1.2 SERVICIOS BASADOS EN LOCALIZACIÓN

Los servicios basados en localización (LBS, *Location Based Services*) son aquellos servicios que emplean datos geográficos o coordenadas espaciales para crear soluciones que mejoren la calidad de vida de los usuarios. Los LBS se emplean comúnmente en áreas industriales, militares, gubernamentales, servicios de emergencia y en el sector comercial.

Los LBS emplean herramientas que permiten estimar la posición de los usuarios con el fin de realizar determinadas acciones con base a consideraciones específicas de la aplicación. Dentro de los desarrollos destacables, se incluyen tecnologías o servicios para localizar parqueaderos disponibles, localizadores de amigos y familiares en cercanía, y sistemas de envío de avisos sobre tiendas, ofertas y actividades recreativas cercanas [9].

1.3 INTERNET DE LAS COSAS

El Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) es un concepto que hace referencia a que objetos cotidianos tengan conexión a Internet. IoT consiste en la integración de objetos a una red de comunicación de la que reciben y a la que envían datos, algunas veces de manera autónoma sin la implicación directa de las personas. En el IoT, dispositivos inteligentes recolectan datos del entorno, los envían a través de internet y se analizan con el objetivo de ofrecer diferentes servicios que mejoren la experiencia de los usuarios. Un dispositivo inteligente es cualquier objeto con un microcontrolador integrado, que le

permita establecer comunicación con otros dispositivos e intercambiar datos. Algunos dispositivos pueden ser electrodomésticos, ropa, y calzado, entre otros, los cuales generan e intercambian datos entre sí a través de diferentes tecnologías inalámbricas, y envían la información a través de internet a servidores de distintas aplicaciones. El tamaño de los sensores y su costo hacen que el IoT sea fácilmente integrable en hogares, entornos de trabajo y lugares públicos con el propósito de controlar, monitorear o actuar sobre ambientes específicos.

El hecho de que internet esté presente en muchos lugares hace que la adopción masiva de IoT sea más factible, esto refleja un aumento del número de dispositivos conectados a internet. Para la implementación de las aplicaciones actuales de IoT es necesario utilizar tecnologías que permitan la conexión de gran cantidad de dispositivos a la red. Tecnologías como Bluetooth y Zigbee no tienen la capacidad para cubrir grandes distancias y las tecnologías 3G, 4G, y 5G tienen un consumo elevado de energía. Por esta razón, existen tecnologías diseñadas para brindar una amplia cobertura y bajo consumo de energía en aplicaciones que requieren la conexión de una gran cantidad de dispositivos. Un grupo de estas tecnologías pertenecen a las Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, *Low Power Wide Area Networks*), las cuales han permitido el despliegue de mejores soluciones de red y la exploración continua de nuevas aplicaciones que permitan el transporte de la información a un bajo costo [10].

1.4 REDES DE ÁREA AMPLIA Y DE BAJA POTENCIA

Las LPWAN son una categoría para tecnologías que emplean protocolos de transporte inalámbrico de datos para la interconexión de dispositivos en grandes distancias, en ocasiones superiores a 800 Km, con bajas velocidades de transmisión de datos y bajo consumo de energía, utilizadas principalmente en la implementación de redes de Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*) e IoT. Las LPWAN no requieren de infraestructuras complejas y operan con un menor consumo de energía que las redes móviles tradicionales. Las LPWAN son capaces de controlar una mayor cantidad de dispositivos conectados en un área extensa.

Las LPWAN transmiten paquetes de 10 a 1000 bytes a velocidades de transmisión de datos de hasta 200 Kbps. El alcance de LPWAN varía de 2 Km a 1000 Km, dependiendo de la tecnología. La mayoría de las LPWAN emplean una topología en estrella en la que cada punto extremo se conecta a puntos de acceso central comunes [11].

1.4.1 Aplicaciones de Redes de Área Amplia y de Baja Potencia

Por sus características de bajo consumo de energía y largo alcance, las LPWAN se usan comúnmente en aplicaciones relacionadas con la medición inteligente y el IoT industrial [11].

En primer lugar, la medición inteligente tiene como propósito garantizar la calidad del suministro de servicios públicos, tales como energía, agua y gas, así como nuevas alter-

nativas para que los usuarios dispongan de información confiable en tiempo real, lo que permite hacer un uso eficiente de los servicios públicos domiciliarios.

En segundo lugar, el término IoT Industrial se centra en la aplicación de las ventajas que ofrece el IoT en el escenario industrial. En este escenario, todas las maquinas y equipos tienen sensores y actuadores que están conectados a Internet. Las LPWAN son empleadas en estas aplicaciones debido a su bajo consumo de energía y su bajo costo, siendo principalmente utilizadas con el propósito de automatizar y transportar la información de las industrias.

Entre otros fines, se pueden considerar las aplicaciones en agricultura inteligente y de precisión, ganadería, medidores inteligentes, iluminación inteligente, gestión de energía, fabricas inteligentes, casas inteligentes, parqueaderos inteligentes, edificios inteligentes, ciudades inteligentes, prevención de desastres, localización y seguimiento, monitoreo ambiental, gestión de basuras y seguridad, entre otras [11].

1.4.2 Seguridad de Redes de Área Amplia y de Baja Potencia

Las tecnologías LPWAN ofrecen diferentes niveles de seguridad incluyendo autenticación de dispositivos o suscriptores, autenticación de red, protección de identidad, Encriptación Estándar Avanzada (AES, *Advanced Encryption Standard*), encriptación de mensajes y aprovisionamiento de claves (clave maestra y clave de cifrado de datos) [12].

1.4.3 Tipos de Redes de Área Amplia y de Baja Potencia

Las LPWAN están compuestas por un grupo de diferentes estándares o tecnologías de red que operan en diferentes bandas de frecuencias con distintas denominaciones y también responden a estándares propios. Las LPWAN pueden hacer uso de bandas licenciadas y no licenciadas.

Algunas tecnologías de LPWAN que emplean bandas no licenciadas son: Sigfox y Redes de Área Amplia y Largo Alcance (LoRaWAN, *Long Range Wide Area Network*). Otras tecnologías de LPWAN que emplean bandas licenciadas son: Evolución a Largo Plazo de las Máquinas (LTE-M, *Long Term Evolution for Machines*) e Internet de las Cosas de Banda Estrecha (NB-IOT, *Narrow Band Internet of Things*). En la Tabla 1 se presenta una comparación entre diferentes características de estas tecnologías. [13].

- Sigfox: tecnología para el transporte de información en aplicaciones relacionadas con el IoT, que nace como respuesta a las desventajas de redes y tecnologías de 3G, 4G ó Fidelidad Inalámbrica (WIFI, *Wireless Fidelity*) en la comunicación de pequeños paquetes de datos o bajas velocidades de transmisión de datos con bajo consumo de energía. Sigfox se caracteriza por enviar paquetes de información de alrededor de 12 bytes, alcanzando distancias aproximadas de 10 Km y con bajo consumo de

energía [10]. La arquitectura de red se presenta en la Fig. 2.

La transmisión de la información está basada en la tecnología Ultra Banda Estrecha (UNB, *Ultra Narrow Band*) que emplea canales con ancho de banda del orden de 100 Hz [14]. Sigfox emplea frecuencias de las bandas para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*): 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 433 MHz en Asia. La tecnología permite enviar 140 mensajes diarios [10].

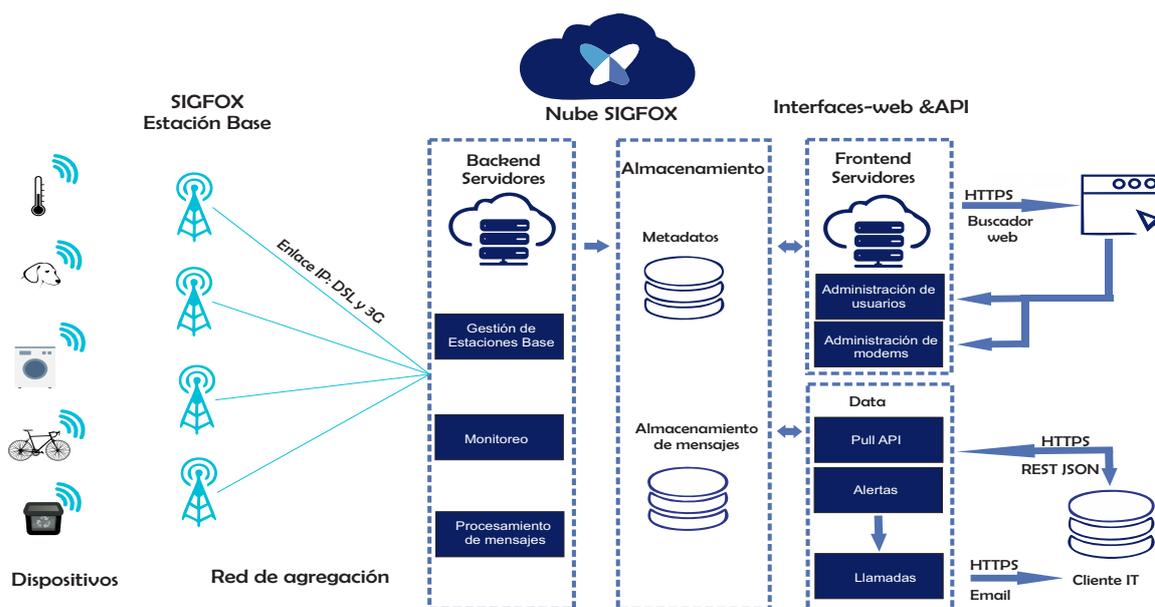


Fig. 2. Arquitectura de red Sigfox. Tomada de [15].

- LoRaWAN: protocolo de red de nivel de enlace, que usa la tecnología de radio LoRa (LoRa, *Long Range*) de nivel físico, para comunicar y administrar dispositivos de IoT [10]. El propietario de LoRa[®] es Semtech¹ y LoRaWAN se desarrolla de forma abierta por LoRa[®] Alliance. LoRaWAN utiliza frecuencias en bandas para aplicaciones ISM: 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 433 MHz en Asia.
- LTE-M: tecnología de red móvil que emplea la red Evolución a Largo Plazo (LTE, *Long Term Evolution*) ó 4G existente. Es una tecnología complementaria que es fácilmente adaptable en dispositivos 2G, 3G y 4G. La red LTE-M permite la transmisión de imágenes, texto y voz. LTE-M fue estandarizado en 2016 por el 3GPP en la especificación 13 (*Release 13*) al igual que NB-IoT [10].
- NB-IoT: es una tecnología de banda estrecha que puede coexistir con el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*) y LTE empleando frecuencias en bandas licenciadas. NB-IoT fue introducida por el 3GPP en la especificación 13 (*Release 13*). El hecho de que emplee una banda

¹Semtech es un proveedor líder de semiconductores para procesamiento de señales analógicas y mixtas.

de frecuencia licenciada le permite soportar conexiones masivas ya que no comparte el espectro con otras tecnologías de IoT [10].

	Sigfox	LoRaWAN	LTE-M	NB-IoT
Modulación	BPSK	CSS	QPSK	QPSK
Ancho de banda	100 Hz	500 KHz, 250 KHz y 125 KHz	1.4 MHz	200 KHz
Velocidad max. de datos	100 bps	50 Kbps	1 Mbps	100 Kbps
Comunicación bidireccional	Half-duplex ²	Half-duplex	Full-duplex ³	Half-duplex
Máximo mensajes /día	140(UL), 4(DL)	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
Longitud max. de carga útil	12 bytes (UL), 8 BYTES (DL)	243 bytes	27.2(DL), 62.5(UL)	1600 bytes
Distancia	10 Km (Urbano), 40 Km (Rural)	5 Km (Urbano), 20 Km (Rural)	1 Km (Urbano), 5 Km (Rural)	1 Km (Urbano), 10 Km (Rural)

² Half-duplex describe a una tecnología que permite el envío y la recepción de información, pero no de forma simultánea.

³ Full-duplex describe a una tecnología que permite el envío y la recepción de información de forma simultánea.

Tabla 1. Comparativa de tecnología LPWAN. Tomada de [10].

1.5 LoRa/LoRaWAN

El termino LoRa/LoRaWAN hace referencia a la utilización de dos tecnologías de nivel 1 y 2, respectivamente, según el Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open Systems Interconnection*). LoRa[®] es el nivel físico de la red LoRaWAN [10]. En la Fig. 3 se presenta la ubicación de LoRaWAN en la pila de protocolos.

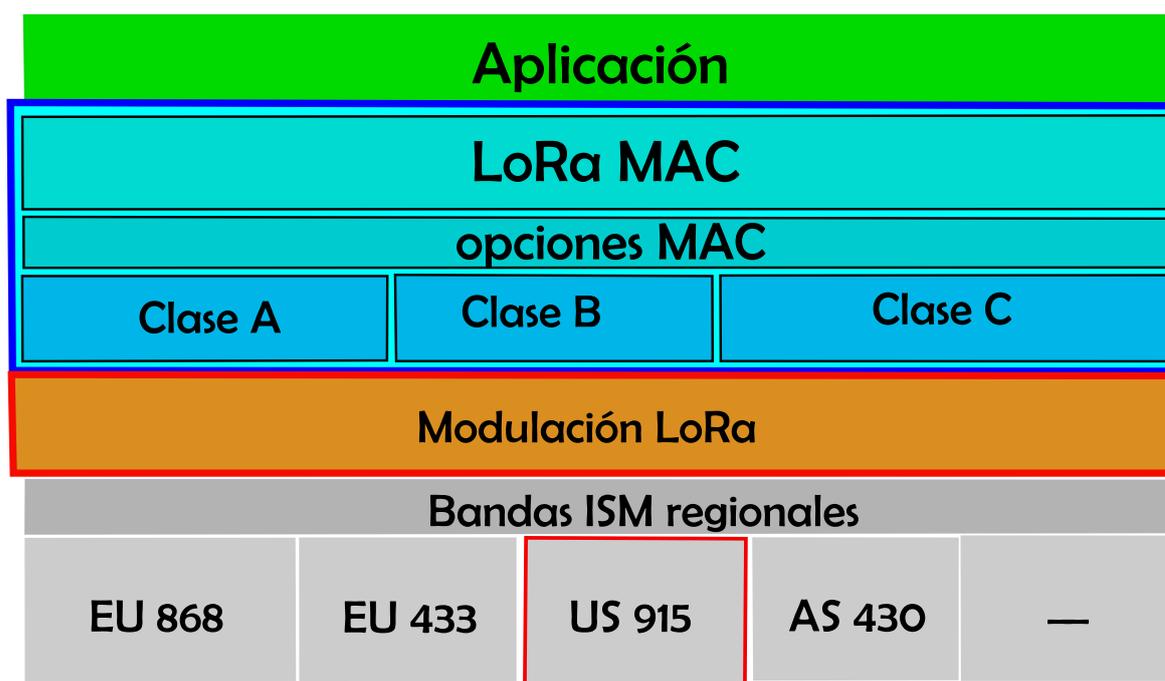


Fig. 3. Ubicación de LoRaWAN en la pila de protocolos.
Tomada de [10].

- **Aplicación:** son los servicios y recursos web almacenados en un servidor, su concepto se refiere a una interfaz para visualización y análisis de los datos enviados desde los dispositivos LoRa[®].
- **LoRa MAC:** es el nivel de enlace de datos encargado de administrar la transferencia de datos entre los dispositivos LoRa[®]. LoRaWAN define la transmisión de la información en tramas, la gestión de la seguridad y la integridad de la información.
- **Modulación LoRa:** LoRa[®] define características físicas para la transmisión de las señales empleando un esquema de modulación de Espectro Ensanchado tipo Chirp (CSS, *Chirp Spread Spectrum*) [10].
- **Bandas ISM regionales:** LoRa[®] opera en frecuencias de bandas ISM: 868 MHz y 433 MHz en Europa, 915 MHz y 430 MHz en Asia.

1.5.1 LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de comunicación diseñado para optimizar el uso de la tecnología de nivel físico LoRa[®], dando soporte a los niveles de red y de transporte y a los niveles superiores. LoRaWAN define la arquitectura de red que permite proveer un servicio de IoT usando este estándar, los tipos de dispositivos que se pueden utilizar como nodos, la seguridad que se implementa y las funciones que debe realizar cada elemento de la red. El uso de LoRaWAN como protocolo y arquitectura de red tiene alto impacto en parámetros fundamentales como el tiempo de vida de la batería de los nodos, la cantidad

de dispositivos LoRa[®] que soporta la red, la Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) y la seguridad de los datos.

1.5.1.1 Arquitectura de red

En la arquitectura de red LoRaWAN que se presenta en la Fig. 4, los dispositivos están conectados típicamente mediante una topología en estrella, en la que los nodos pasarelas o concentradores retransmiten mensajes recibidos desde los dispositivos finales hacia un servidor de red central. Los nodos pasarelas se conectan al servidor de red a través de conexiones de Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) estándar, mientras que los dispositivos finales emplean una comunicación inalámbrica de un solo salto a uno o varios nodos pasarelas.

Todas las comunicaciones son generalmente bidireccionales, también se pueden emplear comunicaciones tipo multidifusión (*broadcast*). Para maximizar tanto la duración de la batería de los nodos finales como la cantidad de dispositivos LoRa[®] o nodos finales que soporta la red, el servidor de red LoRaWAN gestiona la velocidad de transmisión de datos y la transmisión por radiofrecuencia de cada nodo final de manera individual, a través de un esquema de Velocidad de Transmisión de Datos Adaptativa (ADR, *Adaptive Data Rate*) [16]. Es decir, LoRaWAN es un protocolo de nivel de enlace de datos y se soporta sobre la tecnología de nivel físico LoRa[®], la cual permite que comunicaciones a diferentes velocidades de transmisión de datos no interfieran entre si y permite crear un conjunto de canales “virtuales” que aumentan la capacidad del nodo pasarela. Por lo tanto, las comunicaciones entre los nodos finales y los nodos pasarelas se realizan en diferentes frecuencias y a diferentes velocidades de transmisión de datos. Las velocidades de transmisión de datos en las comunicaciones entre los nodos finales y las pasarelas oscilan entre 0.3 Kbps y 50 Kbps.

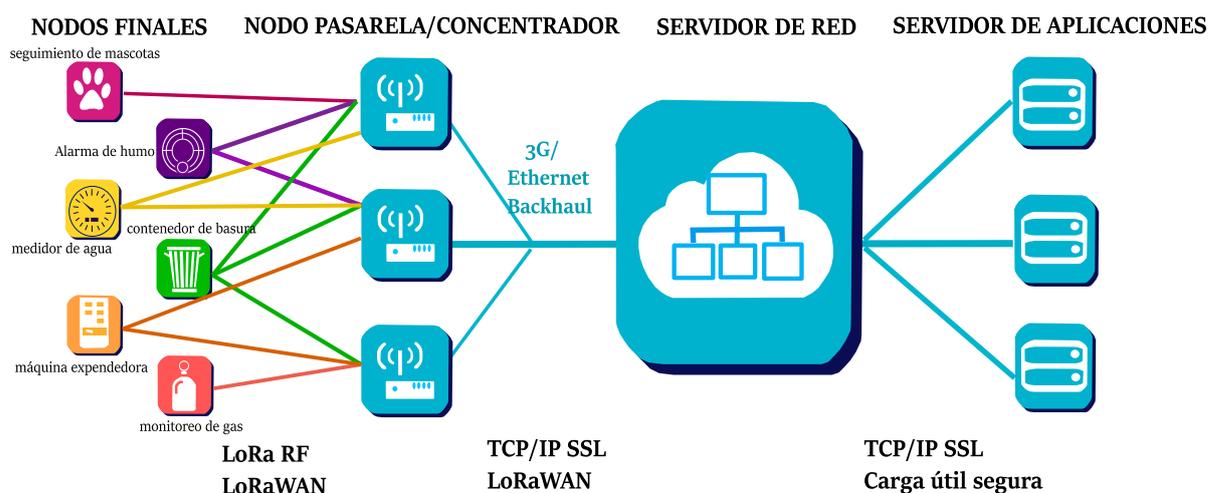


Fig. 4. Arquitectura de red LoRaWAN. Tomada de [10].

1.5.1.2 Clases de dispositivos LoRaWAN

Los dispositivos LoRa[®] se clasifican en tres clases dependiendo de su funcionalidad. Aunque todos los dispositivos soportan una comunicación bidireccional y pueden enviar datos al servidor, los dispositivos se distinguen en los tiempos asignados para recibir mensajes del servidor. Los tiempos o ventanas para transmisión de mensajes por parte del nodo final son definidos de manera independiente según las aplicaciones [17].

Existen mensajes de enlace ascendente (enviados por los nodos finales al servidor de red) y mensajes de enlace descendente (enviados por el servidor a un nodo final). Los tiempos o ventanas que destinan los nodos finales para la recepción de mensajes se relacionan directamente con el consumo de energía del nodo final. Cuando un nodo final transmite un mensaje consume 106 mA, cuando un nodo final está en modo escucha (ventana de recepción) consume 15 mA, de lo contrario el nodo final se encuentra en modo de reposo y consume 4 uA.

- **Clase A:** los nodos clase A ofrecen el mayor ahorro de energía debido a que solo ingresan en modo escucha (ventana de recepción) después de enviar un mensaje hacia el nodo pasarela, por ello son ideales en dispositivos alimentados por baterías.

La ventana de recepción para nodos clase A se presenta en la Fig. 5. Luego de que el nodo final clase A transmite un mensaje hacia el nodo pasarela, se generan dos ventanas de recepción en t_1 y t_2 segundos, respectivamente. El nodo pasarela puede responder dentro de la primera ventana de recepción o la segunda ventana de recepción, pero no ambas, tiempos después de los cuales el nodo final clase A no escuchará más mensajes provenientes del nodo pasarela hasta que inicie una nueva transmisión de datos [17].

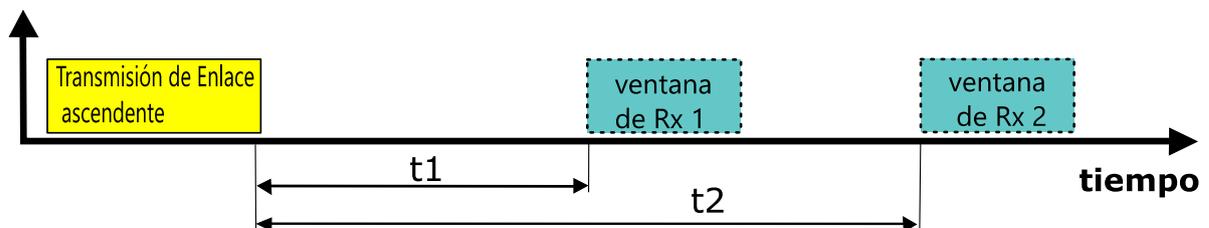


Fig. 5. Ventanas de recepción para nodos clase A. Tomada de [17].

- **Clase B:** los nodos clase B además de las ventanas de recepción de la clase A, también incorporan ventanas de recepción en tiempos predeterminados para recibir respuestas del nodo pasarela, como se observa en la Fig. 6. El nodo pasarela envía *beacons* o señales de referencia al nodo final clase B que definen los tiempos o ventanas de recepción. Este tipo de nodos pueden usar una batería o una fuente externa dependiendo de los tiempos asignados de recepción, los cuales determinan el consumo de energía [17]. El periodo de *ping* es el intervalo de tiempo entre las ventanas de recepción definidas por el *beacon*, de igual manera el periodo de *beacon* es el

intervalo de tiempo que espera la pasarela para enviar un nuevo *beacon* al nodo final.

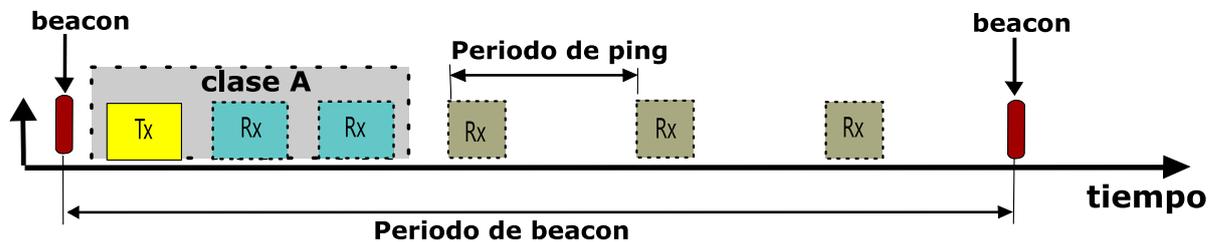


Fig. 6. Ventanas de recepción para nodos clase B. Tomada de [17].

- **Clase C:** los nodos clase C ofrecen el mayor consumo de energía debido a que siempre está en modo recepción y solo cuando es necesario en modo transmisión. Se recomienda para esta clase de dispositivos finales una fuente externa de alimentación [16]. En la Fig. 7 se presenta la ventana de recepción para los nodos finales clase C. Se observa que cuando el nodo final transmite un mensaje hacia el servidor de red se establecen dos ventanas de recepción como en los nodos finales clase A, pero además, el tiempo o ventana de recepción permanece abierto hasta la próxima transmisión de enlace ascendente. En la red pueden interoperar distintivas clases de nodos finales simultáneamente.

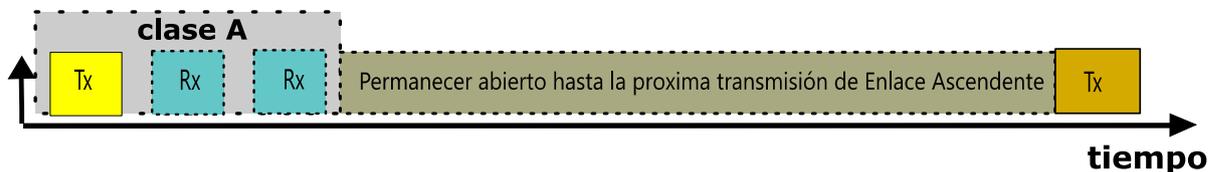


Fig. 7. Ventanas de recepción para nodos clase C. Tomada de [17].

1.5.1.3 Trama MAC LoRaWAN

La trama LoRaWAN que corresponde a la trama MAC, está contenida en el campo de carga útil de la trama física o trama de radio LoRa[®]. La trama MAC se ilustra en la Fig. 8.



Fig. 8. Trama LoRaWAN. Tomada de [10].

- **Encabezado MHDR:** especifica el tipo de mensaje que se envía en la carga útil de la trama MAC. Existen 8 tipos de mensajes posibles, los cuales se pueden clasificar

en mensajes de tipo *join* y *data*. Los mensajes tipo *join* son utilizados durante el proceso de registro y activación de los nodos finales en la red, y los mensajes de tipo *data* son utilizados para el envío de órdenes y datos de la aplicación. En la Tabla 4 se presentan los tipos de mensajes MAC.

Tipo Mensaje	Descripción
000	Join - request
001	Join - accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	Rejoin - request
111	Proprietary

Tabla 2. Tipos de mensajes MAC. Tomada de [10].

- **Campo integridad (MIC):** contiene una palabra código calculada desde los diferentes campos de la trama MAC, con el fin de garantizar la integridad y autenticidad del mensaje [10]. No es un campo para la detección o corrección de errores, es un campo que le permite al nodo final garantizar la autenticidad de la información ante el servidor de red.

1.5.2 LoRa

LoRa[®] es una tecnología inalámbrica de nivel físico utilizada por LoRaWAN en aplicaciones IoT e implementada por Semtech. LoRa[®] especifica características a nivel físico y define una técnica de modulación CSS para aplicaciones radio de baja potencia (del orden de mW), largo alcance (alrededor de 10 Km) y bajas velocidades de transmisión de datos (entre 0.3 Kbps - 50 Kbps). Las comunicaciones LoRa[®] están enfocadas para dispositivos o nodos finales IoT o comunicaciones M2M, las cuales transmiten pequeños paquetes de datos (longitud máxima de carga útil de 243 bytes) y con un bajo consumo de energía (del orden de mA), las cuales garantizan una larga autonomía de operación al dispositivo o nodo final.

La Modulación de Espectro Ensanchado (SSM, *Spread Spectrum Modulation*) ha sido utilizada para comunicaciones espaciales y militares por décadas debido a las largas distancias de comunicaciones que se pueden lograr de hasta 20 Km y la robustez frente a la interferencia. LoRa[®] es la primera en implementar este tipo de modulación de forma comercial.

1.5.2.1 Espectro ensanchado tipo chirp

Las técnicas de espectro ensanchado son métodos mediante los cuales una señal se distribuye deliberadamente en el dominio de la frecuencia. CSS es una técnica de SSM que utiliza pulsos tipo chirp (chirrido) para crear símbolos ensanchados en el dominio de la frecuencia con base a una señal mensaje. Los pulsos tipo chirp incrementan o disminuyen su frecuencia durante un periodo de tiempo, LoRa[®] emplea anchos de banda de 125 KHz, 250 KHz, 500 KHz, al transmitir información [17].

Un pulso tipo chirp, a menudo llamado señal de barrido, es un tono en el que la frecuencia aumenta (chirrido hacia arriba) o disminuye (chirrido hacia abajo) con el tiempo, representado en la Fig. 9 y la Fig. 10.

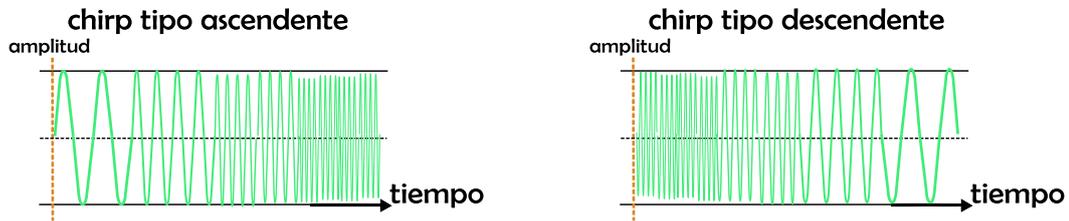


Fig. 9. Pulso tipo chirp en el dominio del tiempo. Tomada de [17].



Fig. 10. Frecuencia de un pulso tipo chirp en el dominio del tiempo. Tomada de [17].

Los cambios en frecuencia son los que determinan como se codifican los datos. Un pulso tipo chirp es medido usando la tasa de chirp (C), la cual define la velocidad de cambio de frecuencia de la señal de barrido en chirps por segundo, y la cual se indica mediante (1), donde, T (en s) es el tiempo de duración del pulso tipo chirp, f_{alta} y f_{baja} (en Hz) son la frecuencia más alta y la frecuencia más baja del chirrido, respectivamente.

$$C = \frac{f_{alta} - f_{baja}}{T} \quad (1)$$

1.5.2.2 Parámetros de interés en LoRa

El esquema de modulación CSS definido por LoRa[®] permite configurar tres parámetros fundamentales que definen el desempeño del enlace de comunicación y la velocidad de transmisión de datos (R_b), los cuales son: el Ancho de Banda (BW , *Bandwidth*), el Factor de Ensanchamiento (SF , *Spreading Factor*) y la Tasa de Código (CR , *Coding Rate*).

BW es el rango de frecuencias que recorre un chirrido, SF es el número de bits que se utilizan para conformar un símbolo y CR es un parámetro para la configuración del algoritmo de Corrección de Errores Hacia Adelante (FEC, *Forward Error Correction*) empleado por LoRa[®]. En la Fig. 11 se presentan los parámetros de interés involucrados en la modulación CSS para la obtención de un símbolo a partir de una señal de datos.

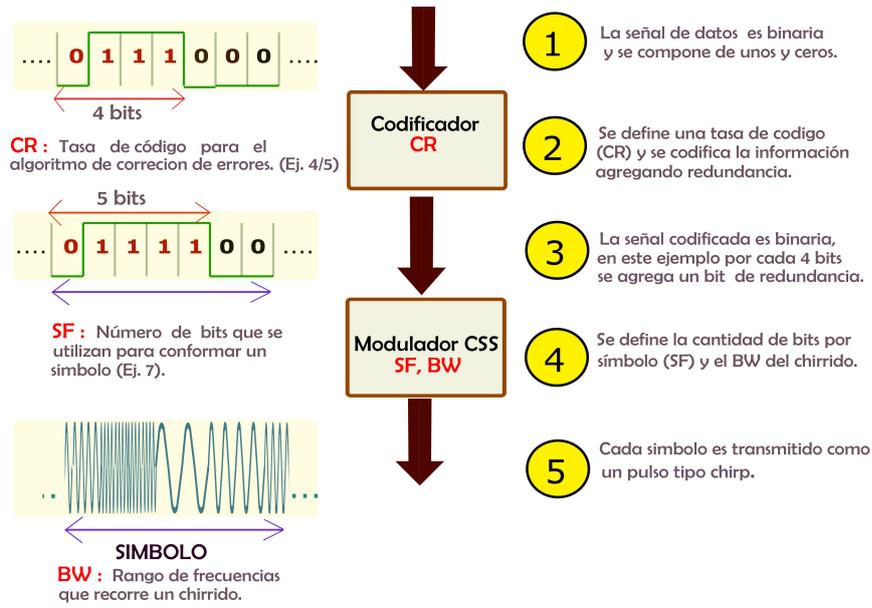


Fig. 11. Parámetros de interés en LoRa[®].

Fuente por los autores.

El SF de la señal o número de bits que se utilizan para conformar un símbolo puede tomar seis valores posibles, i.e., $SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$, como se presenta en la Fig.12, que para el ejemplo es 7. Un símbolo de la señal modulada se crea a partir de SF bits de la señal mensaje, por lo que existen 2^{SF} posibles símbolos. En la Fig. 12 (a) se presenta la señal mensaje binaria, su periodo de bit (T_b) y la velocidad de transmisión de datos (R_b). En la Fig. 12 (b) se observa que para $SF=7$, cada símbolo se obtiene a partir de un grupo de 7 bits de la señal mensaje. En la Fig. 12 (c) se observa que la señal modulada esta compuesta por símbolos que se traducen en chirridos, también se ilustra su periodo de símbolo (T_s) y velocidad de transmisión de símbolos (R_s). Por lo tanto, la relación entre T_b y T_s se presenta a continuación:

$$T_b = \frac{T_s}{(SF)}, \quad (2)$$

donde, T_b y T_s (en s) corresponden a los periodos de bit y de símbolo, respectivamente.

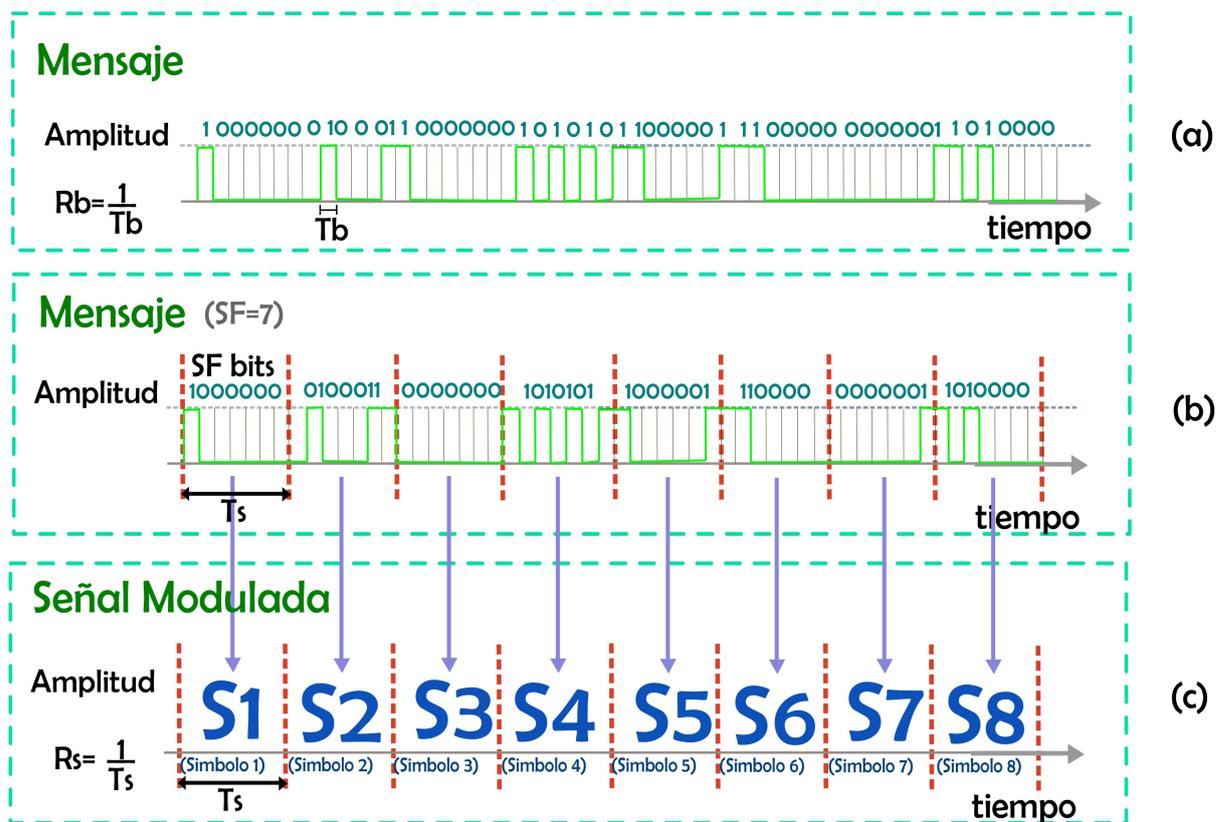


Fig. 12. Conformación de símbolos empleando CSS, (a) Señal mensaje binaria, (b) Grupos de SF bits, (c) Señal modulada conformada por símbolos. Fuente por los autores.

Cada símbolo corresponde a un pulso tipo chirp, el cual indica la frecuencia de inicio y finalización. En la Fig. 13 se observa que un símbolo se compone por una secuencia de 2^{SF} chips, secuencia que sucede en un periodo de símbolo (T_s). A partir de la Fig. 13 se obtiene la relación entre tiempo de símbolo T_s y tiempo de chip T_c :

$$T_s = 2^{SF} T_c, \quad (3)$$

donde T_c (en s) es el periodo de chip. La velocidad de transmisión de chip (R_c) es igual por definición en un sistema CSS al BW del sistema [18], como se presenta a continuación:

$$R_c = BW. \quad (4)$$

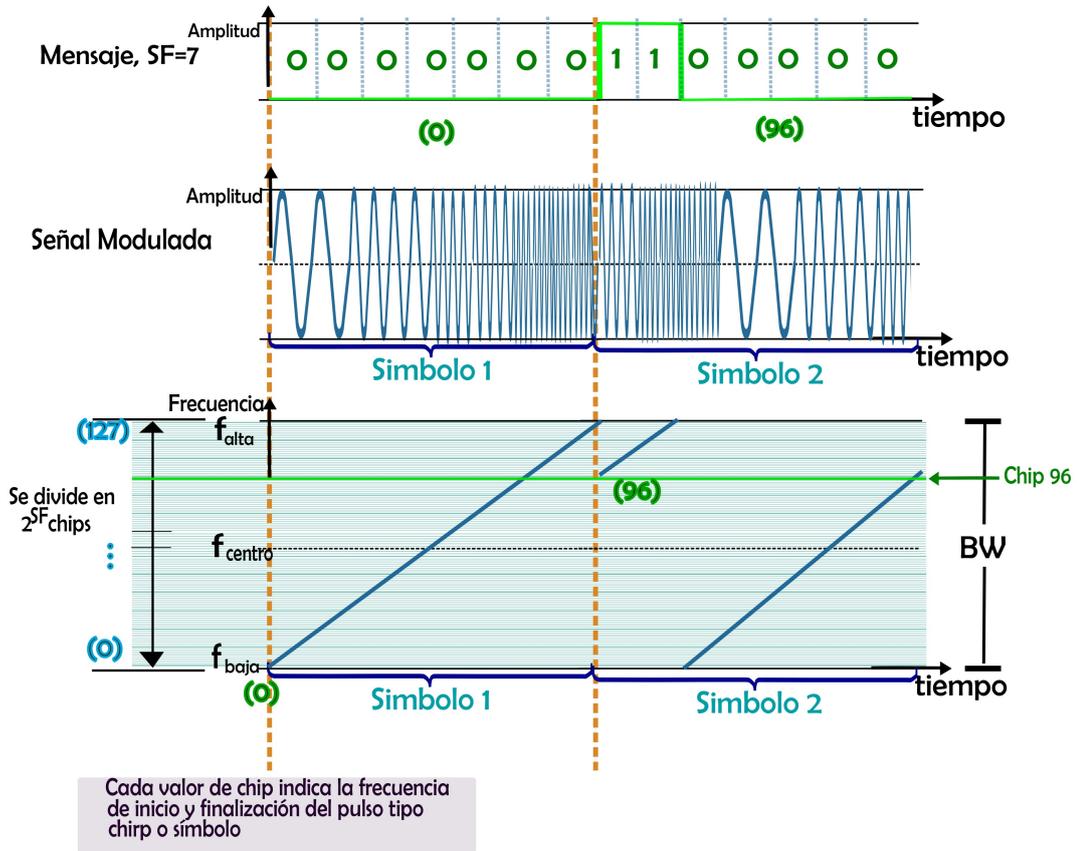


Fig. 13. Símbolo de CSS. Fuente por los autores.

Reemplazando (3) en (2) se obtiene T_b en función de T_c , como se presenta a continuación:

$$T_b = \frac{2^{SF} T_c}{(SF)}. \quad (5)$$

R_b se obtiene a partir de (5), como se presenta a continuación:

$$R_b = \frac{1}{T_b} = \frac{(SF)R_c}{2^{SF}}, \quad (6)$$

donde, R_b (en bit/s) es la velocidad de transmisión de datos y $R_c = \frac{1}{T_c}$ (en chip/s) es la velocidad de transmisión de chip. R_b también puede ser presentada en función de BW , tal como se presenta a continuación:

$$R_b = \frac{(SF)BW}{2^{SF}}, \quad (7)$$

donde, este resultado es obtenido a partir de (4). Dado que los paquetes de LoRa[®] incluyen codificación de canal con $CR = \frac{4}{(4+n)}$ y $n \in \{1, 2, 3, 4\}$, por lo tanto, la velocidad de transmisión de datos (R_b) se puede representar de la siguiente manera:

$$R_b = (SF)(CR) \frac{BW}{2^{SF}}, \quad (8)$$

donde, SF es el factor de ensanchamiento con $SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ y BW es el ancho de banda con $BW \in \{125 \text{ KHz}, 250 \text{ KHz}, 500 \text{ KHz}\}$.

La eficiencia espectral (η en bit/s/Hz) es una medida del aprovechamiento de la banda de frecuencia en la transmisión de datos. A mayor eficiencia espectral mayor aprovechamiento de la banda. La eficiencia espectral para un sistema CSS se presenta a continuación:

$$\eta = \frac{R_b}{BW} = \frac{(SF)(CR)}{2^{SF}} \tag{9}$$

	CR=1	CR= $\frac{4}{5}$	CR= $\frac{4}{6}$	CR= $\frac{4}{7}$	CR= $\frac{4}{8}$
SF=7	0.0547	0.0438	0.0365	0.0312	0.0273
SF=8	0.0312	0.025	0.0208	0.0179	0.0156
SF=9	0.0176	0.0141	0.0117	0.01	0.0088
SF=10	0.0098	0.0078	0.0065	0.0056	0.0049
SF=11	0.0054	0.0043	0.0036	0.0031	0.0027
SF=12	0.0029	0.0023	0.002	0.0017	0.0015

Tabla 3. Valores de eficiencia espectral. Fuente por los autores

La Fig. 14 presenta los cambios en frecuencia de la señal CSS en función del tiempo.

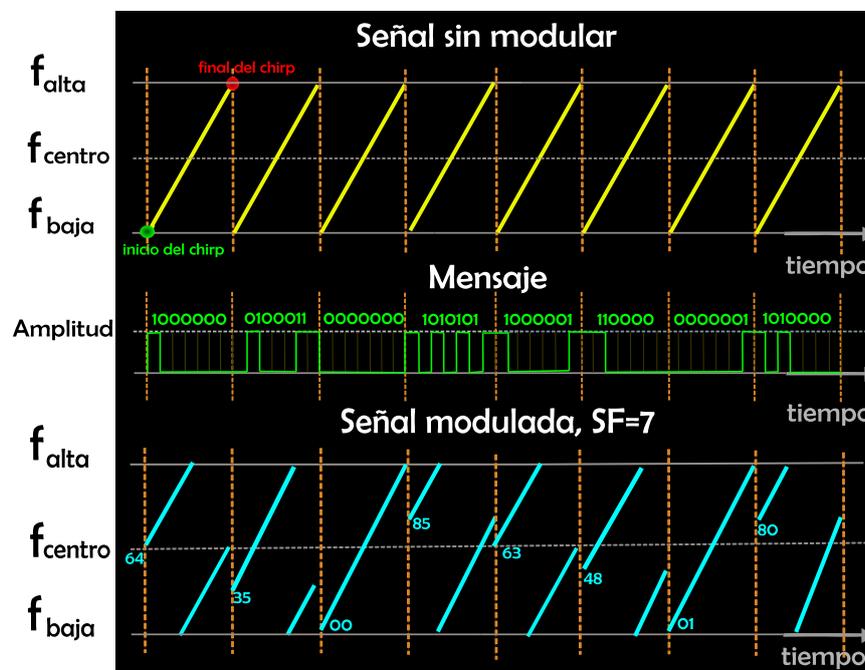


Fig. 14. Representación de los cambios de frecuencia en la modulación CSS. Fuente por los autores.

1.5.2.3 Ganancia de procesamiento

LoRa[®] mejora la sensibilidad del receptor mediante la ganancia de procesamiento (G_p), resultado de emplear el método CSS. La ganancia de procesamiento (en dB) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$G_p = 10 \log_{10} \left(\frac{R_c}{R_b} \right). \quad (10)$$

G_p en función de SF se obtiene de (5) y (11) como se presenta a continuación:

$$G_p = 10 \log_{10} \left(\frac{2^{SF}}{SF} \right), \quad (11)$$

por lo tanto, $G_p \in \{12.62, 15.05, 17.55, 20.10, 22.70, 25.33\}$. La ganancia de procesamiento permite definir el valor de sensibilidad del sistema, lo que permite que LoRa[®] sea capaz de recuperar la señal transmitida aún cuando la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) sea negativa [18]. De (11) a mayor SF, mayor es la ganancia de procesamiento y mayor es la sensibilidad del receptor, la cual varía típicamente entre -123 dBm para un SF = 7 y -137 dBm para una SF = 12 [16]. La velocidad de transmisión de datos para un SF dado es proporcional al BW de la señal, tal como se observa en (8), por lo tanto, duplicar el BW duplica la velocidad de transmisión de datos. Disminuir el CR ayuda a reducir la Tasa de Error de Paquetes (PER, Packet Error Rate) [18] ya que agrega mayor redundancia a la información, sin embargo, disminuye la eficiencia espectral del sistema. Aumentar el SF disminuye la velocidad de transmisión de datos y la eficiencia espectral del sistema.

1.5.2.4 Formato de trama de LoRa

El formato de trama definido para las señales LoRa[®] se presenta en la Fig. 15. Las partes fijas son el preámbulo y la carga útil; y las partes opcionales son el encabezado y el campo de CRC.

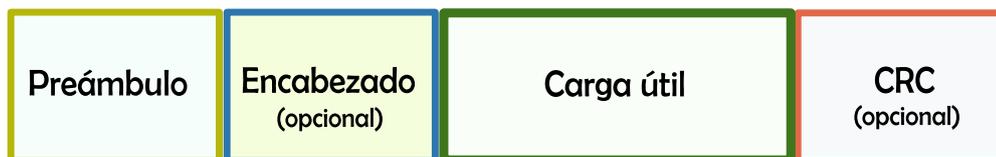


Fig. 15. Formato de Trama LoRa[®]. Tomada de [10].

- Preámbulo:** el preámbulo es el campo del formato de trama que se encarga de sincronizar el transmisor y el receptor, comienza con una secuencia de chirps ascendentes, tal como se muestra en la Fig. 16. Los últimos dos chirps ascendentes codifican la palabra de sincronización, esta es un valor de 1 byte utilizado para diferenciar más de una red de LoRa[®] en la misma banda de frecuencia. Si la palabra de sincronización no corresponde con la de la red a la que pertenece el nodo final, el nodo final deja de escuchar el mensaje. Finalmente, luego de la palabra

de sincronización vienen dos y un cuarto chirps descendentes (2.25 símbolos). El preámbulo completo puede durar entre 10.25 y 65,539.25 símbolos [10] y su tamaño dependerá del valor de SF, ya que el tamaño de un símbolo se define en función del SF.

- **Encabezado:** este campo opcional tiene un CR de $\frac{4}{8}$ y emplea 3 bytes. En 1 byte indica el tamaño del campo de carga útil, en el segundo byte el valor de CR usado en el campo CRC; y en el tercer byte la existencia de este último campo. El campo tiene un tamaño variable en función del SF [10].
- **Carga útil:** campo de datos transmitidos con un tamaño de 2 a 255 bytes.
- **CRC:** campo de FEC que utiliza la corrección de errores CRC de 16 bits para la Carga útil.

En la Fig. 16 se aprecia en detalle los chirps ascendentes y chirps descendentes enviados en el preámbulo y los símbolos enviados en la carga útil.

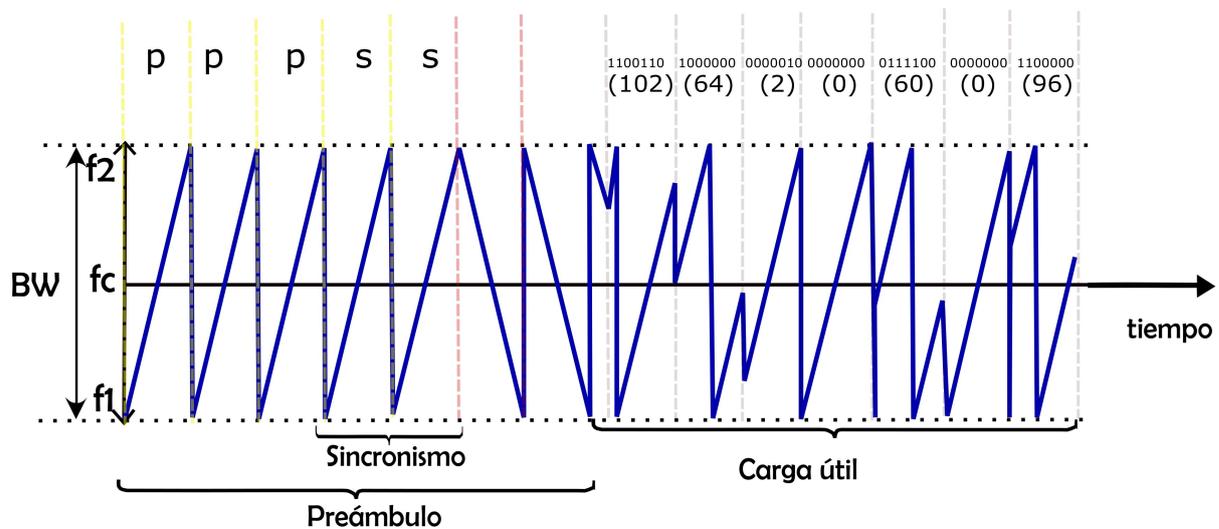


Fig. 16. Mensaje de radio LoRa[®], SF=8, CR=4/8. Tomada de [10].

1.6 CORREGIMIENTO DE QUINTANA

El corregimiento de Quintana está localizado a 24 Km al oriente del municipio de Popayán, con un área de 7,182.5 hectáreas sobre la microcuenca del río Las Piedras. El corregimiento limita al norte con el municipio de Totoró, al oriente con los municipios de Totoró y Puracé, al sur con el municipio de Puracé y al occidente con el corregimiento de Las Piedras [2] como se presenta en la Fig.17. En la Tabla 4 se presentan algunas de las características del corregimiento Quintana.

Este corregimiento es de suma importancia para el municipio de Popayán porque en su territorio nace el río Las Piedras, principal fuente hídrica del acueducto de Popayán. En la región faltan bosques protectores y se presentan quemadas, deforestación por consumo de leña y sobreuso del suelo [2], para contrarrestar estas inadecuadas prácticas es necesario implementar alternativas y políticas de reforestación y uso apropiado del suelo tanto a corto, mediano y largo plazo para prevenir, mitigar y disminuir la vulnerabilidad de la comunidad ante posibles riesgos.



Fig. 17. Mapa rural y urbano del municipio de Popayán (Cauca). Tomada de [19].

Las principales fuentes de ingreso de la comunidad de Quintana provienen de la ganadería de doble propósito² (con razas normando, cruces y razas criollas), las piscifactorías, el mercadeo de la papa fresa y algunos productos de huertas [20]. Quintana es una región en la cual se le puede desarrollar el agroturismo de manera responsable, brindando sostenibilidad y oportunidad a las personas de la región.

²La ganadería de doble propósito se define como la explotación del ganado bovino que produce tanto leche como carne para la venta.

Característica de la Zona	Descripción
Pisos bioclimáticos	<p>Páramo: entre los 3,200 y 3,600 m.s.n.m., con clima muy frío.</p> <p>Altoandino: entre los 2,800 y 3,200 m.s.n.m., con clima frío húmedo.</p> <p>Andino: entre los 2,200 y 2,800 m.s.n.m., con clima frío húmedo.</p> <p>Subandino: entre los 1,800 y 2,200 m.s.n.m., con clima medio húmedo.</p>
Principales corrientes de agua	Río Las Piedras, y las quebradas Santa Teresa, el Limonar, Zanjón el Arado, El Vado, Carnicería, Carpintería, El Cedro, San Juntas, Peñas Blancas, La Costa, Aguas Claras, La Charlare, Arrayanes y Pronagra.
Uso actual del suelo	<p>El área de corregimiento se distribuye aproximadamente en:</p> <p>pastizales (4,236.30) hectáreas, maíz (50 hectáreas), hortalizas (1.30 hectáreas), frijol (3.00 hectáreas), frutales (0.60 hectáreas), rastrojo (301 hectáreas), café (1.60 hectáreas), caña (4.25 hectáreas), plátano (6.70 hectáreas), fique (34.80 hectáreas), morera (0.30 hectáreas), otros cultivos (0.16 hectáreas), además de espacios dedicados a la ganadería que es su principal renglón productivo.</p>

Tabla 4. Principales características del corregimiento de Quintana. Tomada de [2].

1.7 MUNICIPIO EL TAMBO

El municipio de El Tambo presentado en la Fig. 18, se encuentra ubicado en el macizo colombiano, localizado en el centro - occidente del departamento del Cauca, a 33 Km de la capital, Popayán. El municipio del Tambo cuenta con una población aproximada de 53,769 habitantes y una extensión de 3,280 Km², limita al norte con el municipio de López de Micay; al sur con los municipios de Patía y Argelia; al oriente con los municipios de Morales, Cajibío, Popayán, Timbío y Rosas; y al occidente con el municipio de Guapi.

La región cuenta con tres pisos térmicos: frío, medio y cálido, los cuales favorecen una amplia variedad de cultivos, su economía está soportada principalmente por la producción de: café, plátano, caña, maíz, frijol, lulo, chontaduro, yuca, y fique; la producción

de algunos de estos productos agrícolas se genera en zonas marginadas y alejadas que no cuentan con una eficiente estructura de transporte y vías, de tal forma, que dificultan su transporte a los mercados locales y regionales [21]. El municipio del Tambo cuenta con importantes elevaciones: los cerros de Altamira, Don Alfonso, Mechengue, Napi, Pan de Azúcar, Santana y Munchique.

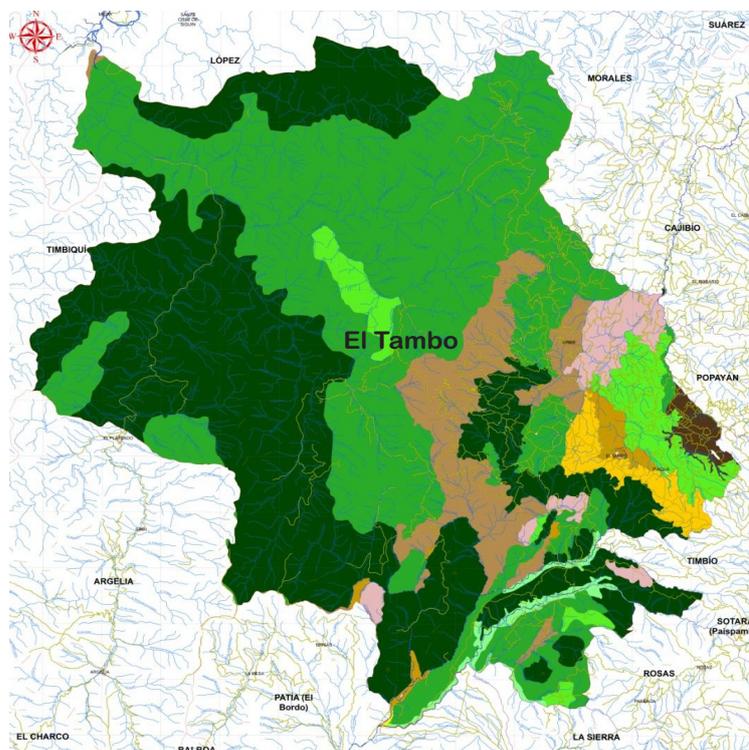


Fig. 18. Municipio El Tambo. Tomada de [22].

El Tambo ha sido azotado por la violencia durante varias décadas por grupos criminales, los cuales se disputan el control de la zona por su proximidad con la Costa Pacífica, una zona estratégica para sus actividades [23].

1.8 GESTIÓN DEL RIESGO

Los seres humanos habitan en comunidades cuyas costumbres han sido definidas por aspectos sociales, culturales, históricos, geográficos, naturales y económicos, entre otros. A medida que una comunidad se desarrolla, esta intenta adaptar el entorno para que sea un ambiente seguro en el que los integrantes de la comunidad puedan convivir y realizar sus actividades sin mayores problemas. Sin embargo, algunos de los aspectos mencionados hacen que existan riesgos que afecten el bienestar y la integridad de la comunidad. El riesgo depende principalmente de tres variables: la amenaza, la vulnerabilidad y las fortalezas o capacidades de las comunidades, tal como se presentan y se definen en la Fig. 19. Los fenómenos naturales y eventos asociados a la actividad humana en los territorios, hacen que existan amenazas que afecten el normal desarrollo de la comunidad. Las condiciones

socio-económicas pueden hacer que una comunidad conviva en un entorno no seguro, lo cual se mide en términos de la vulnerabilidad. Debido a que las amenazas naturales no pueden ser controladas y al incremento de fenómenos naturales resultado de la acción del hombre, se pueden plantear estrategias para reducir la vulnerabilidad y las amenazas antrópicas por medio de la información, el conocimiento, la capacitación y las acciones como comunidad, las cuales buscan que la comunidad esté preparada frente a fenómenos adversos que afecten la integridad física de sus miembros y sus posesiones.

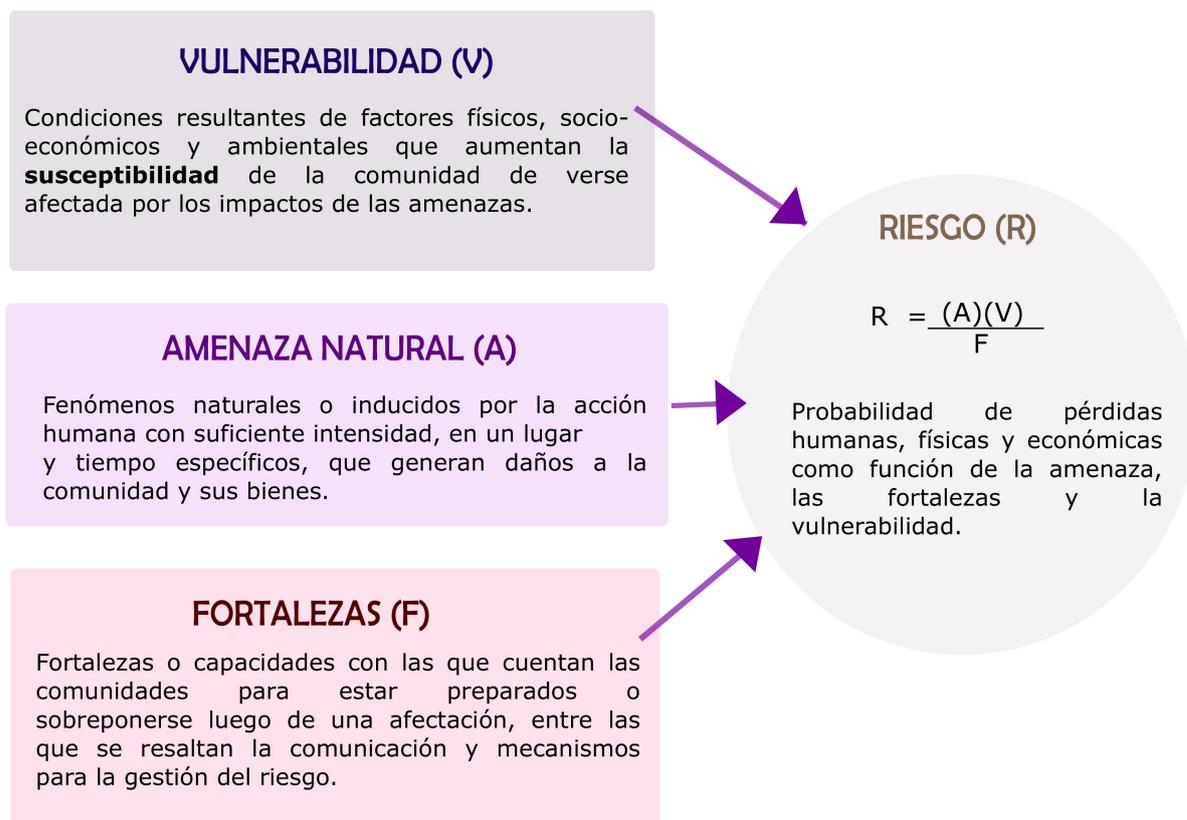


Fig. 19. Gestión del riesgo - Fortalezas, amenaza y vulnerabilidad. Tomada de [24].

Mientras las amenazas como sucesos naturales no son siempre controlables, la vulnerabilidad y las fortalezas de las comunidades se pueden mejorar con la implementación de planes y mecanismos para la gestión del riesgo. Se denomina gestión del riesgo a aquellas medidas que conllevan a la prevención de pérdidas humanas, físicas y económicas causadas por la afectación de un desastre. Existen dos tipos de medidas que se destacan en la gestión del riesgo: la mitigación y la preparación. La mitigación equivale a aquellas medidas que contribuyen a la reducción de la vulnerabilidad. La preparación es el conjunto de medidas a tomar durante o inmediatamente después de un evento potencialmente destructivo, con el objetivo de organizar y facilitar la atención de la emergencia y la rehabilitación del área afectada [25]. La gestión del riesgo pone énfasis especialmente en:

- Una fase de identificación y análisis del riesgo.

- Una fase de concepción y aplicación de medidas de prevención y mitigación.
- Los preparativos y acciones para las fases posteriores de atención, rehabilitación y reconstrucción.

1.8.1 Riesgos de Desastres en Colombia

En Colombia el crecimiento de la población y de los bienes localizados en áreas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos son factores determinantes en el aumento del riesgo. Se estima que el 86% de la población colombiana está expuesta a una amenaza sísmica alta y media, el 28% a un alto potencial de inundación y el 31% a una amenaza alta y media por movimientos en masa³ [26]. Las amenazas de origen natural como los sismos y las erupciones volcánicas pueden considerarse como invariantes en el tiempo, sin embargo, la deforestación y la erosión causada por el uso inapropiado de la tierra son las principales amenazas antrópicas a la calidad del suelo de la región, aumentando el deterioro ambiental y la susceptibilidad a inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales⁴ en amplias zonas del país [26].

Los bosques son de vital importancia para el país, ya que albergan una gran riqueza de biodiversidad y componen la mayor parte del territorio colombiano. Desafortunadamente, los índices de deforestación en el país son altos. La deforestación actualmente representa un problema ambiental y social con consecuencias que incluyen pérdida de biodiversidad, empobrecimiento de suelos, erosión, emisiones de carbono, y a futuro una menor capacidad de adaptación al cambio climático, así como menores oportunidades de desarrollo para las comunidades. Siendo consecuentes con el futuro desarrollo del país es indispensable la implementación de políticas y estrategias para conservar y preservar los bosques existentes [27].

Los departamentos con altos índices de pobreza se ven más amenazados por los fenómenos naturales. Entre los departamentos con mayor riesgo se encuentran: Amazonas, Guaviare, Guainía, Vaupés y Vichada, a los cuales se suman la mayoría de municipios de la costa Pacífica, especialmente los del departamento del Chocó y algunos municipios de los departamentos de Cauca y Nariño [26].

Fenómenos como los sismos fuertes y las erupciones volcánicas severas, por lo general ocasionan grandes pérdidas concentradas en un territorio y en un lapso de tiempo relativamente corto. Las inundaciones, deslizamientos de tierras, erupciones volcánicas y los sismos tienen los índices más altos de pérdidas por evento, en términos de viviendas destruidas y de vidas [26].

³Un movimiento en masa es el proceso por el cual un volumen de material constituido por roca, suelo, tierras, detritos o escombros, se desplaza ladera abajo por acción de la gravedad.

⁴Las avenidas torrenciales son crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente.

CAPÍTULO 2

2 MODELO DEL SISTEMA

El modelo del sistema es una representación simplificada del sistema de localización y comunicación de datos vía radio para la gestión del riesgo basado en LoRa[®]. El modelo del sistema describe la definición, las aplicaciones, la metodología empleada y los requerimientos que se establecieron para desarrollar el sistema prototipo.

2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Los estudiantes de la Institución Educativa Las Huacas - sede Quintana, son una población que diariamente se encuentra expuesta a múltiples amenazas naturales, principalmente deslizamientos de laderas presentes en los caminos desde sus hogares hasta la escuela. Teniendo en cuenta el riesgo en el que se encuentran los alumnos, el sistema de localización y comunicación de datos vía radio para la gestión del riesgo basado en LoRa[®], tiene como iniciativa proporcionar a los estudiantes de la comunidad de Quintana un medio de comunicación para el reporte de alertas que se utilice en caso de considerar que se presenta un riesgo para su integridad o para la comunidad y permitir a la Institución Educativa Las Huacas - sede Quintana contar con un mecanismo para la gestión del riesgo, a través del cual se conocerá la posición geográfica de los usuarios.

Los principales componentes que integran el sistema de localización y comunicación de datos vía radio para la gestión del riesgo basado en LoRa[®] son: una Estación Móvil (MS, *Mobile Station*) por cada usuario móvil del sistema, el sistema de comunicación inalámbrico LoRa[®] y una Estación Base (BS, *Base Station*) a cargo de un administrador. Para el desarrollo de este trabajo de grado se emplea solo una MS para representar el funcionamiento de las Estaciones Móviles (MS) en el sistema. La Fig. 20 presenta el modelo general del sistema.



Fig. 20. Modelo general del sistema. Fuente por los autores.

2.2 APLICACIONES DEL SISTEMA

Más de 11 millones de personas en Colombia viven en zonas rurales, donde están expuestas a diferentes riesgos, entre los que se encuentran riesgos derivados de las condiciones

ambientales de la zona, como pueden ser deslizamientos o avalanchas, y riesgos debidos a las condiciones sociales, que representan una amenaza latente para toda la población. En la Fig. 21 se presentan posibles riesgos que pueden afectar a la población, que en su mayoría pueden ser reportados por medio del sistema para tomar decisiones que mitiguen oportunamente las consecuencias.

El sistema permitirá a las personas contar con un mecanismo de alerta temprana ante posibles eventos, también les permitirá contar con un medio de comunicación que les brinde mayor seguridad ante los riesgos que diariamente amenazan el bienestar de la comunidad.

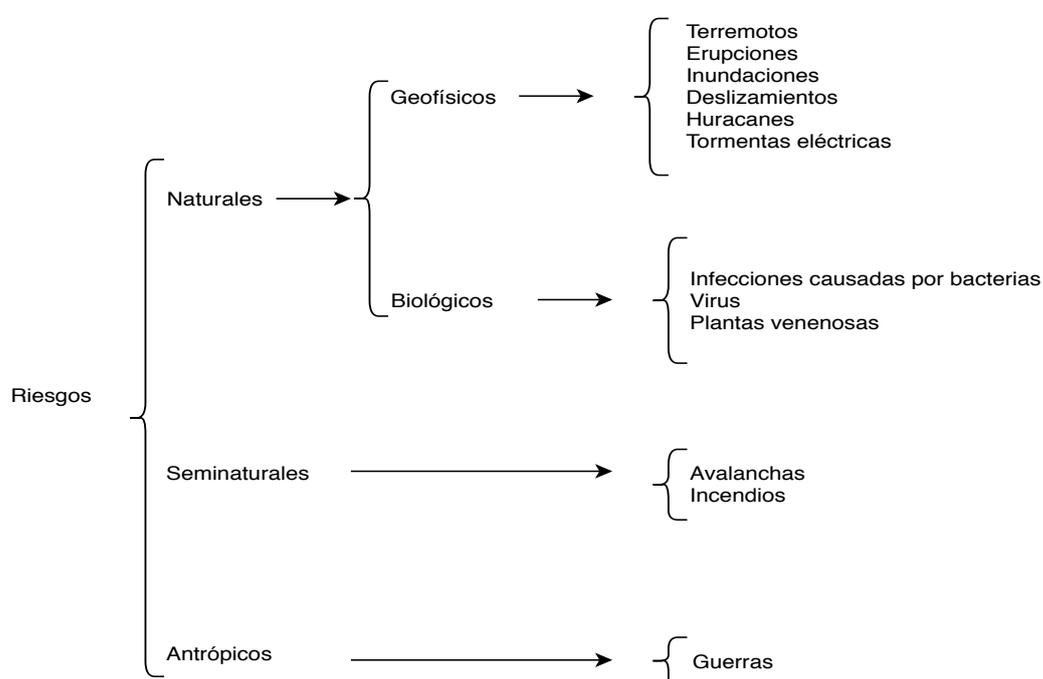


Fig. 21. Clasificación de los riesgos. Tomado de [28].

El sistema permite a la comunidad de Quintana tener un acercamiento a las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), lo cual para la mayoría de las comunidades rurales del país no es posible, ya que para las empresas de telecomunicaciones privadas o para el gobierno ha sido difícil proveer un tipo de soluciones que involucren TIC para atender las necesidades de pequeñas poblaciones rurales debido a su alto costo y/o baja rentabilidad.

2.3 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Para el desarrollo del sistema de localización y comunicación de datos vía radio para la gestión del riesgo basado en LoRa[®], se ha empleado la metodología secuencial o en cascada. La metodología en cascada es un procedimiento lineal que se caracteriza por

dividir los procesos de desarrollo en sucesivas fases de proyecto. Cada fase del proyecto contribuye a la construcción del trabajo de grado, en este caso un prototipo de un sistema de localización y comunicación de datos vía radio para la gestión del riesgo basado en LoRa[®], que permita brindar servicios de localización, comunicación y reporte de eventos como herramientas de un sistema de gestión del riesgo en zonas rurales. Se han definido cinco etapas las cuales se describen en de manera ordenada en los capítulos de este documento: "definición de requerimientos" - capítulo 2, "diseño del sistema" - capítulo 3, "implementación del sistema" - capítulo 4, "pruebas del sistema" - capítulo 5, y "funcionamiento y mantenimiento" - capítulo 6, las cuales se presentan en la Fig. 22. Las primeras tres fases de la metodología contribuyen a diseñar e implementar el sistema prototipo de localización y comunicación de datos vía radio para la gestión del riesgo basado en LoRa[®] y las posteriores dos fases contribuyen a evaluar el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos utilizando tecnología LoRa[®]. Debido a que las etapas se desarrollan de manera secuencial, se verifica el cumplimiento de los objetivos planeados en el desarrollo de cada etapa antes de finalizarla. En la última etapa correspondiente a "funcionamiento y mantenimiento", se observa el comportamiento del sistema y con base en las observaciones se pueden realizar pequeños cambios a cualquiera de las etapas anteriores con el fin de que el sistema funcione óptimamente [29].

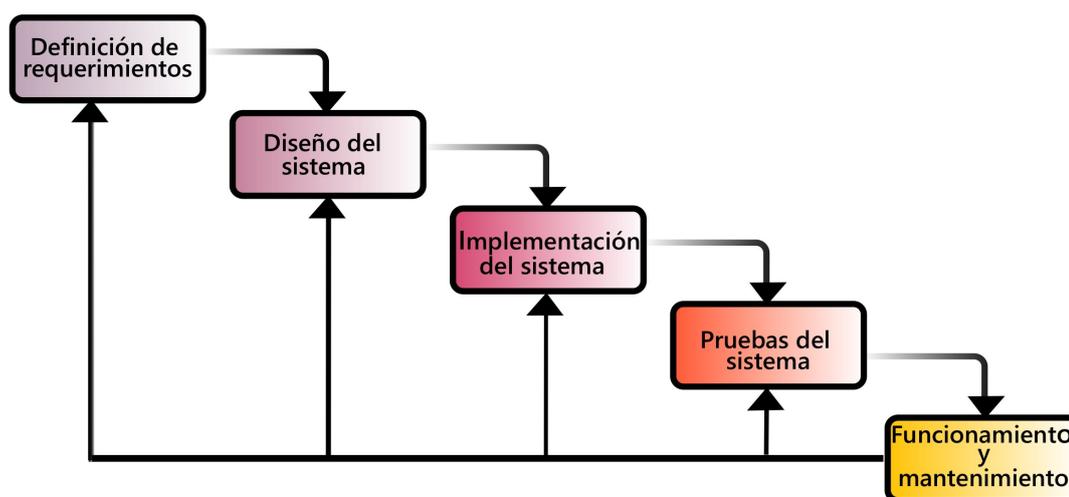


Fig. 22. Metodología de desarrollo para el trabajo grado. Tomada de [29].

Las fases se ejecutan de manera gradual y cada etapa del proyecto esta planeada para ser ejecutada una sola vez, sin embargo, en la última fase de ser necesario se pueden establecer ajustes que permiten regresar a una etapa anterior: en la primera etapa "definición de los requerimientos", se especifican los servicios que ofrecerá el sistema (localización y comunicación de datos), la zona geográfica en la que funcionará el sistema (vereda Quintana), la tecnología a emplear (LoRa[®]) y una interfaz web para su administración; en la etapa "diseño del sistema", se define que el sistema se conformará por tres tipos de componentes: una BS, una MS y un sistema de comunicación inalámbrico LoRa[®] para el transporte de la información; en la tercera etapa "Implementación del sistema", se presenta el proceso para la construcción de la BS y la MS y se realizan pruebas sobre la

MS y la BS para verificar su funcionamiento individualmente; en la cuarta etapa "pruebas del sistema", se realiza una integración de los componentes del sistema y se realizan pruebas de funcionalidad con el fin de evaluar el desempeño del mismo; finalmente, en la etapa "Funcionamiento y mantenimiento", el sistema se encuentra en funcionamiento, se establecen recomendaciones para el mantenimiento del sistema que garanticen su disponibilidad y correcta operación y se proponen trabajos futuros.

2.4 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS

Se establecen los requerimientos necesarios para el desarrollo del sistema prototipo con base en las condiciones socio-económicas de los usuarios y estrategias para la gestión del riesgo. El sistema se construye con el objetivo de que sea utilizado como una herramienta para la gestión del riesgo en las escuelas rurales del municipio de Popayán, principalmente en la Institución Educativa Las Huacas - sede Quintana. A través del sistema se podrá ofrecer el servicio de localización para conocer en tiempo real la posición de los usuarios. Además, a través del sistema se podrán realizar reportes de alertas sobre posibles riesgos que representen una amenaza contra la integridad de los usuarios del sistema o de su comunidad.

Los requerimientos del sistema describen el comportamiento o función particular que deben desarrollar los componentes que integran al sistema. A continuación se presentan las condiciones en las que deberá funcionar el sistema prototipo:

Característica	Condición
Zona geográfica	Vereda Quintana
Escenario	Rural
Tecnología de comunicación	LoRa [®]
Servicios	Localización, comunicación de datos y reporte de eventos como herramienta para la gestión del riesgo
Visualización	Interfaz web
Administración	Interfaz web

Tabla 5. Condiciones para la operación del sistema prototipo. Fuente por los autores.

El funcionamiento del sistema se desarrolla con base en tres componentes principales, tal como se presentó en la Fig. 20. A continuación se describen las funciones que deberá desarrollar cada componente en el sistema:

2.4.1 Estación Móvil

En la Fig. 23 se presenta el diagrama de casos de uso del usuario de la MS, en los cuales las actividades son generar alerta y conocer el estado en que se encuentra, ya sea en

operación normal o en alerta.

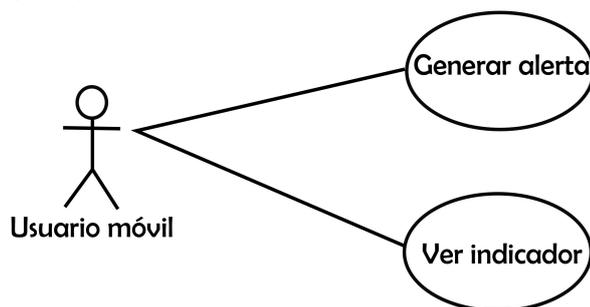


Fig. 23. Diagrama de casos de uso del usuario de la MS. Fuente por los autores.

La MS consiste en un dispositivo que será portado y utilizado por los usuarios a donde quiera que se estén desplazando. Este dispositivo es el encargado de obtener las coordenadas de la posición geográfica del usuario e intercambiar información con la BS, también incorpora un botón para reportar una alerta. La MS tiene dos estados: un estado de operación normal que representa a un usuario que no reporta eventos de riesgo; y un estado de alerta que representa a un usuario que se encuentra en riesgo. La MS cuenta con indicadores LED para dar a conocer el estado en que el se encuentra, un LED de color verde si es un estado de operación normal o un LED de color naranja si es un estado de alerta. Las funciones de la MS se clasifican en automáticas y manuales, las funciones automáticas son rea-lizadas como tareas internas para el funcionamiento de la MS y las funciones manuales son realizadas por el usuario del sistema.

2.4.1.1 Funciones automáticas

- **Calculo de posición:** se recibe información de los satélites y mediante técnicas de trilateración se calcula la posición geográfica en donde se encuentra ubicado el usuario.
- **Indicador de estado:** permite al usuario conocer el estado en el cual se encuentra el dispositivo. Si el indicador esta en verde es porque se encuentra en un estado de operación normal, si el indicador esta en naranja es porque se encuentra en estado de alerta. La MS entra en estado de alerta cuando el usuario reporta una alerta y/o cuando el administrador lo decida.
- **Envío de posición y estado:** la MS recibe las coordenadas geográficas del usuario y transmite un mensaje de manera periódica hacia la BS con el identificador del usuario, estado, latitud y longitud.
- **Recepción de ordenes:** la MS actualizará su estado con base en la información enviada desde la BS.

2.4.1.2 Funciones manuales

- **Reportar alerta:** cuenta con un botón el cual le permitirá al usuario reportar una alerta.

2.4.2 Medio de Transmisión Inalámbrico

El aire es el medio por el cual se transmiten ondas electromagnéticas para propagar la información. La transmisión de la información se realiza por medio de radiofrecuencias empleando una modulación CSS definida por LoRa®.

2.4.3 Estación Base

En la Fig. 24, se presentan los casos de uso para el administrador del sistema y las diferentes actividades que puede realizar desde la interfaz web correspondiente.

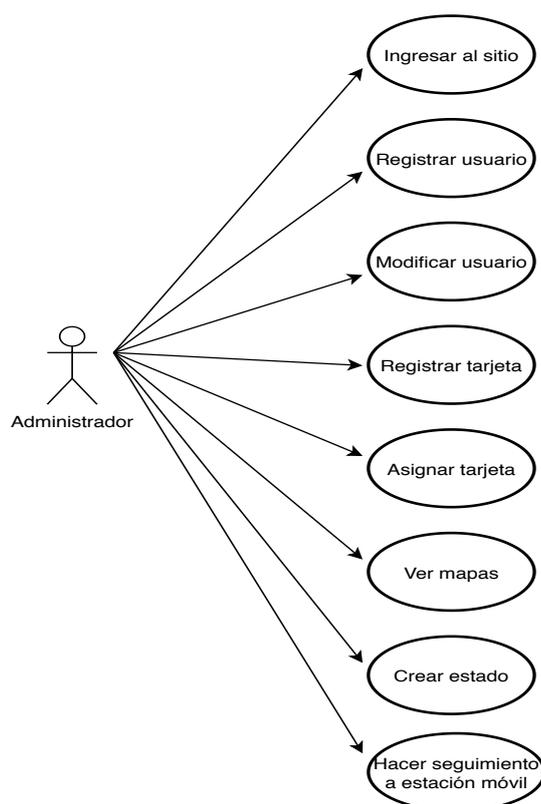


Fig. 24. Diagrama de casos de uso del administrador. Fuente por los autores.

La BS se encarga principalmente de recibir, transmitir y procesar la información enviada desde la MS. Existe una interfaz web para el administrador del sistema, desde la cual el administrador tiene acceso a la ubicación geográfica de las MS y el estado en que se encuentra cada usuario. El administrador también puede generar una alerta para un usuario en particular en caso de que lo considere necesario y esta encargado de atender las alertas. La función de atender una alerta consiste en cambiar el estado de alerta de la MS a un estado de operación normal. La única manera de atender una alerta es por medio de la interfaz web del administrador. La BS cuenta con un servidor web, el cual se encarga de visualizar la información contenida en la base de datos en una interfaz web adecuada. Las funciones automáticas son realizadas como tareas internas para el funcionamiento de la BS y las funciones manuales son realizadas por el administrador del sistema.

2.4.3.1 Funciones automáticas

- Recepción: recibe la información de las MS.
- Almacenamiento: guarda los datos que recibe desde las MS en una base de datos para su posterior procesamiento.
- Despliegue de datos: ilustra en una interfaz web la información recibida desde las MS.
- Envío de ordenes: transmite a las MS la orden de cambiar su estado a un estado de alerta o a un estado de operación normal en el caso de que se atienda la llamada de alerta.

2.4.3.2 Funciones manuales

- Cambio de estado: a través de la interfaz de administración del sistema se pueden generar o atender alertas para la MS.
- Administrar usuarios: a través de la interfaz de administración del sistema se pueden agregar, modificar y eliminar usuarios.
- Administración de MS: a través de la interfaz de administración del sistema se pueden registrar MS y asignarlas a los usuarios, así como reasignar las MS a otros usuarios.

CAPÍTULO 3

3 DISEÑO DEL SISTEMA

Los principales componentes que integran el sistema de localización y comunicación de datos vía radio para la gestión del riesgo basado en LoRa[®] son: la MS, el sistema de comunicación inalámbrico LoRa[®] y la BS. Para el diseño del sistema se empleó una topología en estrella para la comunicación entre la MS y la BS. Para el sistema de comunicación inalámbrico se define un ancho de banda igual a 125 KHz y una frecuencia central igual a 433 MHz. A continuación se presenta el esquema general de módulos y componentes que se definieron para el diseño del sistema prototipo:

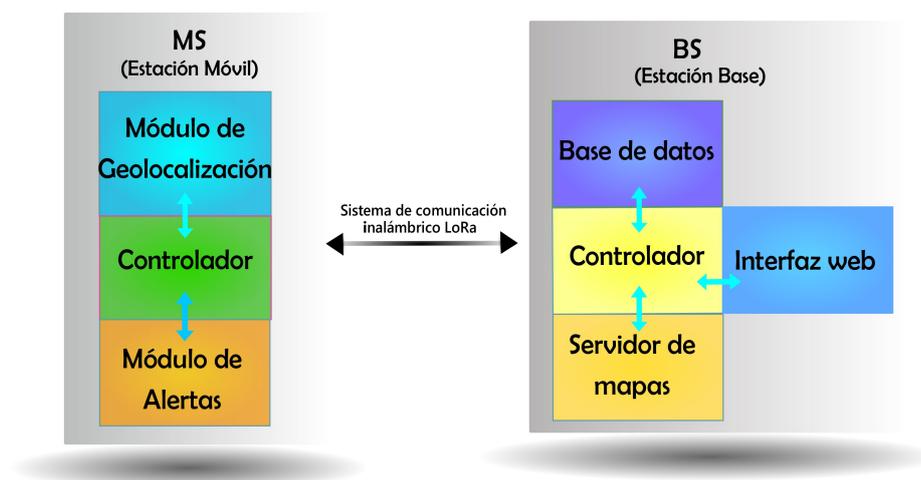


Fig. 25. Componentes para el diseño del sistema. Fuente por los autores.

3.1 ESTACIÓN MÓVIL

La MS es un dispositivo conformado por un controlador, un módulo de geolocalización y un módulo de alertas, que en conjunto se encargan de captar la posición geográfica del usuario y enviarla periódicamente a la BS. El periodo de transmisión de mensajes desde la MS hacia la BS es de 30 segundos en estado de operación normal y de 15 segundos en estado de alerta, por lo tanto, al reportar una alerta se incrementa la frecuencia con la que se envían las coordenadas. Su funcionamiento se conforma a través del módulo de alertas, el módulo de geolocalización y el controlador, como se presenta en la Fig. 26

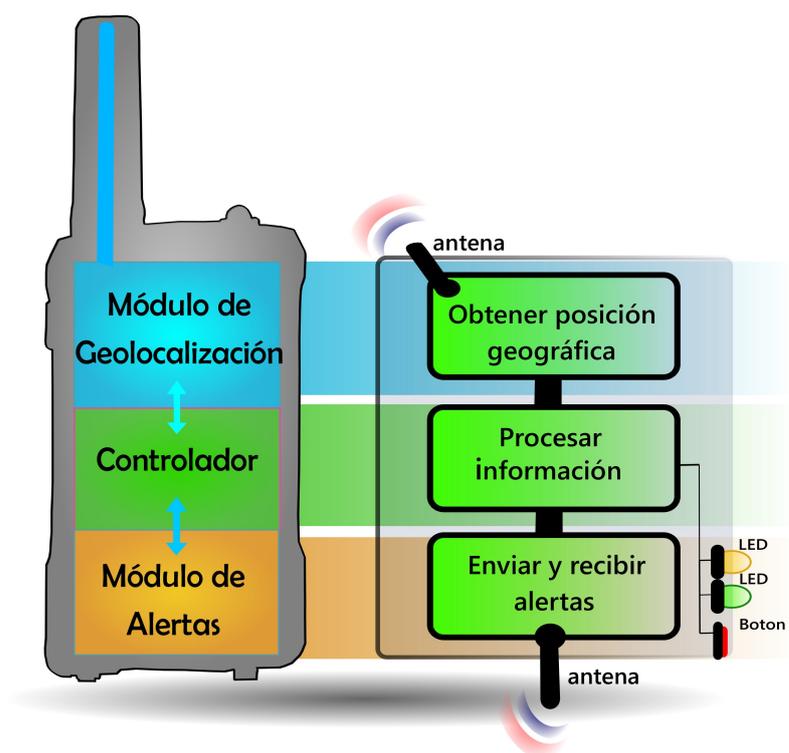


Fig. 26. Diagrama de bloques de la MS. Fuente por los autores.

3.1.1 Módulo de Geolocalización

Módulo encargado de obtener las coordenadas geográficas de la MS en el momento en que el controlador se lo ordene.

3.1.2 Controlador Estación Móvil

Módulo encargado de procesar la información de la MS, recibe los mensajes de actualización de información provenientes del modulo de alerta acerca de una nueva alerta y envía las ordenes hacia el módulo de geolocalización y módulo de alertas, controlando la frecuencia con la que se envían las coordenadas geográficas hacia la BS y el estado actual de la MS.

3.1.3 Módulo de Alertas

Módulo que permite a un usuario reportar y observar el estado de alerta en el que se encuentra la MS. Este módulo esta conformado por: una tarjeta basada en LoRa[®] para la transmisión y recepción de alertas; un botón (interruptor) conectado al controlador de la estación móvil para el reporte de alerta por parte del usuario; y dos indicadores LED, el LED naranja encendido representa una alerta y el LED verde encendido representa que la MS esta en estado de operación normal. Las alertas serán posteriormente atendidas por el administrador del sistema. El botón solo permite generar una alerta, la única manera de desactivarla o atenderla sera a través de la interfaz del administrador desde la BS.

3.1.4 Intercambio de Mensajes entre Componentes

La MS es responsable del calculo de la posición del usuario, recibir las ordenes, indicar el estado y enviar la posición y el estado hacia la estación base. Para desarrollar cada función, el controlador de la MS se encarga de enviar ordenes al módulo de alertas y al módulo de geolocalización. A continuación, se explican los mensajes que se intercambian entre los módulos que implementan cada proceso. Para obtener la posición geográfica, el controlador de la MS envía el mensaje "habilitar" hacia el módulo de geolocalización y este responde con las coordenadas de posición (latitud y longitud), posteriormente envía el mensaje a la BS como se presenta en la Fig. 27.

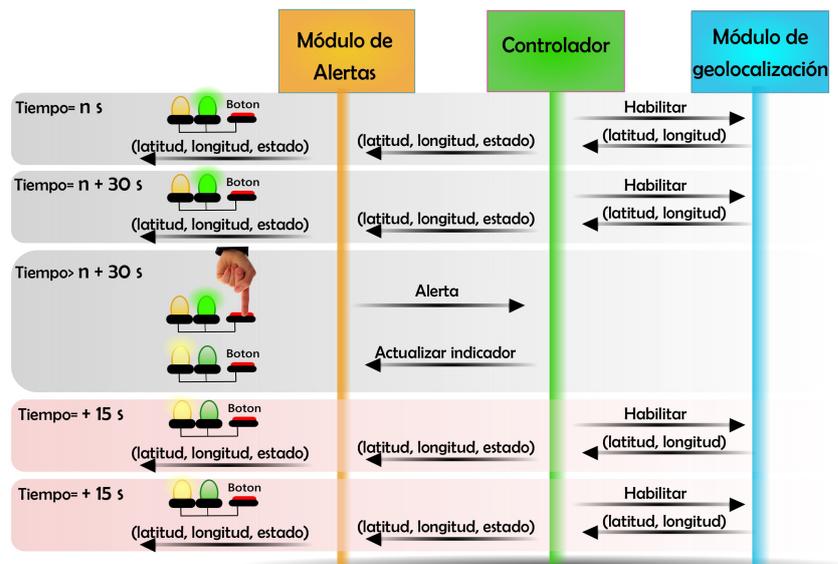


Fig. 27. Mensajes entre componentes de la MS - reporte de una alerta. Fuente por los autores.

Cuando el módulo de alertas reporta una alerta, el controlador inmediatamente actualizará el estado de la MS, apagando el LED de luz verde y encendiendo el LED de luz naranja como se presenta en la Fig. 27. Si se presenta un cambio de estado de la MS por el administrador, la BS enviará un mensaje a la MS, esta recibirá y procesará la información y le notifica al módulo de alertas la actualización del estado, como se presenta en la Fig. 28.

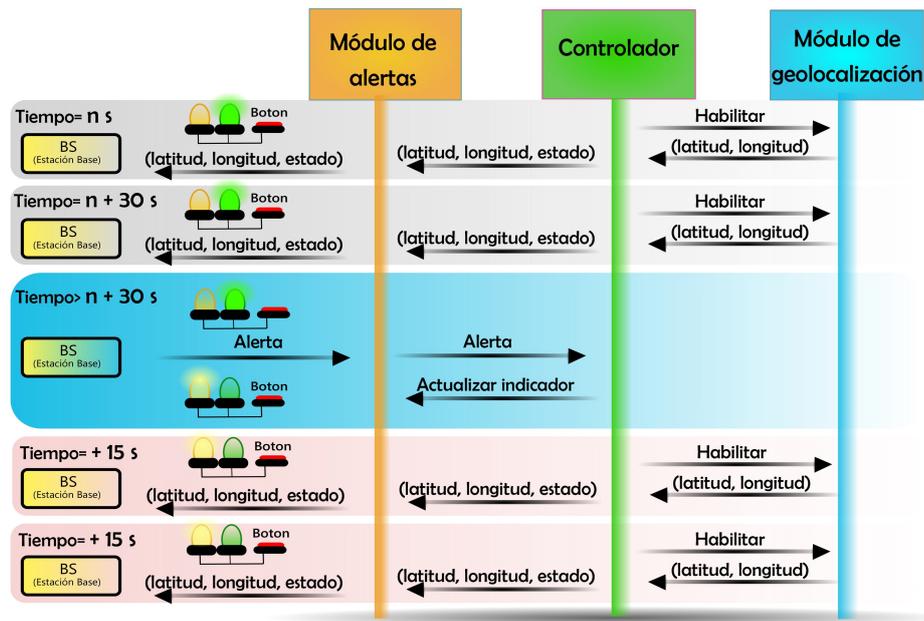


Fig. 28. Mensajes entre componentes de la MS - reporte de una alerta desde la BS. Fuente por los autores.

3.2 ESTACIÓN BASE

La BS esta conformada por un controlador, una interfaz web, una base de datos y un servidor de mapas como se presenta en la Fig. 29, los cuales se encargan de recibir y procesar la información enviada desde cada MS, guardar la información correspondiente en la base de datos y reenviar las ordenes del administrador del sistema a las MS.

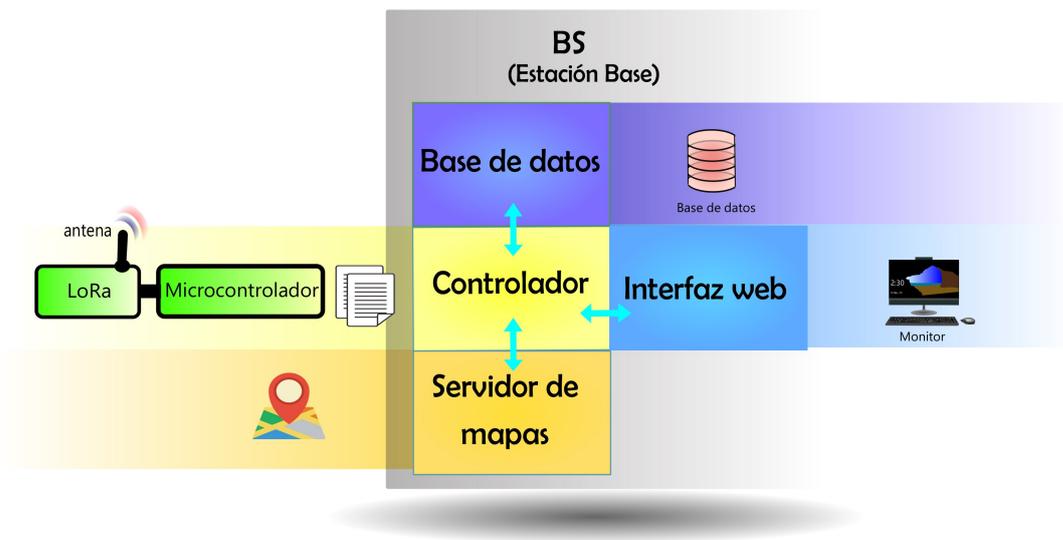


Fig. 29. Componentes generales de la BS. Fuente por los autores.

3.2.1 Controlador Estación Base

El controlador de la BS es el encargado de recibir los mensajes enviados desde cada MS e interpretar la información. El mensaje recibido desde cada MS contiene sus coordenadas geográficas, el estado en que se encuentra y su identificador. El controlador se encarga de realizar el procesamiento de la información para posteriormente almacenarla en la base de datos. El controlador retransmite las solicitudes del administrador del sistema a la MS.

Como se presenta en la Fig. 30, el controlador de la BS divide sus tareas del lado de un microcontrolador y del lado del equipo de computo denominado controlador del lado del servidor, lo cual facilita la carga y el procesamiento de información para el microcontrolador, ya que su capacidad es limitada, además mejora el tiempo de procesamiento y por consiguiente el desempeño de todo el sistema.



Fig. 30. Controlador BS. Fuente por los autores.

3.2.1.1 Microcontrolador

El microcontrolador se encarga de la comunicación con la tarjeta LoRa[®] y con el controlador del lado del servidor. Las siguientes son las tareas del microcontrolador:

- Recibir paquetes: recibe los paquetes enviados desde la MS.
- Enviar información al controlador del lado del servidor: toda información que recibe desde la MS se envía por medio de una comunicación serial al controlador del servidor.
- Preparar paquetes: lee constantemente la información recibida del controlador del lado del servidor para preparar paquetes que luego son transmitidos a la MS.

3.2.1.2 Controlador del lado del servidor

El controlador del lado del servidor es el encargado de realizar las siguientes tareas:

- Leer serial: Debido a que la comunicación entre el controlador del lado del servidor y el controlador del lado del microcontrolador se realiza a través de un único puerto serial, se debe estar leyendo constantemente el puerto serial para procesar la información.
- Guardar datos: se encarga de guardar la información de la MS en la base de datos, incluyendo las coordenadas geográficas, la hora, el estado y la identificación de la MS.

- **Realizar Consultas:** Con el fin de conocer el estado actual de una estación móvil, debido a una actualización por parte del administrador, el controlador del lado del servidor utiliza el identificador de la MS para realizar una consulta del estado del usuario correspondiente.
- **Actualizar:** Actualiza el estado de la MS constantemente con base en la información procesada desde el puerto serial.
- **Escribir en el puerto serial:** con el fin de enviar un mensaje hacia la MS, el controlador del lado del servidor transmite los mensajes del administrador al controlador del lado del microcontrolador por medio del puerto serial.

3.2.2 Base de Datos

Los datos o información generada por la MS se almacenan en una base de datos relacional de Lenguaje de Consulta Estructurada (SQL, *Structured Query Language*), desplegada en un equipo de computo que contiene instalado un servidor web. Los datos de las MS se almacenan en la base de datos con el fin de que se puedan realizar actualizaciones y consultas de información a través de la interfaz web por el administrador.

3.2.3 Servidor de Mapas

El servidor de mapas permite visualizar la ubicación geográfica de los usuarios en un mapa geográfico de la región a través de una interfaz web. En el sistema se utilizan dos tipos de visualización para los mapas: el primero, en un servidor local; y el segundo, en un servidor externo para lo cual se necesita acceso a Internet.

- *Online:* se utiliza para visualizar la posición geográfica de los usuarios en mapas cuando se tiene acceso a Internet.
- *Offline:* la zona para la cual se propone el sistema no tiene acceso a Internet, por lo cual, se cuenta con mapas cartográficos almacenados localmente, además este mapa cuenta con la visualización del recorrido diario de cada usuario.

3.2.4 Interfaz Web

Permite al administrador interactuar con una página web en la que se visualizan la información de los usuarios y permite la administración de todo el sistema. A continuación se presentan sus características.

- **Visualización:** permite visualizar todo los registros del sistema como mapas, usuarios y sus estados, posición y recorrido.
- **Control de usuarios:** permite registrar nuevos usuarios y modificarlos.
- **Gestión de alertas:** permite administrar los estados de los usuarios.
- **Control de tarjetas:** permite realizar registro de la MS y asignación a los usuarios ya registrados.

3.2.5 Intercambio de Mensajes entre Componentes

La estación base realiza consultas y registros de información a la base de datos, envía ordenes hacia la MS y dispone las herramientas necesarias al administrador del sistema para el seguimiento de la MS. La Fig. 31 presenta el intercambio de mensajes entre los componentes del sistema para el registro de las coordenadas de un usuario en la base de datos y la obtención del mapa para la visualización de la MS. El controlador recibe por medio de la tarjeta LoRa el estado y las coordenadas geográficas enviadas desde la MS, información que es registrada en la base de datos. La interfaz realiza una consulta a la base de datos y utiliza la información para construir un mapa para la visualización de la posición del usuario de la MS.

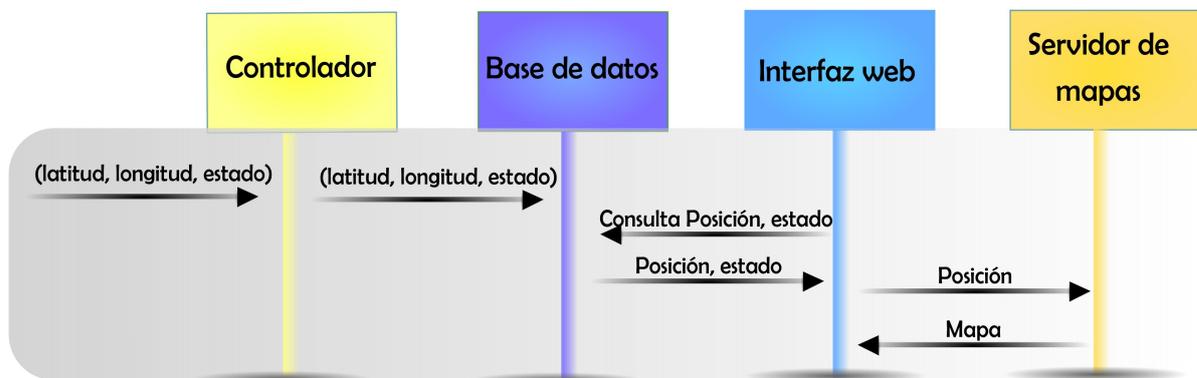


Fig. 31. Mensajes entre componentes - registro de una alerta. Fuente por los autores.

El administrador controla el sistema mediante la pagina web. Cuando el administrador realiza tareas relacionadas con los usuarios del sistema y las MS, lo hace a través de consultas de información a la base de datos. Cuando un administrador atiende el reporte de una alerta, el mensaje para cambio de estado de la MS se envía mediante el proceso que se presenta en la Fig. 32. El administrador revisa los reportes de alerta existentes en la base de datos y cuando considere que la alerta ya fue atendida en la ubicación del usuario, cambia el estado de alerta en la base de datos, de un estado de alerta a un estado de operación normal, posteriormente, cuando a la BS llega el mensaje con las nuevas coordenadas de la MS, la BS construye un mensaje con la información de estado actualizada para informar a la MS que la alerta ya ha sido atendida.

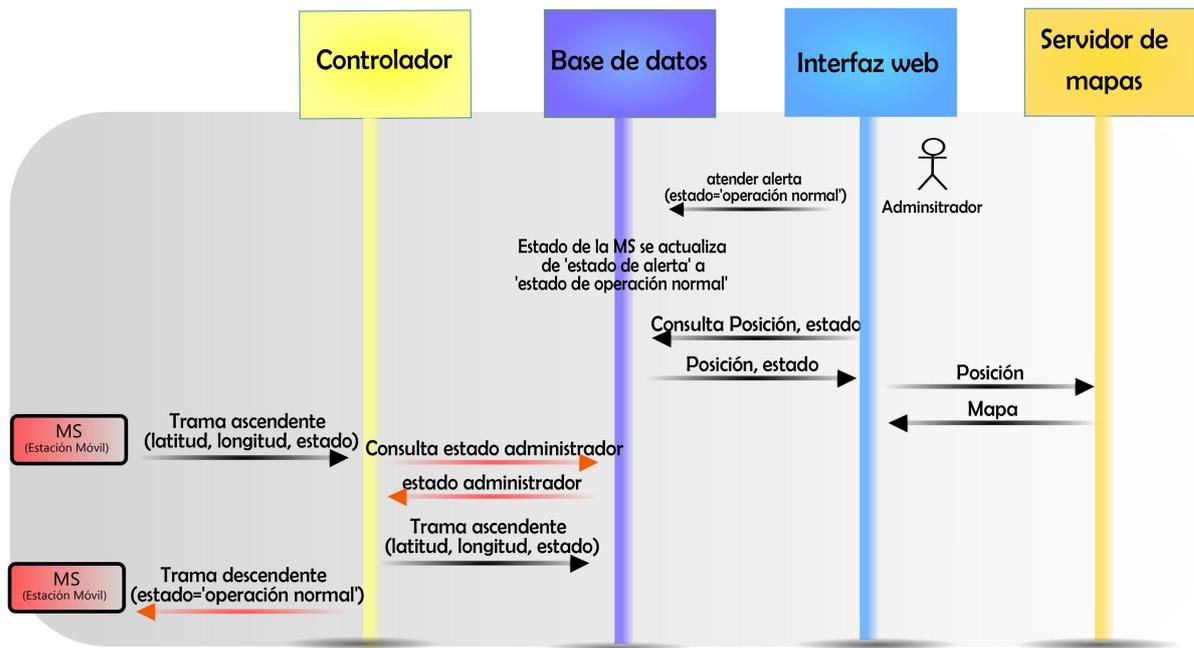


Fig. 32. Mensajes entre componentes de la BS - atención de una alerta desde la BS. Fuente por los autores.

CAPÍTULO 4

4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Mediante el modelo y el diseño del sistema se especifican las funciones que los módulos de la MS y la BS deben realizar para garantizar que el sistema funcione adecuadamente como un mecanismo para la gestión del riesgo en escenarios rurales. A continuación, se describe el proceso de construcción e implementación de la BS y la MS incluyendo la especificación de los materiales y herramientas utilizadas. Inicialmente, se presentan las consideraciones y características que establecieron para la elección de los elementos y diferentes dispositivos utilizados en la implementación del sistema.

4.1 CONSIDERACIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN

Las consideraciones en la implementación del sistema se establecen con el objetivo de facilitar la elección de los dispositivos para la construcción del sistema prototipo. Los dispositivos y/o materiales empleados en la construcción de los módulos que conforman a la MS y a la BS deben tener una adecuada relación de costo-eficiencia, la cual facilite la implementación del sistema en organizaciones públicas, sin la necesidad de una inversión de gran capital económico.

En la elección del controlador, luego de contrastar características de los dispositivos encontrados en el mercado, se escogió la tarjeta arduino nano como la mejor opción para desarrollar las tareas del controlador de la MS y las del controlador del lado del micro-controlador de la BS.

Otra consideración fue incorporar mapas que no dependieran de la conexión a Internet para la visualización de las estaciones móviles, debido a que algunas instituciones educativas rurales en el país no cuentan con servicio de Internet. También se incluyeron mapas de localización que emplean recursos *online* que pueden ser aprovechados por las instituciones con conexión a Internet.

Se consideró para la implementación del sistema que la MS empleara dispositivos con bajo consumo de energía debido a que la fuente de alimentación de la MS es limitada, por este motivo, se emplearon baterías recargables y LED indicadores difusos con bajo consumo de energía.

4.2 MATERIALES

A Continuación se presentan los dispositivos empleados para la construcción de la BS y la MS:

Componente	Dispositivos empleados
Módulo de Geolocalización	GPS NEO 6M
Controlador	Arduino nano V2.
Módulo de alertas	Tarjeta LoRa E32-433T30D, LED, Botón

Tabla 6. Dispositivos empleados para la construcción de la MS.

Componente	Dispositivos empleados
Base de datos	MySQL
Controlador	Tarjeta LoRa E32-433T30D, Arduino nano V2 y Programa Python.
Interfaz web	Programa Javascript, CSS, PHP, HTML.
Servidor de mapas	QGIS.

Tabla 7. Dispositivos empleados para la construcción de la BS.

4.2.1 Módulo GPS

Una de las principales funciones de la MS es encargarse de obtener las coordenadas de su posición geográfica para posteriormente enviarlas a la BS. Actualmente existen diferentes módulos que cumplen esta función. Por características que incluyen su costo, accesibilidad y compatibilidad con las tarjetas LoRa[®] y arduino, se utilizó un receptor GPS NEO 6M para obtener la posición geográfica, con las características presentadas en la Tabla 8. El dispositivo se presenta en la Fig. 33.

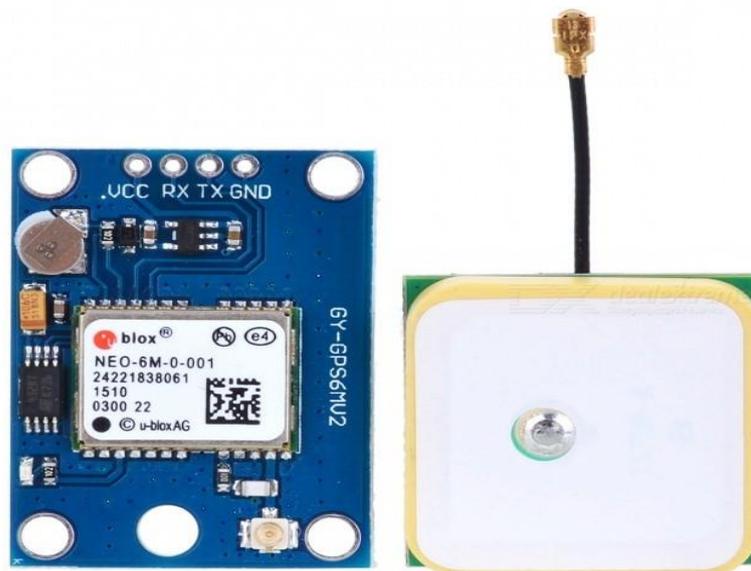


Fig. 33. Módulo GPS NEO 6M. Tomada de [30].

Características	Valor
Sensibilidad	-148 dBm a -165 dBm
Precisión	3 metros a una velocidad de 0.1 m/s
Arranque en frío	36 s
Arranque en caliente	1 s
Re-adquisición	<1 s
Consumo de energía rastreo	menor a 30 mA, alimentado a 3 V
Consumo de energía adquisición	40 mA
Dimensiones	30 mm x 20 mm x 11.4 mm
Peso	9 gr
Antena - Dimensiones	18.2 mm x 18.2 mm x 4 mm
Antena - Frecuencia central	1575 ± 3 MHz
Antena - Ancho de banda	mínimo 10 MHz
Antena - Impedancia	50 Ω
Antena - Polarización	polarización circular derecha
Alimentación	5 V ± 5%

Tabla 8. Características del módulo GPS NEO 6M. Tomada de [30].

4.2.2 Módulo de Transmisión

Para la transmisión inalámbrica de los datos se utilizó una tarjeta E32-433T30D de la empresa EBYTE presentada en Fig. 34, la cual se seleccionó debido a que la tarjeta implementa la tecnología LoRa[®] mediante el integrado de Semtech Sx1278 RF, a un bajo costo en comparación a otras que existen en el mercado.

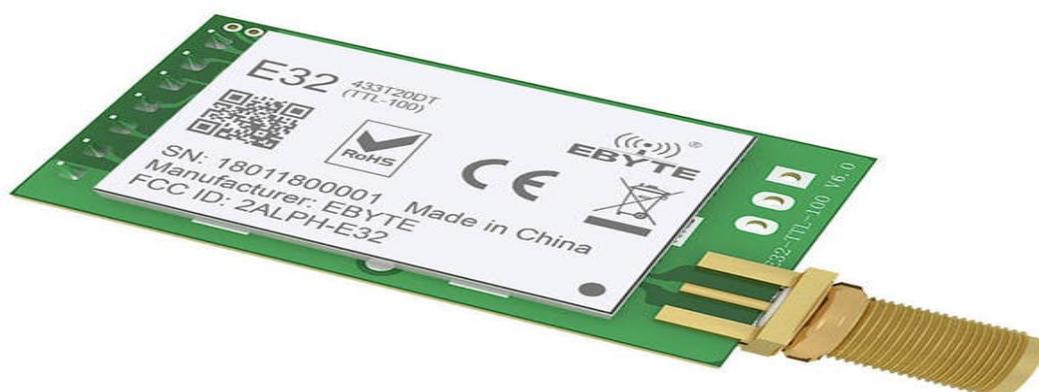


Fig. 34. Tarjeta E32-433T30D. Tomada de [31].

La tarjeta E32-433T30D es un módulo de puerto serie inalámbrico (UART⁵), que cuenta con una potencia de transmisión de hasta 30 dBm e incluye un par de antenas para utilizarlas según el tipo de aplicación. La Tabla 9 presenta sus características.

Características	Valor
Frecuencia de operación	433 MHz
Potencia de transmisión	desde 21 dBm hasta 30 dBm
Sensibilidad de recepción	-145 dBm a -148 dBm
Velocidad de transmisión de datos	desde 0.3 Kbps hasta 2.4 Kbps
Distancia de cobertura	hasta 8000 m
Tamaño	24 mm x 43 mm
Peso	8.1 g
Tipo de antena	SMA-K
Interfaz de comunicación	UART
Alimentación	desde 3.3 V hasta 5.2 V
Corriente en transmisión	mínimo 570 mA, máximo 670 mA
Corriente en recepción	mínimo 19 mA, máximo 22 mA
Corriente en reposo	mínimo 4 mA, máximo 5 mA

Tabla 9. Características generales de la tarjeta LoRa[®]. Tomada de [31].

La Fig. 35 presenta el diagrama de conexión de la tarjeta E32-433T30D. El diagrama de la izquierda representa un microcontrolador y el diagrama de la derecha representa a la tarjeta E32-433T30D, indicando la correcta conexión de los pines que se destinan para la comunicación con componentes externos ó microcontroladores.

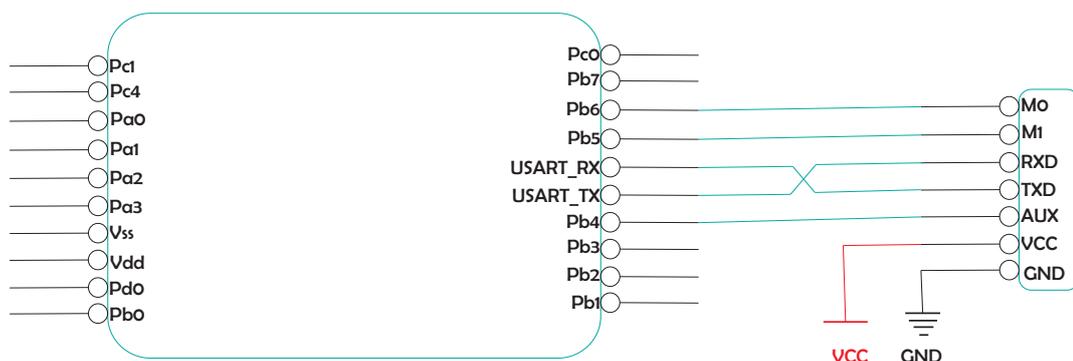


Fig. 35. Conexión de la tarjeta E32-433T30D. Tomada de [31].

En la Fig. 35 se muestra que se destinan siete pines para la configuración de la tarjeta E32-433T30D, los cuales son: el pin M0 y el pin M1, pines de entrada por medio de los cuales se puede seleccionar el modo de trabajo de la tarjeta E32-433T30D; el pin de

⁵UART significa Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Receptor/Transmisor Asíncrono Universal). Es una interfaz/protocolo de comunicación serie. El propósito principal de un UART es transmitir y recibir datos en serie.

entrada RXD, un pin TTL⁶ UART desde el cual la tarjeta recibe la información enviada desde el microcontrolador de manera serial; el pin de salida TXD, un pin TTL UART que envía información hacia el microcontrolador; el pin de salida AUX, el cual le indica al controlador el estado de trabajo de la tarjeta E32-433T30D; y finalmente, los pines VCC y GND que se conectan a la alimentación (3 V - 5.2 V) y al GND del microcontrolador, respectivamente. La tarjeta E32-433T30D tiene cuatro modos de trabajo:

- Modo de operación normal: cuando el pin M0 y el pin M1 se encuentran en 0, tanto en UART como en el canal inalámbrico están abiertas las comunicaciones. El UART es el encargado de leer datos, generar y gestionar interrupciones, enviar datos y gestionar los tiempos de bit.
- Modo de operación despierto: conocido como estado *wake-up*, cuando el pin M0 se encuentra en 1 y el pin M1 en 0, su funcionamiento es igual al modo de operación normal e incluye el uso de un preámbulo ya establecido para las comunicaciones.
- Modo de operación ahorro de energía: cuando el pin M0 esta en 0 y el pin M1 en 1, el UART se deshabilita, mientras que el canal inalámbrico se enciende cuando existan datos para recibir.
- Modo de operación dormido: conocido como estado *sleep*, cuando tanto el pin M0 como el pin M1 se encuentran en 1, en donde el dispositivo se encuentra en reposo o bajo consumo, y la tarjeta no realiza ninguna acción hasta el momento en que se le indique hacerlo.

La tarjeta E32-433T30D incluye dos tipos de antenas diferentes, la primera es una antena de 10 cm de longitud utilizada en la MS y la segunda es una antena de 2.7 m de longitud empleada en la BS. Para la MS se hace uso de una antena pequeña, la cual permite la portabilidad y movilidad del dispositivo, la antena cuenta con 5 dBi de ganancia y se presenta en la Fig. 36.

⁶Lógica Transistor a Transistor (TTL, *Transistor-Transistor Logic*) se refiere al nivel de voltaje de referencia. Muchos módulos conversores "USB a TTL" del mercado son en realidad módulos de "puerto serie de nivel USB a TTL". Esta señal '0' corresponde a 0 V y '1' corresponde a 3.3 V o 5 V. Compatible con los niveles de Entrada/Salida (IO, *Input/Output*) de un microordenador de un solo chip.



Fig. 36. Antena de la MS. Tomada de [32].

En la Fig. 37 se presenta la antena utilizada en la BS, tiene una ganancia de 5 dBi, además, cuenta con un cable de 2.7 m de longitud, el cual permite ubicar la BS a una mayor altura.



Fig. 37. Antena de la BS. Tomada de [32].

4.2.3 Módulo Controlador

Para implementar el controlador de la MS y de la BS se utilizaron dos tarjetas microcontroladas arduino nano versión 2, debido a su bajo costo y su facilidad de adquisición. La tarjeta se presenta en la Fig. 38 y sus características en la Tabla 10, .

Características	Valor
Microcontrolador	Atmel ATmega328
Voltaje de operación	5 V
Alimentación	desde 3.7 V hasta 12 V
Pines digitales	14
Pines analógicos	8
Canales PWM	6
Corriente por pin	40 mA
memoria flash	32 Kb
SRAM	2 Kb
EEPROM	1 Kb
Frecuencia del reloj	16 MHz
Tamaño	45 mm x 18mm
Peso	5 g

Tabla 10. Características generales de la tarjeta Arduino nano V2. Tomada de [33].

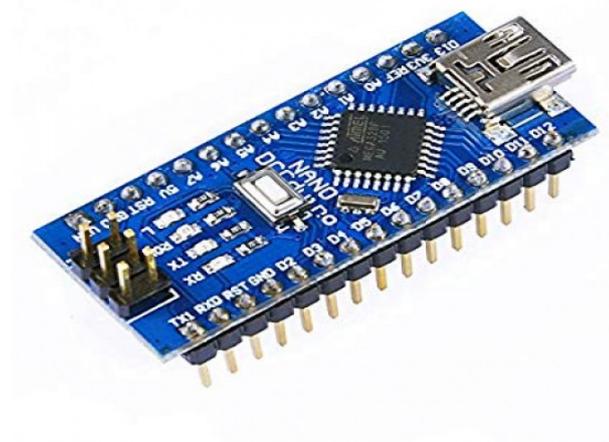


Fig. 38. Arduino nano V2. Tomada de [33].

Además en la elaboración del sistema se emplearon los siguientes elementos:

- Resistencias.
- Diodo emisor de luz.
- Pulsadores o botones.
- Cables.

4.3 TRAMAS DE COMUNICACIÓN

En la comunicación del sistema se presentan dos tipos de tramas, una para el enlace descendente (*dowlink*) y la otra para el enlace de ascendente (*uplink*). Se emplearon dos tramas diferentes debido a que la información enviada en el enlace descendente contiene menos datos que en el enlace ascendente.

4.3.1 Trama en el Enlace Ascendente

La trama contiene 7 campos, los cuales permiten la comunicación entre la MS y la BS. Los campos son presentados en la Fig. 39.

Contador	ID	IdVariable	Alerta	Valor	Longitud	Latitud
-----------------	-----------	-------------------	---------------	--------------	-----------------	----------------

Fig. 39. Trama para el enlace ascendente. Fuente por los autores.

A continuación se describe los campos de la trama para el enlace ascendente.

- Contador: permite llevar un conteo de los mensajes transmitidos.
- ID: número de identificación para cada MS en el sistema.
- IdVariable: identificador de variable, se usa para la distinción entre sensores o servicios. El campo se diseñó para brindar escalabilidad al sistema.
- Alerta: contiene el valor del estado del usuario, ya sea, en estado de alerta o estado de operación normal. También puede ser usado para especificar datos que sean identificados con el campo IdVariable.
- Valor: es utilizada como una variable de identificación de los mensajes válidos en el sistema, debido a los vectores basura que se generan en la BS. Mediante el valor de este campo el microcontrolador del lado del servidor distinguirá los mensajes provenientes de la MS.
- Longitud y latitud: contienen la posición geográfica del usuario.

4.3.2 Trama en el Enlace Descendente

Esta comprende por tres campos presentados en la Fig. 40, para la comunicación desde la BS hacia la MS.

Contador	ID	Alerta
-----------------	-----------	---------------

Fig. 40. Trama para el enlace descendente. Fuente por los autores.

A continuación se presenta la descripción de los campos:

- Contador: permite llevar el conteo del número de mensajes.
- ID: contiene el identificador de la MS.
- Alerta: contiene la información del estado del usuario enviado por el administrador del sistema.

4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN MÓVIL

La MS como se ha mencionado, es portada por un usuario y es la encargada de obtener la ubicación geográfica del mismo, como también de estar indicando a la BS el estado en que se encuentra dicho usuario. la Fig. 41 presenta el diagrama circuital de la MS.

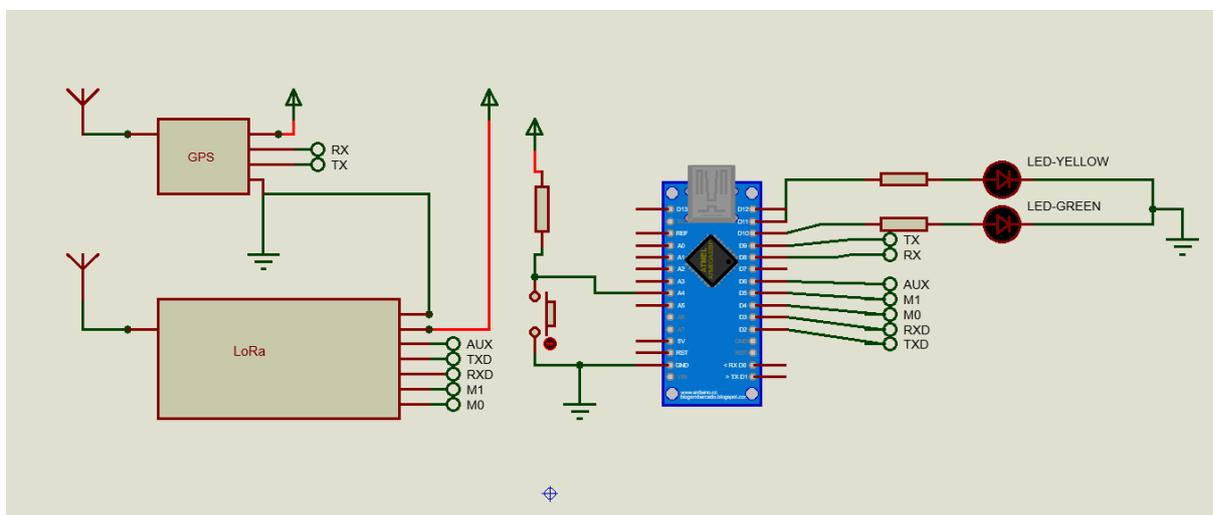


Fig. 41. Circuito de la MS. Fuente por los autores.

La Fig. 41 presenta la conexión de cada módulo que compone la MS. LoRa[®] es la tecnología empleada para la transmisión y recepción de la información, por este motivo se observa un nodo final LoRa directamente conectado a la MS.

El controlador de la MS se encarga de supervisar la información proveniente del módulo GPS y la información proveniente de la tarjeta LoRa[®]. Debido a que la tarjeta arduino nano cuenta con la capacidad de manejar un solo puerto para supervisar dos entradas de información, cada puerto serial se trató como una variable independiente, dando prioridad a la lectura del puerto serial de la tarjeta LoRa[®]. El controlador de la MS supervisa la información enviada desde la BS y define periodos de tiempo a través de un contador para solicitar las coordenadas geográficas al módulo GPS. Con las coordenadas, el controlador construye la trama de datos ascendente y la trasmite al nodo final LoRa[®] para ser enviada hacia la BS. El proceso se presenta en el diagrama de secuencia en la Fig. 42.

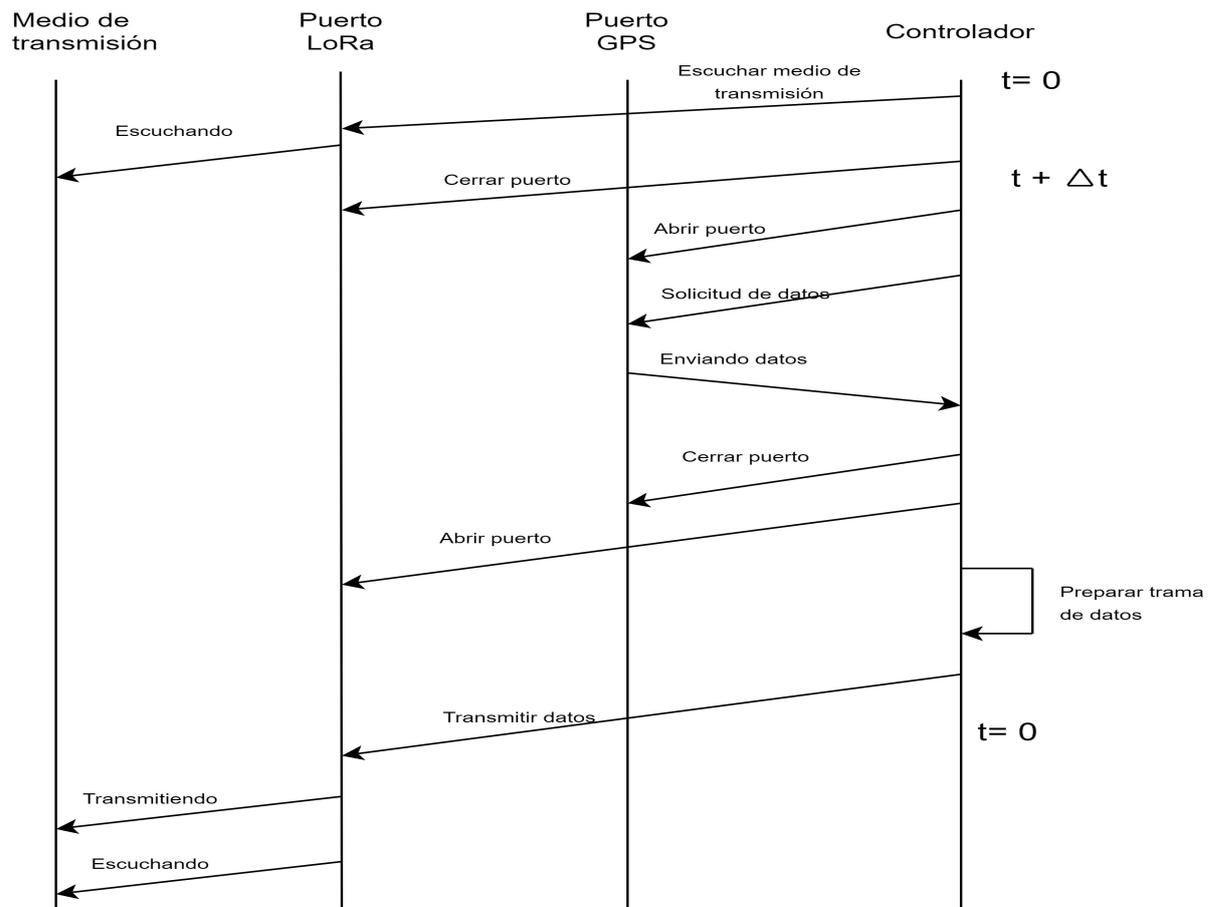


Fig. 42. Diagrama de secuencias de la operación de la MS. Fuente por los autores.

La MS también incorpora la capacidad para reportar una alerta, en este caso el controlador de la MS recibe el reporte de la alerta a través de un pin independiente conectado directamente a la tarjeta arduino, por lo que no interfiere con la función de supervisión presentada en la Fig. 42. Cuando se reporta una alerta en el pulsador conectado a la tarjeta arduino, la frecuencia de envío de coordenadas hacia la BS se aumenta, se actualiza el estado del usuario en los respectivos LED y la MS envía una trama hacia la BS con el fin de dar a conocer el estado de alerta. En la Fig. 43 se presenta el diagrama de secuencia para el reporte de una alerta y la respuesta del controlador.

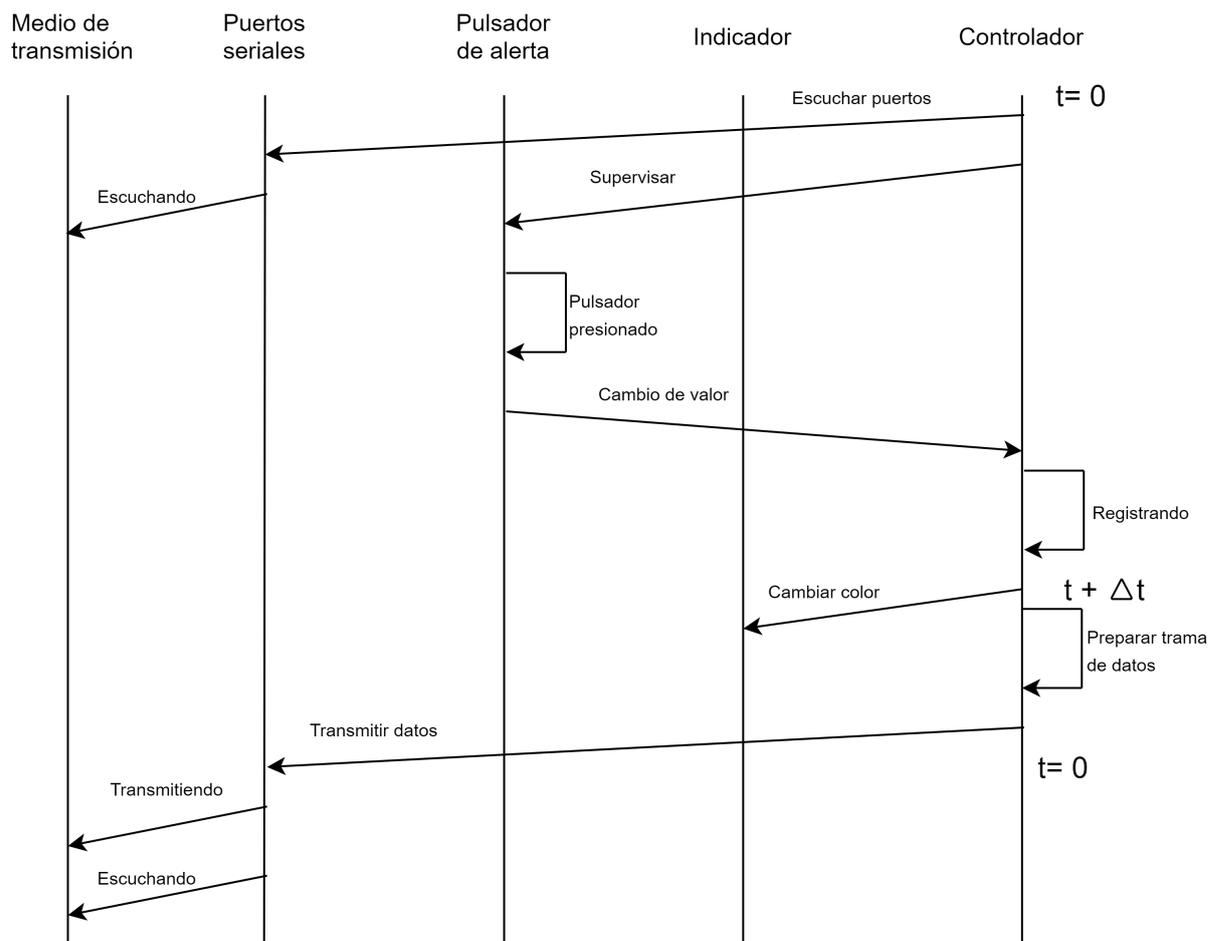


Fig. 43. Diagrama de operación de la MS en una alerta. Fuente por los autores.

Un caso de uso para la MS se presenta cuando desde la BS se envía una trama de enlace descendente, entonces el controlador de la MS se encarga de supervisar y procesar la información enviada desde el nodo final LoRa[®]. En la Fig. 44 se presenta el diagrama de secuencia para el caso en el que se recibe un mensaje desde la BS.

La BS transmite una trama de enlace descendente hacia la MS, la cual lee el mensaje y verifica si el destino corresponde con su identificador, de ser así, lo procesa o en caso contrario ignora el mensaje. La MS que coincide con el identificador del mensaje, lee el estado del usuario y actualiza tanto los indicadores LED como la frecuencia con la que envía las coordenadas geográficas hacia la BS.

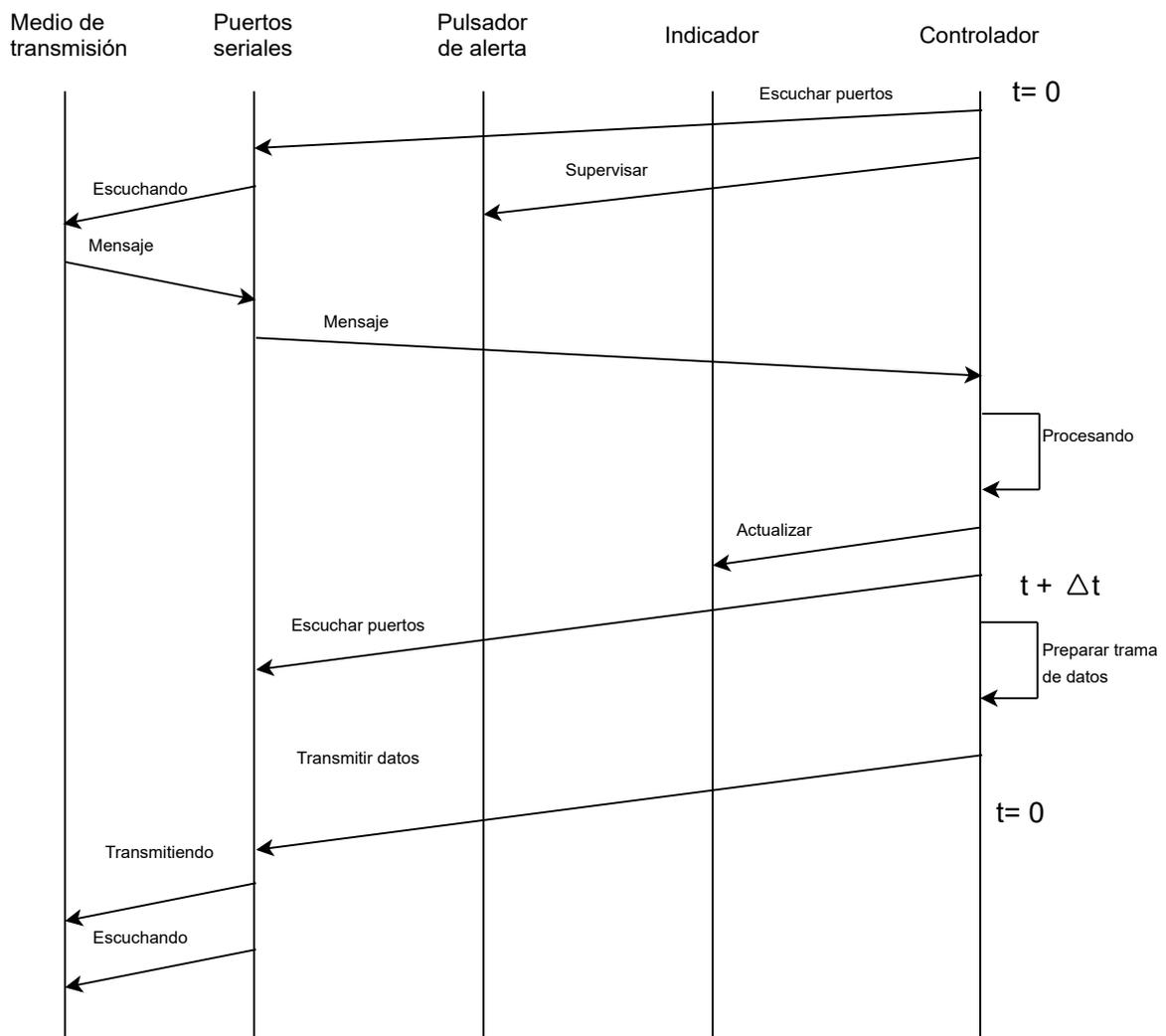


Fig. 44. Diagrama de secuencia de la MS cuando recibe un mensaje. Fuente por los autores.

4.5 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN BASE

Los componentes que integran a la BS son: un controlador, un servidor de mapas, una interfaz web y una base de datos. El servidor de mapas, la base de datos y la interfaz web se encuentran almacenados en un equipo de cómputo, además, el controlador de la BS se divide en un controlador del lado del microcontrolador y un controlador del lado del servidor, lo cual permite equilibrar la carga de procesamiento y evitar una sobrecarga de trabajo en la tarjeta arduino nano de la BS. El circuito que compone el controlador del lado del microcontrolador se presenta en la Fig. 45. El circuito está conformado por una tarjeta arduino nano y una tarjeta LoRa[®] conectadas a un equipo de cómputo y gran parte del procesamiento de los datos se realiza en el controlador del lado del servidor. Al controlador del lado del microcontrolador se le asignan tareas que no requieren gran procesamiento. La única tarea del módulo en la BS es la de implementar la interfaz inalámbrica LoRa[®].

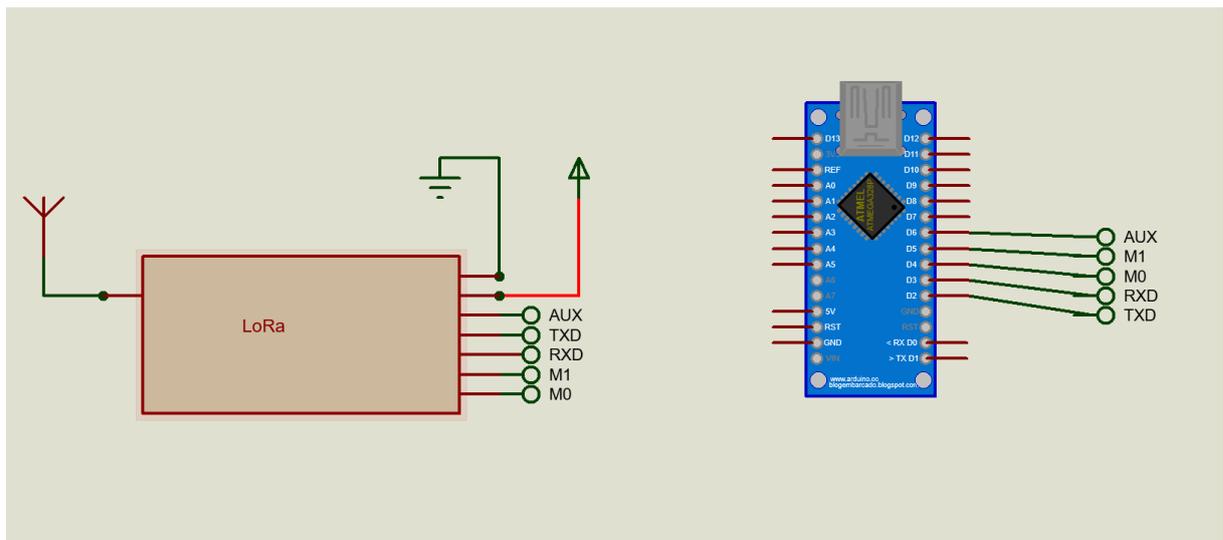


Fig. 45. Circuito de la BS. Fuente por los autores.

La comunicación entre el controlador del lado del servidor y el controlador del lado del microcontrolador se realiza a través de un puerto serial. A continuación, en la Fig. 46 se presenta el proceso para el intercambio de mensajes entre los controladores de la BS:

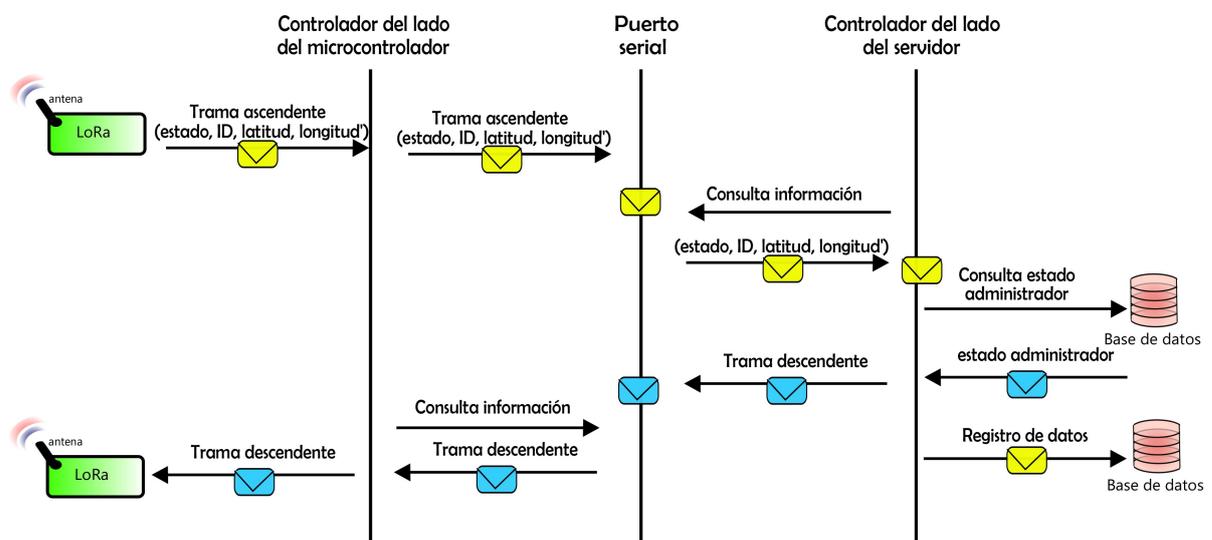


Fig. 46. Intercambio de mensajes entre controladores de la BS. Fuente por los autores.

El controlador del lado del microcontrolador es el encargado de transmitir y recibir datos a través de la tarjeta LoRa[®] y cuando recibe la trama ascendente mediante la tarjeta LoRa[®], procede a desempaquetar el mensaje y lo escribe como un vector en el puerto serial. El puerto serial almacena la información temporalmente mientras el controlador del lado del microcontrolador escucha el mensaje y guarda la información en la base de datos. La trama de enlace descendente es construida por el controlador del lado del servidor, y es enviada como respuesta a la recepción de la trama ascendente. La respuesta

sera entregada por parte del controlador de lado del microcontrolador después de realizar el encapsulamiento de la trama, agregando los campos de identificador de la MS y de contador de mensajes. Los procesos del controlador del lado del microcontrolador son presentados en la Fig. 47.

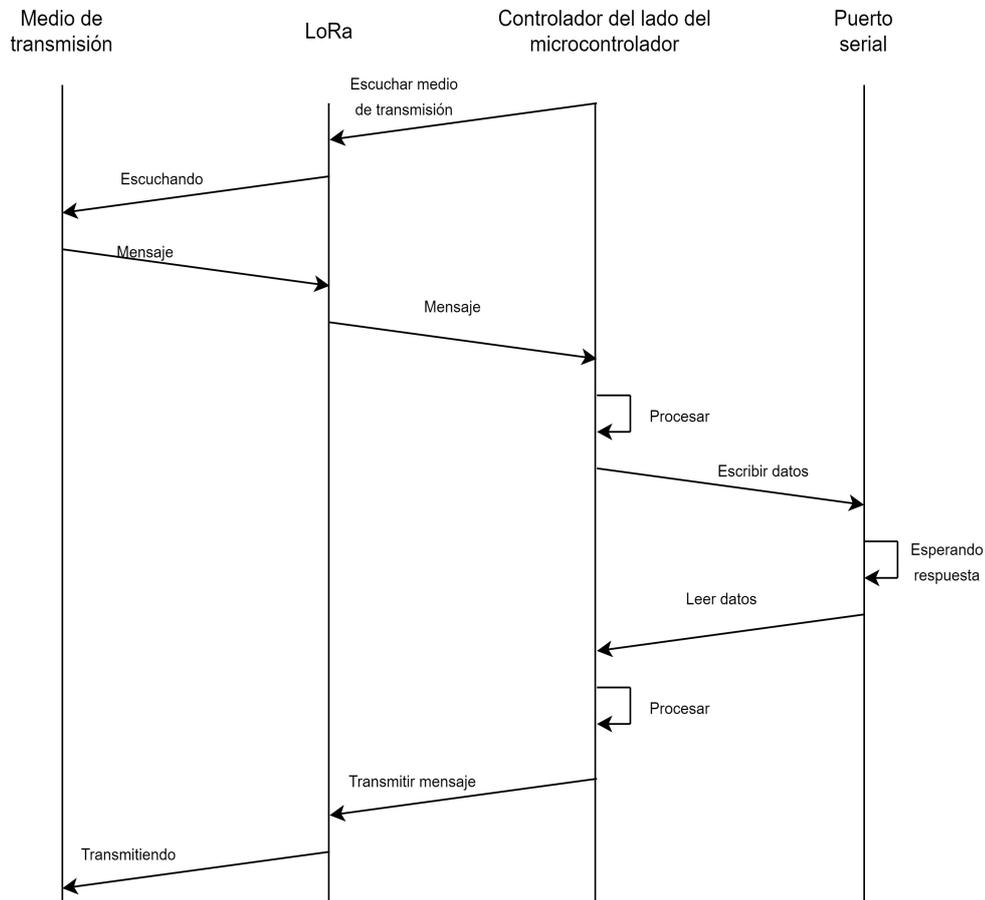


Fig. 47. Diagrama secuencia del controlador del lado del microcontrolador. Fuente por los autores.

El controlador del lado del servidor escucha al puerto serial y recibe los mensajes enviados desde el controlador del lado del microcontrolador. El controlador del lado del servidor recibe información y realiza un filtrado con el fin de eliminar datos basura que se generan en el proceso de lectura del puerto serial, obteniendo la carga útil del mensaje. El controlador del lado del servidor se conecta a la base de datos para realizar consultas relacionadas con el estado de alerta o de operación normal, con el fin de enviarlo a la MS y registra los datos obtenidos del puerto serial. Los procesos realizados por el controlador del lado del servidor se presentan en la Fig. 48.

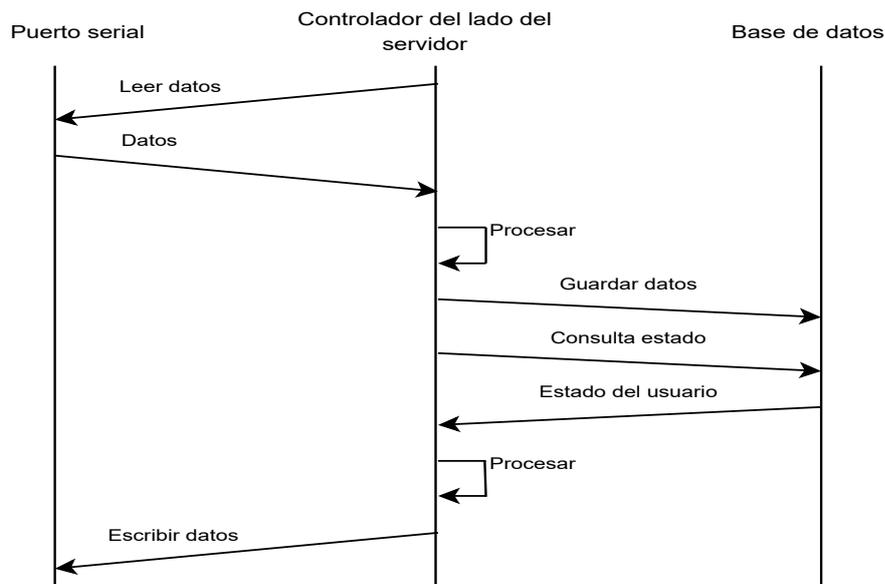


Fig. 48. Diagrama de secuencia del controlador del lado del servidor. Fuente por los autores.

4.6 BASE DE DATOS

Uno de los componentes de la BS es una base de datos conformada por 5 tablas, las cuales se encargan de almacenar la información del sistema. A continuación se presentan las tablas que conforman a la base de datos:

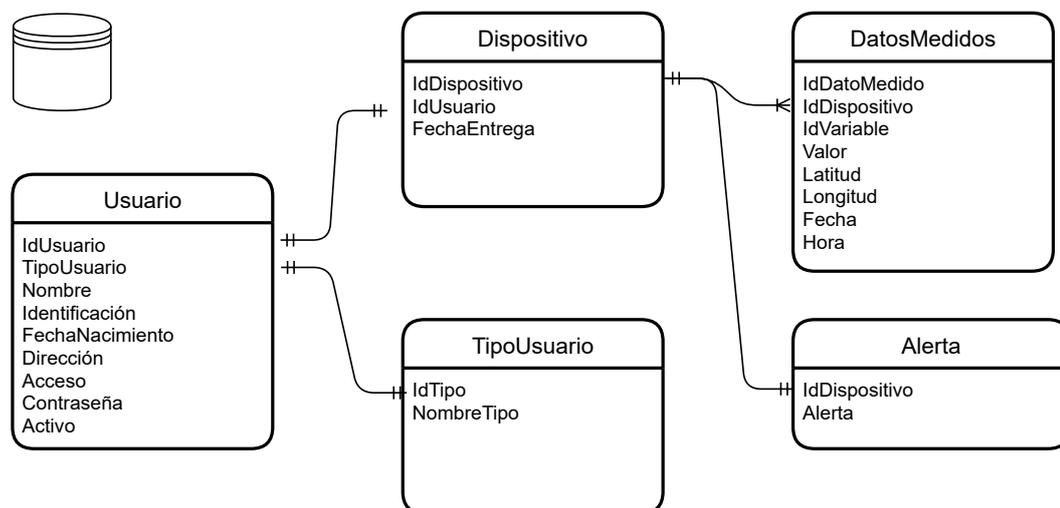


Fig. 49. Diagrama de base de datos. Fuente por los autores.

A continuación se describen las tablas presentadas en la Fig. 49:

- Usuario: Guarda la información de los usuarios registrados en el sistema.

- IdUsuario: número único para cada usuario.
 - TipoUsuario: valor que especifica el tipo de usuario (administrador ó estudiante)
 - Nombre: nombre del usuario registrado.
 - Identificación: número de identificación del usuario, ya sea cédula de ciudadanía o número de tarjeta de identidad.
 - FechaNacimiento: fecha de nacimiento del usuario.
 - Dirección: Nomenclatura del lugar donde reside la persona.
 - Acceso: nombre del usuario para acceso a la interfaz web.
 - Contraseña: contraseña o clave de acceso a la interfaz web.
 - Activo: Campo para indicar si un usuario se encuentra activo en el sistema. Si el campo indica un estado inactivo, el usuario registrado no podrá acceder a la interfaz web.
- Dispositivo: permite controlar los equipos asignados a cada usuario.
 - IdDispositivo: número único de identificación para cada MS en el sistema.
 - FechaEntrega: fecha en la que fue asignada una MS a un determinado usuario.
 - TipoUsuario: contiene un valor para identificar el tipo de usuario en el sistema (administrador ó estudiante). Este campo permite distinguir nuevos tipos de usuarios y asignarles diferentes permisos en el sistema.
 - IdTipo: número único asignado al tipo de usuario.
 - NombreTipo: nombre del tipo del usuario.
 - DatosMedidos: registro de los valores de posición de la MS.
 - IdDatoMedido: número único para cada registro de posición correspondiente a la coordenada geográfica que se almacena en la base de datos.
 - IdVariable: valor de identificación de una variable que puede especificar un tipo de "alerta".
 - Valor: valor de la variable, en este caso un valor de 0 indica un estado de operación normal y un valor de 1 indica que el usuario asociado está en estado de alerta.
 - Latitud: contiene la latitud de la posición geográfica de la MS.
 - Longitud: contiene la longitud de la posición geográfica de la MS.
 - Fecha: fecha de registro de la información en la base de datos.
 - Hora: hora de registro de la información en la base de datos.
 - Alerta: es una tabla auxiliar que tiene como objetivo evitar registros erróneos en el estado de alerta o de operación normal de un usuario.

4.7 INTERFAZ WEB

La interfaz web se desarrollo empleando los recursos del servidor web Apache, sobre un sistema operativo Windows 10. Para la instalación del servidor web se utilizó la aplicación XAMPP Control Panel V 3.2.2. A continuación, en la Fig. 50 se presenta la interfaz de inicio de la página web:

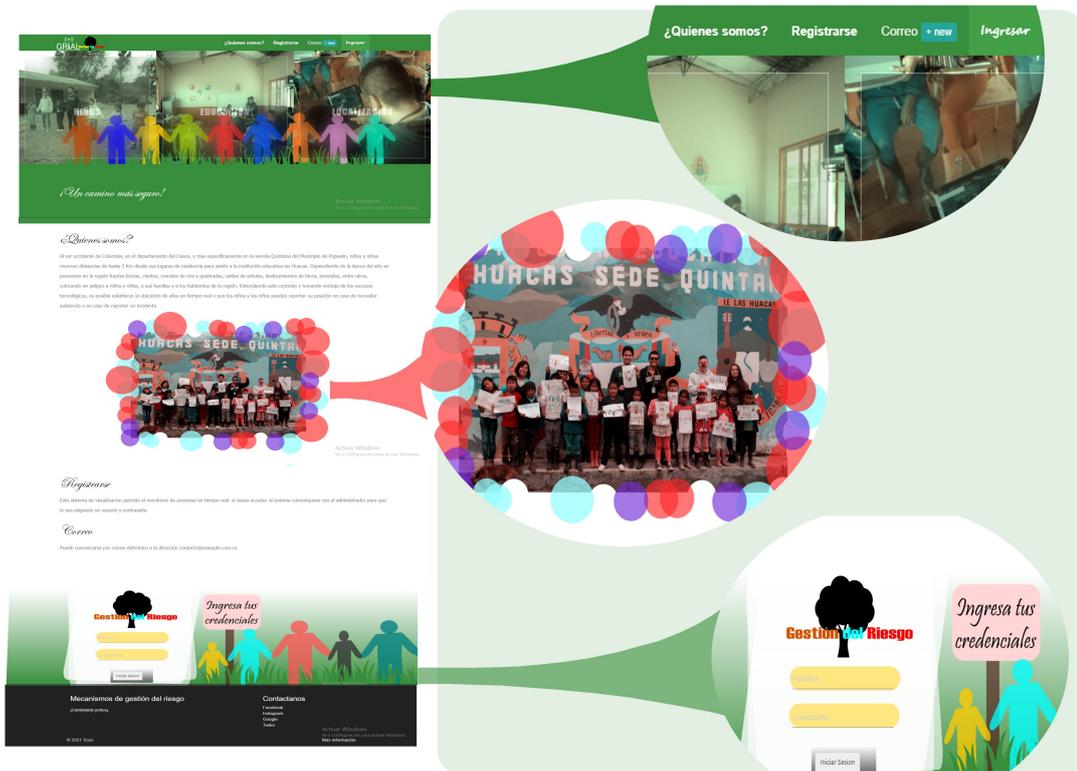


Fig. 50. Pagina web - interfaz de inicio. Fuente por los autores.

El *frontend* esta implementado en los lenguajes: JavaScript, HTML y CSS, mientras que el *backend* esta implementado en código PHP. Se construyó una interfaz de administrador que integra una interfaz para el ingreso de credenciales de usuario, por lo tanto, para acceder a los servicios de la página web se deben emplear las correspondientes credenciales de acceso: nombre de usuario y contraseña

El administrador del sistema puede: registrar usuarios, modificar usuarios, registrar MS, modificar MS, registrar asignación de MS a usuarios, realizar gestión de alertas (crear y atender) y visualizar la posición geográfica de los usuarios en un mapa.

4.7.1 Visualización de la Posición Geográfica

La interfaz web que emplea el administrador del sistema ofrece la posibilidad de escoger entre dos tipos de mapas para la visualización de la posición de los usuarios. Un mapa es en línea (*Online*) y el otro es un mapa que no requiere conexión a Internet (*Offline*). Los dos tipos de mapas se presentan a continuación:

- *Online*: permite visualizar los mapas haciendo uso de los servicios de la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) de Google

maps.

- *Offline*: permite la visualización de los mapas geográficos sin acceso a Internet y esta implementado mediante la API de Leaflet.

4.8 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

La Fig. 51 presenta los componentes que integran el sistema. La MS se conforma por: un módulo GPS el cual recibe señales de los satélites, las procesa y proporciona las coordenadas de la ubicación geográfica; una tarjeta arduino para el procesamiento de la información, la cual también cuenta con un botón para reportar una alerta; dos Diodos Emisores de Luz (LED, *Light Emitting Diode*), uno con luz verde el cual le indica al usuario que se encuentra en estado de operación normal y otro con luz naranja el cual le indica al usuario que se encuentra en estado de alerta⁷; y finalmente, una tarjeta LoRa[®] para la transmisión de la información hacia la BS.

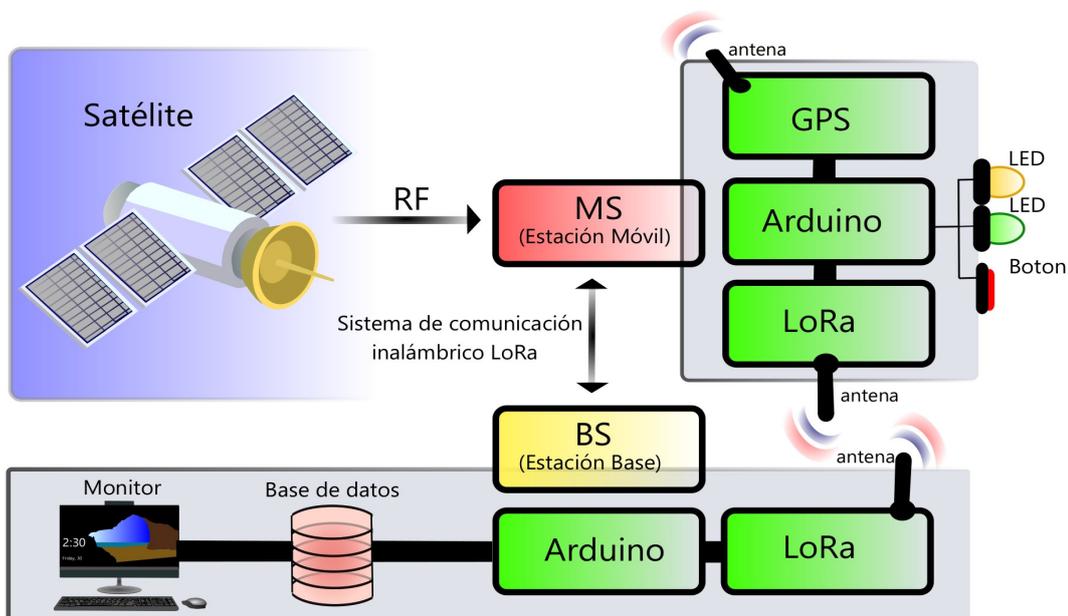


Fig. 51. Componentes del sistema. Fuente por los autores.

El sistema de comunicación inalámbrico LoRa[®] se encarga del transporte de la información entre la MS y la BS. Este sistema de comunicación se puede configurar en función de la velocidad de transmisión de datos y la cobertura deseada, estableciendo de esta manera un enlace radio para el transporte de información bidireccional confiable entre la MS y la BS.

La BS se encarga de recibir la posición geográfica enviada desde la MS e ilustrarla en una interfaz gráfica en tiempo real. Si un usuario reporta una alerta, esta se registrará

⁷El estado de alerta representa a un usuario del sistema en una situación que amenaza su integridad o su comunidad.

en la página de administración del sistema, desde la cual, el administrador podrá atender la emergencia. La BS emplea: un módulo LoRa[®] para recibir y transmitir información hacia la MS; una tarjeta arduino para procesar la información; una base de datos para almacenar la información; y un monitor para que el administrador pueda visualizar la posición y el estado de operación normal o de alerta de la MS y atenderla en el caso de ser requerido.

CAPÍTULO 5

5 PRUEBAS Y RESULTADOS

Debido a la problemática de salud pública que se presenta a nivel mundial a causa de la pandemia de coronavirus (COVID-19), con el fin de reducir el contacto social y la probabilidad de contagio de sus habitantes, las medidas y resultados para el sistema de localización y comunicación de datos se realizaron en el municipio El Tambo (Cauca) y no en la vereda Quintana donde se encuentra la Institución Educativa las Huacas.

5.1 PROCEDIMIENTO

Las pruebas realizadas sobre el sistema tienen como principal objetivo evaluar su desempeño, por este motivo, inicialmente se realizó una prueba de funcionalidad del sistema, la cual, consistió en recorridos por dos de las veredas del municipio El Tambo (Cauca) que se caracterizan por su geografía montañosa. En las pruebas, la BS se ubicó en un sitio dentro de la cabecera del municipio y en la interfaz web del sistema se observó la posición en tiempo real de la MS. También se realizaron reportes de alertas y se atendieron desde la interfaz web del administrador.

Las pruebas realizadas con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema, consisten en transmisiones periódicas de paquetes con las coordenadas geográficas del usuario. Los paquetes fueron enviados desde la MS hacia la BS, desde diferentes lugares dentro de la zona de cobertura. La BS se ubico en un lugar estratégico en el municipio de El Tambo. Inicialmente, para ubicar a la MS se escogieron puntos geográficos a distancias específicas con referencia a la posición de la BS, luego, desde cada posición se transmitieron datos desde la MS hacia la BS, obteniendo al final de cada prueba los paquetes que eran recibidos.

Se tuvieron en cuenta las coordenadas geográficas del último lugar del que se recibió información, ya que, a partir de esta posición se da una pérdida total de paquetes, lo cual permite identificar el área de cobertura. A la distancia desde la BS hasta el perímetro del área de cobertura del sistema, se asocia un valor de sensibilidad del dispositivo y se adapta un modelo de propagación, para estimar la potencia recibida, el valor de la SNR, y asociar este último valor a la BER obtenida en los diferentes puntos de medida.

Posteriormente, se realizaron simulaciones de cobertura de la red de telecomunicaciones en Radio Mobile y Sigfox *Coverage Tool* de QGIS ⁸, con el objetivo de estimar la potencia de recepción deseada en cada posición y obtener gráficas que relacionen la BER con la SNR para cada velocidad de transmisión de datos empleada. Se realizaron simulaciones de

⁸Herramienta prototipo software de estimación de cobertura radioeléctrica para la planificación de una red IoT [34].

cobertura utilizando la herramienta Sigfox *Coverage Tool* de QGIS, desde la posición de la BS en El Tambo, y desde la escuela rural Institución Educativa Las Huacas - Sede Quintana, ubicada en el corregimiento Quintana en la zona rural del municipio de Popayán.

Para evaluar la exactitud de la posición del sistema, se realizó un recorrido en el Tambo y se comparó las diferencia entre las posiciones que se ilustraron en la interfaz web con las posiciones verdaderas.

Con el fin de estimar el tiempo de duración de la batería de la MS se realizaron las mediciones de consumo de corriente eléctrica en sus diferentes estados de funcionamiento.

5.2 PRUEBAS

5.2.1 Plan de Pruebas

Se define el siguiente plan de pruebas para el sistema:

A) Pruebas de funcionalidad.

- Pruebas sobre el enlace.
 - Realizar un recorrido con la MS a través de la vereda Pepital, con el objetivo de verificar que la posición de la MS se ilustra adecuadamente en el mapa de la página web.
 - Crear alertas desde la página web de la BS hacia la MS, con el objetivo de verificar que la MS recibe y procesa correctamente la información enviada.
 - Reportar alertas a través de la MS desde diferentes posiciones dentro de la zona de cobertura, con el objetivo de verificar que las alertas se ilustran y registran adecuadamente en la página web.
 - Atender las alertas registradas desde la interfaz web, con el objetivo de determinar que la MS cambia el estado de alerta a un estado normal.
- Pruebas sobre la Base de Datos.
 - Acceder a interfaz de "administrador de la página web" desde la interfaz de "login", empleando las credenciales definidas en la creación del sistema y credenciales incorrectas, con el objetivo de verificar que la página web controla el acceso siendo coherente con la información registrada en la base de datos.
 - Realizar consultas para registrar y visualizar información relacionada con dispositivos y usuarios desde la página web, con el objetivo de determinar que los datos visualizados corresponden con los requeridos por el administrador del sistema.

B) Pruebas de desempeño.

- Pruebas servicio de localización.

- Realizar un recorrido con la MS en la cabecera municipal del municipio El Tambo, con el fin de estimar la exactitud de la posición mostrada en la página web del sistema respecto a la posición real.
- Pruebas sobre el enlace.
 - Realizar tres recorridos con la MS sobre la carretera que comunica al municipio de El Tambo con el municipio de Popayán, ruta que se presenta en la Fig. 52.

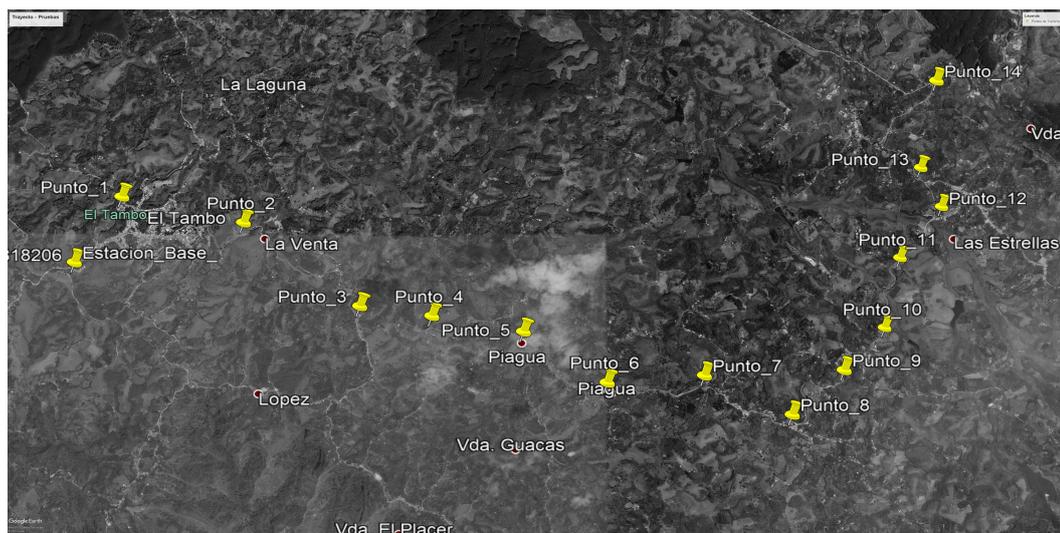


Fig. 52. Ruta recorrida por la MS. Tomado de Google Earth.

Cada recorrido se realiza sobre la misma ruta a una velocidad de transmisión de datos específica. Se configuraron velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps, transmitiendo desde 14 posiciones diferentes 500 paquetes hacia la estación base, con el objetivo de determinar el número de paquetes recibidos en la comunicación y con ello estimar la PER.

- Pruebas sobre el dispositivo.
 - Realizar medidas del consumo de corriente eléctrica de la MS para sus diferentes estados de funcionamiento, con el objetivo de estimar el tiempo de duración de la batería del dispositivo.

5.2.2 Pruebas de Funcionalidad del Sistema

Las primeras pruebas tienen como objetivo observar la funcionalidad del sistema, evaluar la exactitud de posición de la MS ilustrada en la interfaz web, evaluar el proceso de gestión de alertas y finalmente, evaluar que el enlace inalámbrico LoRa[®] tenga un alcance adecuado para la aplicación.

5.2.2.1 Pruebas sobre el enlace

A continuación se presenta en Fig. 53 el recorrido de la estación MS por la vereda Pepital en el municipio El Tambo (Cauca):

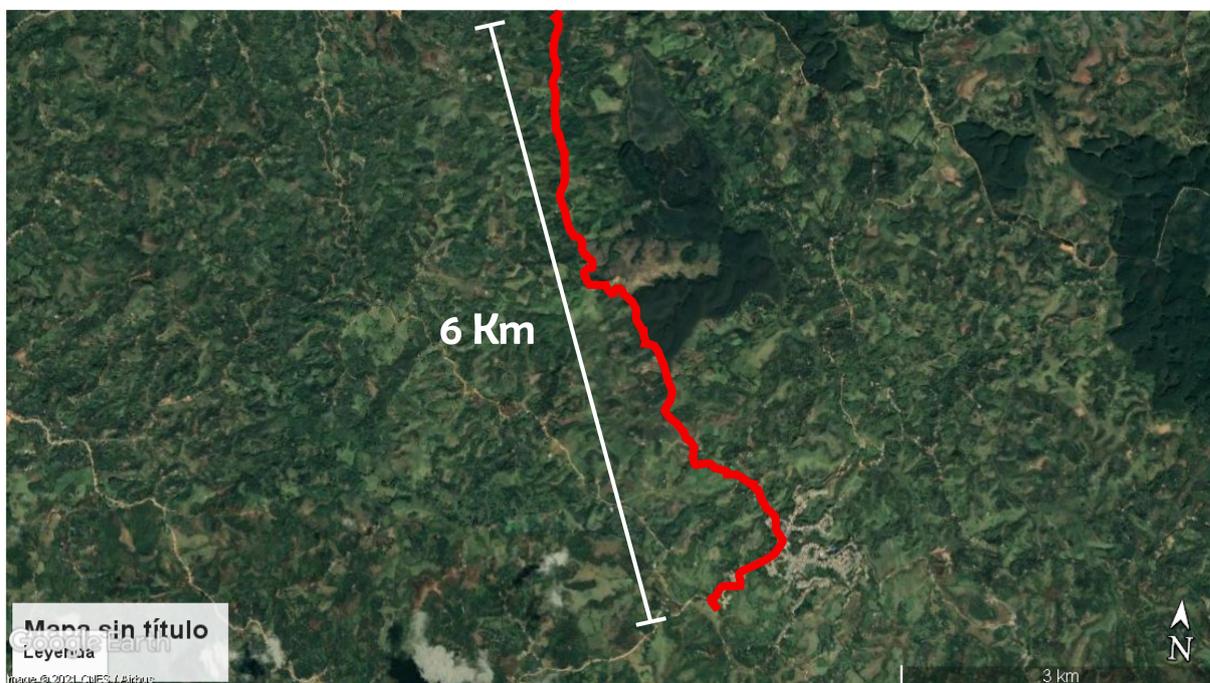


Fig. 53. Trayecto recorrido por la MS - Prueba de funcionalidad. Tomado de Google Earth.

En esta prueba la BS se ubicó en el lugar denominado "El obelisco" en el municipio El Tambo (Cauca). El sitio se escogió por tener una altura geográfica predominante. La MS recorrió la ruta que corresponde a la vereda Pepital, la cual, se resalta de color rojo en la Fig. 53. Desde determinadas posiciones en el recorrido se hicieron reportes de alertas y se atendieron a través de la página web.

La posición se envió desde la MS y fue recibida por la BS en tiempo real, esto permitió realizar un seguimiento de la posición de la MS, a lo que se denomina servicio de localización de la MS. La posición de la MS que se ilustró en el mapa de la página web correspondió con el recorrido realizado, como se presenta en la Fig. 54, el recorrido de la MS se realizó en moto hasta una posición de aproximadamente 6 Km de distancia a la BS a una velocidad moderada, y desde este punto se procedió a regresar por la misma ruta, apagando la MS en el trayecto de regreso y encendiéndola al llegar de nuevo a la cabecera municipal. En el camino de regreso se perdió la señal de la MS durante el tiempo que la MS estuvo apagada, pudiendo observar cambios en la ruta de la MS trazada en la página web, desde la posición en la que se perdió la señal de la MS hasta donde nuevamente se conectó con la BS. El trazado une las dos posiciones con una línea recta.

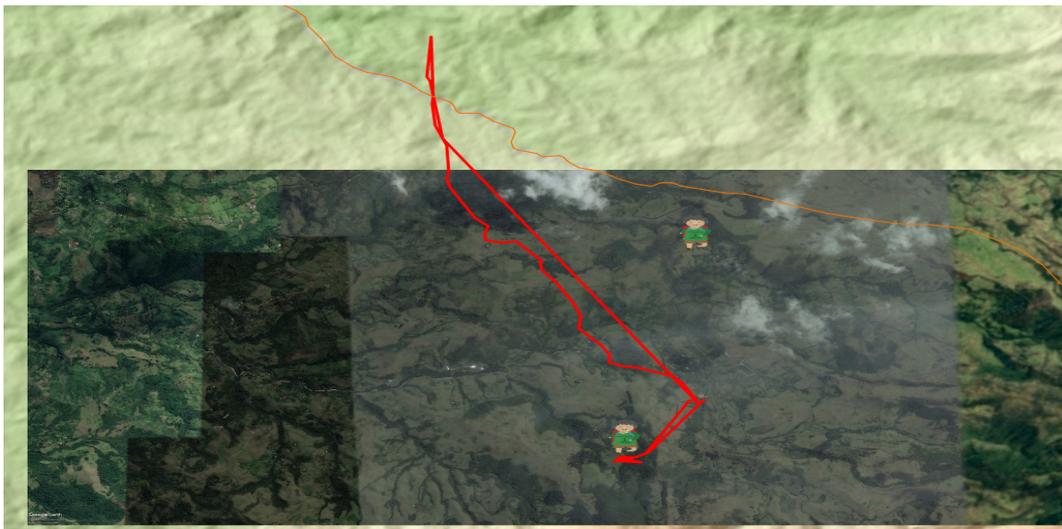


Fig. 54. Página web - Mapa de posición del usuario. Fuente por los autores

Un usuario del sistema envía periódicamente su posición a través de la MS hacia la BS. La posición viaja en un mensaje que contiene principalmente las coordenadas de la MS, un identificador de la MS y el estado de la MS (alerta o normal). Cuando un usuario reporta una alerta a través de la MS, la MS cambia la información del mensaje con el fin de reportar la alerta y aumenta el número de mensajes enviados por minuto hacia la BS. El administrador del sistema dispone de una interfaz en la página web, la cual le permite "crear una alerta" cuando se considere necesario ubicar con prioridad una MS y aumentar la frecuencia con la que se reciben sus mensajes. La función anterior se probó satisfactoriamente y la interfaz empleada por el administrador para la creación de la alerta se presenta en la Fig. 55.



Fig. 55. Página web - Gestión de alertas. Fuente por los autores

Cuando una MS reporta una alerta, el ícono que representa a la MS en el mapa cambia. Esta función se observó en la página web correctamente, como se presenta en la Fig. 56.



Fig. 56. Página web. a) Usuario en estado de operación normal b) Usuario en estado de alerta. Fuente por los autores

La función "atender la alerta" significa enviar una señal desde la BS hacia la MS en el que se cambie el estado de la MS a "estado de operación normal". La función "atender alerta" la realiza el administrador de la página web basado en sus políticas de atención a la MS, como se presenta en la Fig. 57.

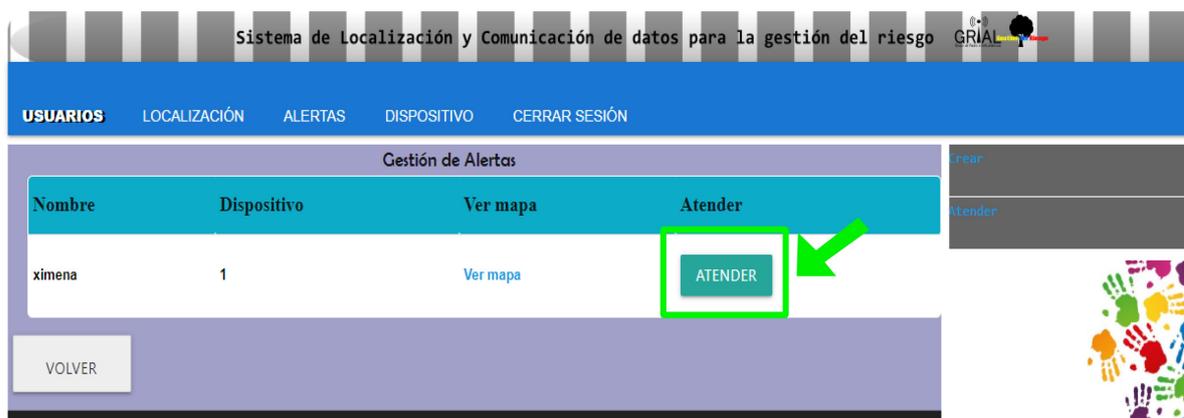


Fig. 57. Página web - atender alertas. Fuente por los autores

5.2.2.2 Pruebas sobre la Base de Datos

El mapa en el cual se ilustra la posición de la MS se encuentra contenido en una página web. En la prueba se accede a la página web con las credenciales del usuario "administrador" definidas por defecto en la creación del sistema. En la Fig. 58 se presenta la interfaz de inicio de sesión de la página web. Como se presenta en la Fig. 59 y la Fig. 60, las pruebas realizadas permiten verificar que la página web filtra adecuadamente la información de acuerdo a las credenciales contenidas en la base de datos.



Fig. 58. Página web - Inicio de sesión. Fuente por los autores



Fig. 59. Página web - Inicio de sesión con credenciales incorrectas. Fuente por los autores

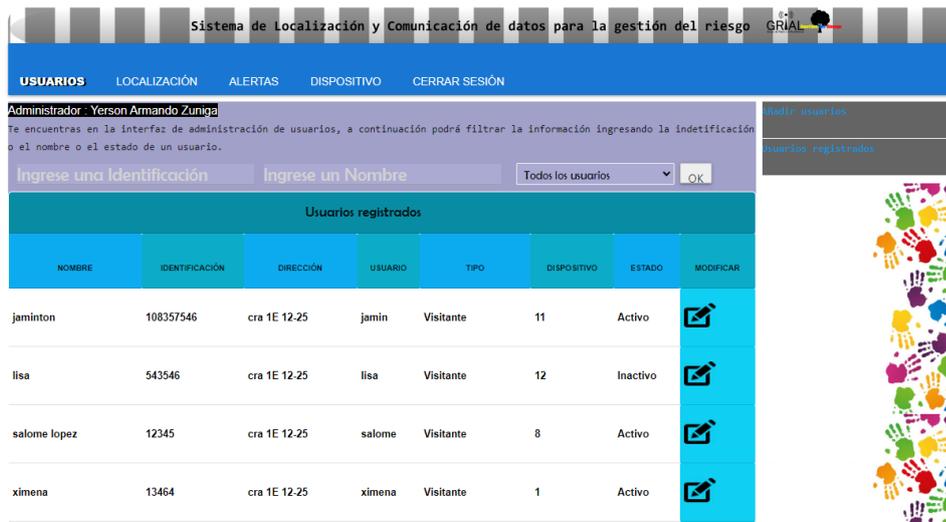


Fig. 60. Página web - Inicio de sesión con credenciales correctas. Fuente por los autores

En la página web se observan las MS registradas, la asignación de cada MS a un usuario específico, los reportes de alerta de cada MS, la posición de la MS, una interfaz con la posibilidad de crear la alerta y una interfaz con la posibilidad de atender la alerta.

Las MS registradas corresponden a la cantidad de dispositivos que transmiten información hacia la BS. Cada una se identifica con un número asignado por el administrador del sistema, tal como se presenta en la Fig. 61.



Fig. 61. Página web - Dispositivos. Fuente por los autores

Se espera que los usuarios del sistema sean principalmente estudiantes de la institución educativa las Huacas. En la página web existe una interfaz que ilustra los datos de todos los usuarios registrados y asigna a cada usuario una MS, permitiendo modificar datos o

desactivar usuarios. Se observó el correcto desempeño de esta funcionalidad, tal como se presenta en la Fig. 62, la Fig. 63 y la Fig. 64.



Fig. 62. Página web - Usuarios. Fuente por los autores

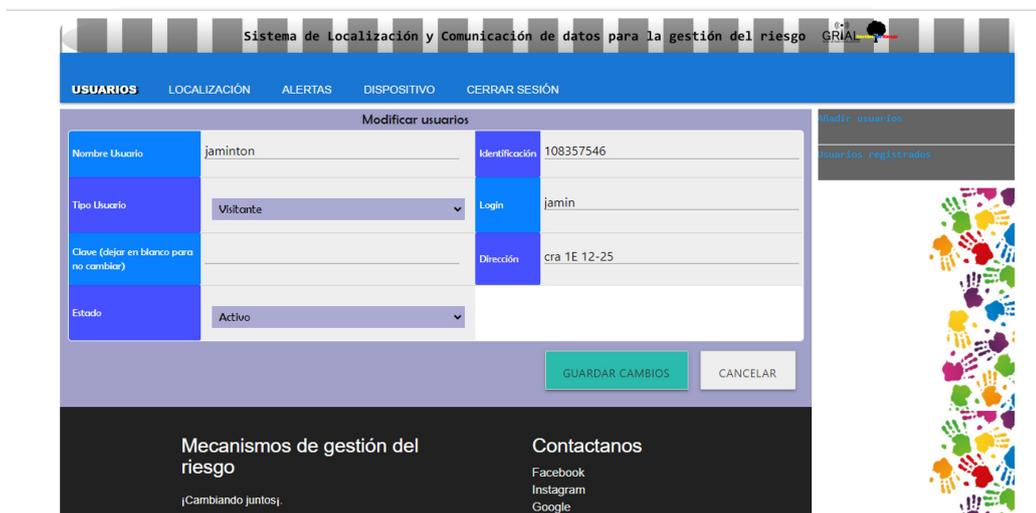


Fig. 63. Página web - Modificar usuarios. Fuente por los autores

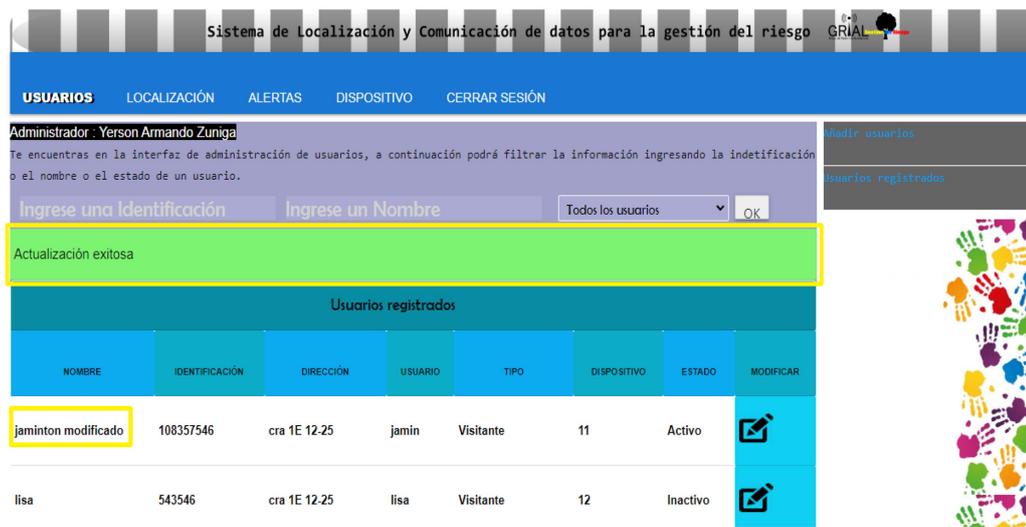


Fig. 64. Página web - Usuario modificado. Fuente por los autores

5.2.3 Pruebas para Evaluar el Desempeño del Sistema

5.2.3.1 Pruebas servicio de localización

Se realizó un recorrido en la cabecera municipal del municipio El Tambo, con el fin de estimar la exactitud de la posición mostrada en la página web del sistema y la posición real. La posición real corresponde al recorrido realizado por un extremo de la carretera. El promedio de diferencia en distancia entre la posición ilustrada en el mapa de la página web y la posición real fue de 3 metros y la máxima diferencia de 6 metros. En la Fig. 65 se presenta el recorrido realizado por la MS con base en las posiciones obtenidas desde la MS.



Fig. 65. Recorrido realizado por la MS. Tomado de Google Earth.

En la Fig. 66 se presenta la diferencia entre las coordenadas geográficas captadas por el receptor GPS contra las posiciones reales del usuario. Las posiciones señaladas de color verde son las que coincidieron con las del usuario y las posiciones señaladas de color amarillo son las que tienen una diferencia de hasta 6 metros.

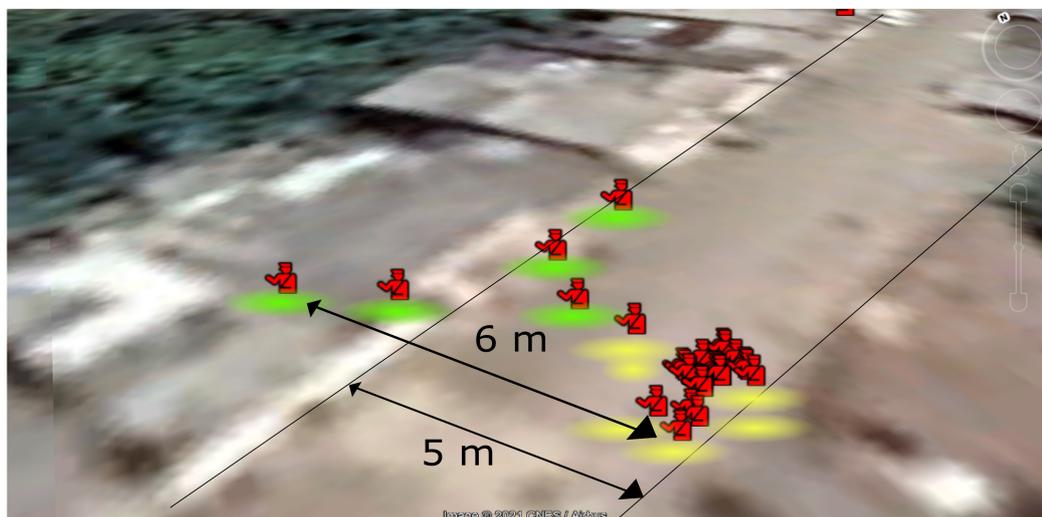


Fig. 66. Exactitud de la posición del sistema. Tomado de Google Earth.

El GPS puede alcanzar una precisión horizontal de 3 metros y una precisión vertical de 5 metros, esta precisión depende del número de satélites visibles al receptor GPS. En la práctica, la diferencia entre la distancia captada por el GPS y la posición verdadera del usuario fue máxima en los puntos donde el usuario se encontraba en reposo.

5.2.3.2 Pruebas sobre el enlace

Debido a la problemática de salud pública que se presenta a nivel mundial a causa de la pandemia de coronavirus (COVID-19), con el fin de reducir el contacto social y la probabilidad de contagio de sus habitantes, las medidas y resultados para el sistema de localización y comunicación de datos se realizaron en el municipio El Tambo (Cauca) y no en la vereda Quintana donde se encuentra la Institución Educativa las Huacas.

La Fig. 67 presenta la ruta recorrida por la MS. La BS se ubicó en un lugar denominado "El obelisco" en el municipio El Tambo (Cauca). La MS envió información desde 14 puntos ubicados a aproximadamente un kilómetro de distancia entre sí. Cada punto se ubica a una diferente altitud (zona montañosa). Se emplearon tres velocidades de transmisión de datos: el primer recorrido se realizó con una velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps, el segundo recorrido con 10 Kbps y el tercero con 25 Kbps.

Debido a que las pruebas se realizaron en el municipio El Tambo (Cauca), al estar categorizado como un municipio de conflicto armado y zona roja en el departamento del Cauca, se hicieron un número finito y apropiado de transmisiones sobre cada posición. En los tres casos se realizó el mismo recorrido, y en cada punto presentado en la Fig. 67 se

realizaron 500 transmisiones desde la MS hacia la BS y cada transmisión envió una trama que contenía las coordenadas geográficas de la MS.

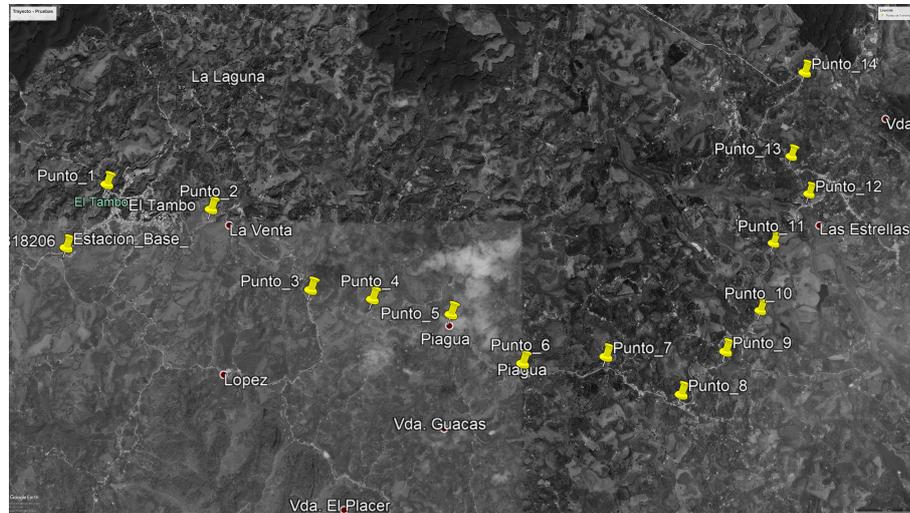


Fig. 67. Ruta recorrida por la MS. Tomado de Google Earth.

A continuación se presentan los resultados para los recorridos realizados a velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps. De los resultados obtenidos, la Fig. 68 presenta la cantidad de paquetes recibidos de 500 transmitidos para cada distancia.

La Fig. 69 presenta la gráfica de la Tasa de Error de Paquetes (PER, *Packet Error Rate*) contra la distancia correspondiente, los asteriscos (*) de color rojo, azul y verde representan los valores calculados de la PER para cada valor de distancia a velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps. Las curvas de color rojo, azul y verde representan funciones cuyos valores se aproximan a los valores de la PER.

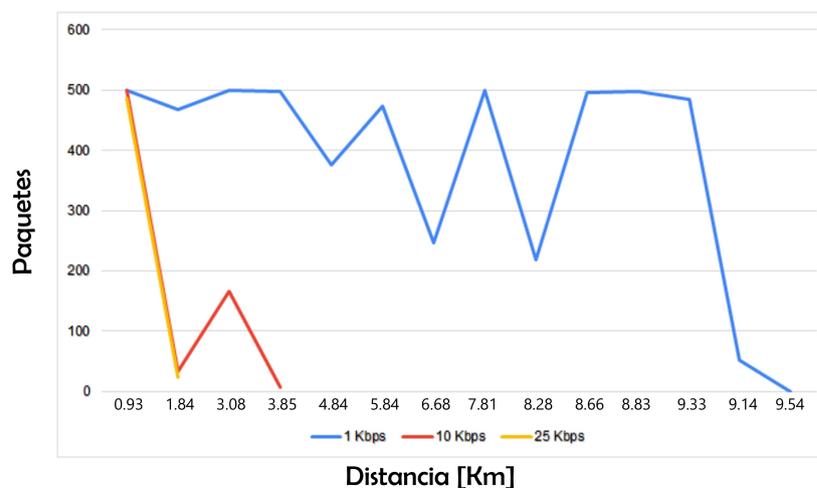


Fig. 68. Paquetes recibidos contra distancia. Fuente por los autores.

Se observa que el número de paquetes recibidos a una velocidad de datos de 1 Kbps tiene el mayor alcance respecto a los otros recorridos con velocidades de transmisión de datos de 10 Kbps y 25 Kbps.

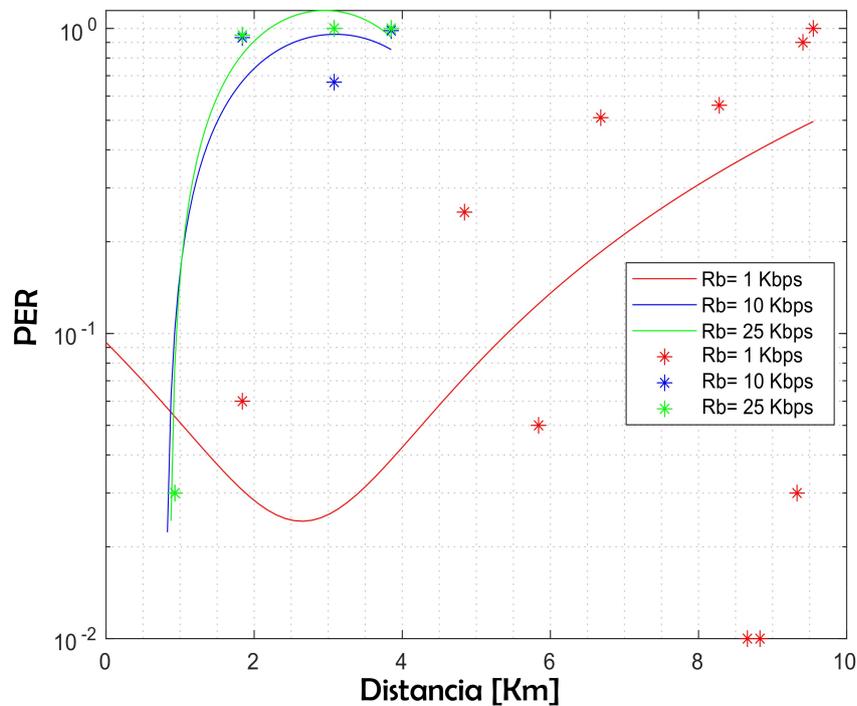


Fig. 69. Tasa de Error de paquete versus distancia. Fuente por los autores.

- Potencia de ruido** La potencia de ruido para el sistema se calcula según (12), donde, K es la constante de Boltzmann, T es la temperatura equivalente a $290^\circ K$, B el ancho de banda considerado en Hz y F la figura de ruido en dB. El valor específico de potencia de ruido para un valor de temperatura equivalente de ruido de $290^\circ K$, ancho de banda de 125 KHz y una figura de ruido de 6 dB, está dado por:

$$\begin{aligned}
 N[\text{dBm}] &= 10 \log_{10} \left(\frac{KTB}{0.001} \right) + F \\
 &= 10 \log_{10} \left(\frac{(1.38 \times 10^{-23})(290)(125000)}{0.001} \right) + 6 \\
 &= -117.008
 \end{aligned} \tag{12}$$

- Potencia de recepción con Okumura-Hata** Debido a que los componentes empleados en la construcción de la MS no incorporan la capacidad para medir la potencia de recepción, se calculó un balance del enlace. A continuación se presenta en la Fig. 70 el diagrama del balance del enlace.

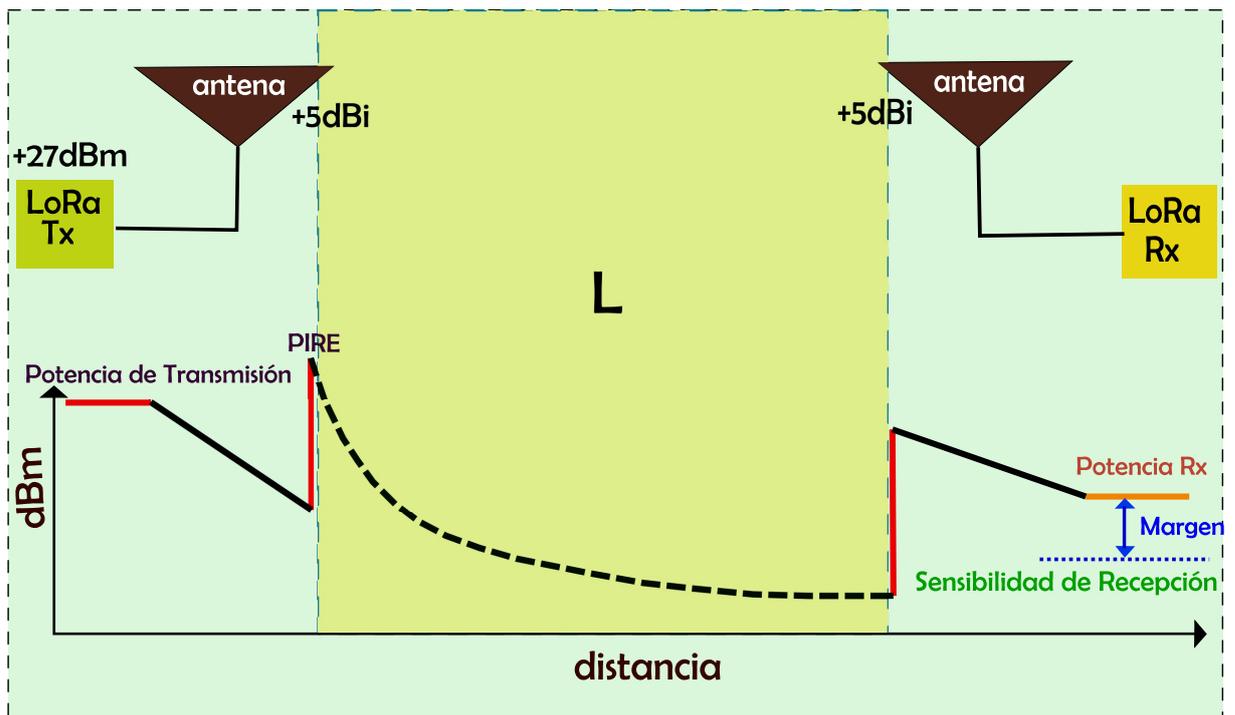


Fig. 70. Balance del enlace radio. Tomada de [15].

Para determinar la potencia de recepción se tienen en cuenta el valor de la potencia de transmisión desde la BS, las ganancias de las antenas de transmisión y recepción, las pérdidas asociadas a los dispositivos y las pérdidas de propagación de la señal. De lo presentado en la Fig. 70 se puede plantear (13) como balance del enlace:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L + G_{rx}, \quad (13)$$

donde, P_{rx} es la potencia de recepción deseada en dBm, P_{tx} es la potencia de transmisión en dBm, L las pérdidas totales del sistema en dB, G_{rx} la ganancia antena receptora en dBi y G_{tx} la ganancia antena transmisora en dBi.

Con el objetivo de determinar las pérdidas de propagación del enlace, se emplea el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata para zonas rurales, el cual es utilizado para estimar la potencia en recepción. Los requisitos que se deben cumplir para emplear el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata son los siguientes:

$$\begin{aligned} 150 \text{ MHz} < f_c < 1500 \text{ MHz} \\ 30 \text{ m} < h_{te} < 200 \text{ m} \\ 1 \text{ m} < h_{re} < 10 \text{ m} \end{aligned}$$

donde,
 f_c : Frecuencia central.

h_{te} : Altura de la antena transmisor.

h_{re} : Altura de la antena receptor.

El modelo Okumura-Hata define un procedimiento para calcular las pérdidas totales del sistema a partir de las pérdidas de propagación del enlace en una zona urbana y un factor de corrección de la antena de la MS. A continuación se realizan los cálculos necesarios para determinar las pérdidas de sistema.

Mediante el modelo Okumura-Hata se pueden estimar las pérdidas de propagación del enlace en una zona urbana empleando (14). Las pérdidas dependen de la frecuencia central del sistema, la altura de la antena transmisora, la altura de la antena receptora y la distancia de separación entre la BS y la MS, tal como se muestra a continuación:

$$L_u = 69.55 + 26.26 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{te}) - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{te})) \log_{10}(d), \quad (14)$$

donde,

L_u : Pérdidas urbanas en dB.

$a(h_{re})$: Factor de corrección de la antena de la MS en dB.

d : Distancia de separación entre la BS y la MS en Km.

Para ciudades pequeñas y medianas se emplea el factor de corrección de la antena de la MS que aparece a continuación:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7)h_{re} - 1.56 \log_{10}(f_c) + 0.8, \quad (15)$$

Para áreas rurales se tiene el siguiente factor de corrección en la estimación de las pérdidas de propagación:

$$L = L_u - 4.78(\log_{10}(f_c))^2 + 18.33 \log_{10}(f_c) - 40.94, \quad (16)$$

Empleando (16) se calculan las pérdidas según el modelo de Okumura-Hata para la distancia del último lugar en el que se transmitió información desde la MS a la BS⁹. Se tienen en cuenta las características del enlace presentadas en la Tabla 11:

Características	Valor
Frecuencia central	433 MHz
Ganancia antena transmisora	5 dBi
Ganancia antena receptora	5 dBi
Potencia de transmisión	27 dBm
Altura antena transmisora	171 m
Altura antena receptora	1 m

Tabla 11. Características del sistema. Fuente por los autores.

⁹La altura de la antena transmisora igual a 171 metros se obtuvo posicionando la BS en un lugar predominantemente alto en el municipio El Tambo (Cauca).

Al reemplazar las características del sistema en (16) se obtiene:

$$L_{ultimoPunto}[\text{dB}] = 115.9161 = L - M, \quad (17)$$

donde,

L : Pérdidas totales del sistema en dB.

M : Margen de pérdidas adicionales en dB.

$L_{ultimoPunto}$: Pérdidas del sistema en dB para la ultima distancia desde la cual se recibieron paquetes.

$$L = 115.9161 + M, \quad (18)$$

La sensibilidad¹⁰ del receptor es un parámetro del sistema de telecomunicaciones que representa el nivel de potencia de recepción mínimo para mantener la comunicación entre los nodos finales LoRa[®]. Reemplazando (18) en (13) y teniendo en cuenta que para este punto la potencia de recepción deseada equivale a la sensibilidad del receptor (-130 dBm), se obtiene el valor de diferencia entre la medida real y la medida estimada, a lo que se define como margen o valor adicional de pérdidas:

$$M = 51.0838, \quad (19)$$

Por lo que de manera general, para todos los puntos geográficos desde donde se transmite información se considera un valor adicional de pérdidas de 51.0838 dB. Empleando los valores de la potencia de recepción obtenida con el modelo de pérdidas de propagación Okumura-Hata y la potencia de ruido en (12), se calcula la SNR asociada a cada distancia haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Potencia de señal}}{\text{Potencia de ruido}} \right). \quad (20)$$

Debido a que la BS descarta a los paquetes con errores de bit, de (21) se obtiene la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) en función de la PER como se presenta en (22).

$$\text{PER} = 1 - (1 - \text{BER})^n, \quad (21)$$

$$\text{BER} = 1 - \sqrt[n]{1 - \text{PER}}, \quad (22)$$

donde n ¹¹ es igual al número de bits que conforman un paquete de información. Los resultados de la BER contra la SNR para cada velocidad de transmisión de datos empleada en las pruebas se presenta en la Fig. 71.

En la Fig. 71 las estrellas de color azul, amarillo y verde representan los valores calculados de la BER para cada valor de SNR a velocidades de transmisión de datos

¹⁰La sensibilidad para la tecnología LoRa se define en función del factor de ensanchamiento. Debido a que en las especificaciones del fabricante de la tarjeta E32-433T30D no se define un valor de sensibilidad para cada velocidad de transmisión de datos, por lo cual se asumió un valor de sensibilidad de -130 dBm para cada uno de los recorridos.

¹¹ n representa el número de bits que conforman un paquete. Para los paquetes enviados n es igual a 220 bits.

de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps, respectivamente. Cada estrella presentada corresponde a un valor de la BER calculado a partir de 500 transmisiones. Las curvas¹² de color rojo, morado y azul representan funciones cuyos valores se aproximan a los valores de la BER para cada una de las velocidades indicadas.

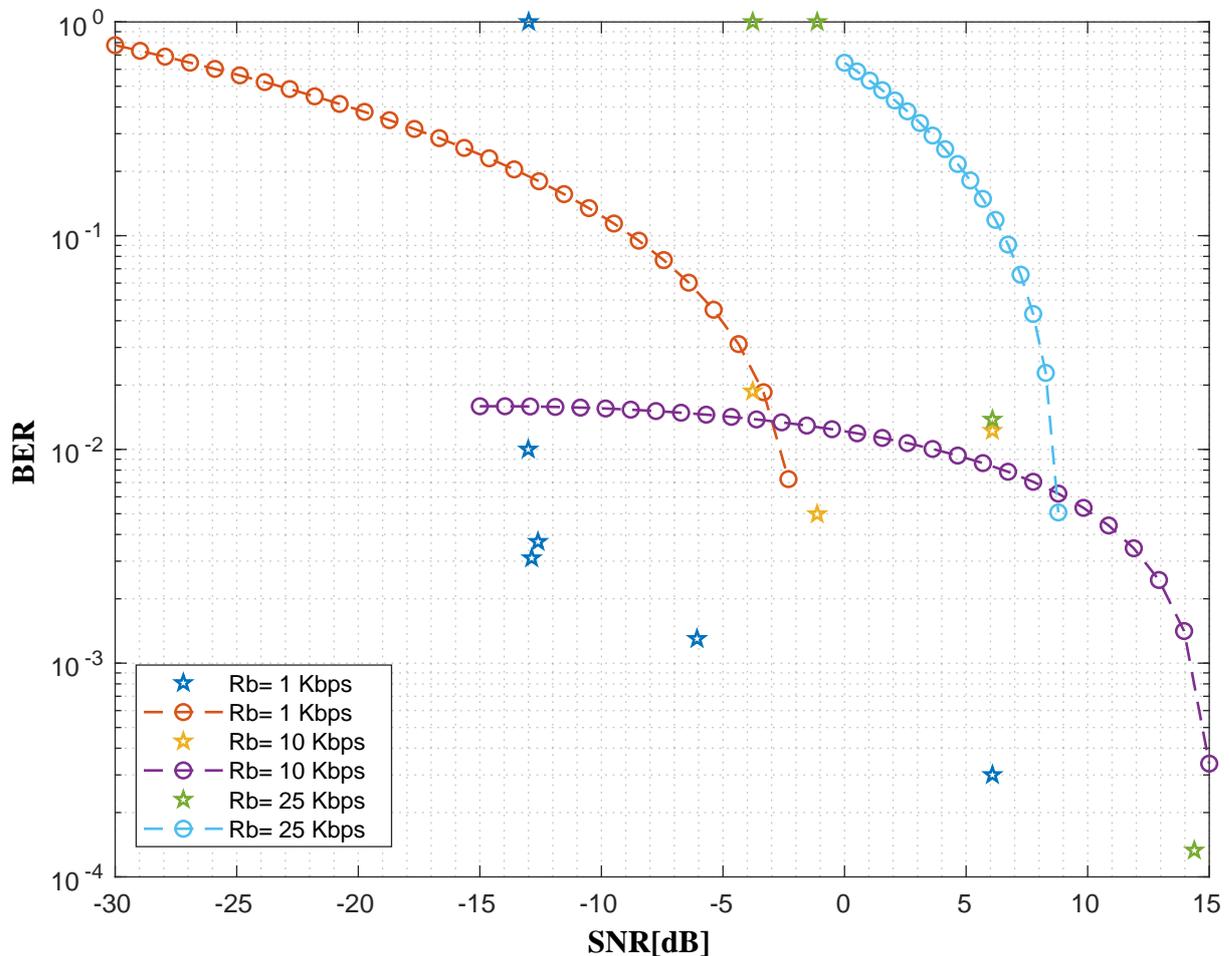


Fig. 71. BER contra SNR empleando modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata para velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps. Fuente por los autores mediante el uso de MATLAB.

Se observa que el mejor desempeño es para la curva correspondiente a la velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps, la cual asocia BER mas bajas para SNR pequeñas e incluso negativas. Por otra parte, las curvas correspondientes a 10 Kbps y 25 Kbps, asocian los mismos valores de BER para SNR mucho mayores de hasta 15 dB.

- **Potencia de recepción con Radio Mobile:** se emplea la herramienta Radio Mobile para estimar la potencia de recepción deseada del sistema. Radio Mobile es un software de libre distribución para el cálculo de radio enlaces de larga distancia

¹²El procedimiento para el ajuste de una curva polinómica para las relaciones de SNR y BER se obtiene mediante la función *polyfit* de MATLAB. La función devuelve los coeficientes para un polinomio $p(\text{SNR})$ de grado 2 que es la mejor solución (en el sentido de los mínimos cuadrados) para los valores de la BER.

en terreno irregular. Este programa opera en un rango de frecuencias desde 20 MHz hasta 20 GHz, utilizando el Modelo de Terreno Irregular (ITM, *Irregular Terrain Model*) Longley-Rice [35].

Se realiza una simulación con las coordenadas geográficas de las posiciones desde las cuales la MS envió información hacia la BS. Se introdujeron a la herramienta las características del enlace y un margen de pérdidas adicionales de 10.7 dB con el objetivo de que la potencia deseada en el ultimo punto de transmisión coincida con la sensibilidad del receptor (-130 dBm), como se presenta en la Fig. 72.

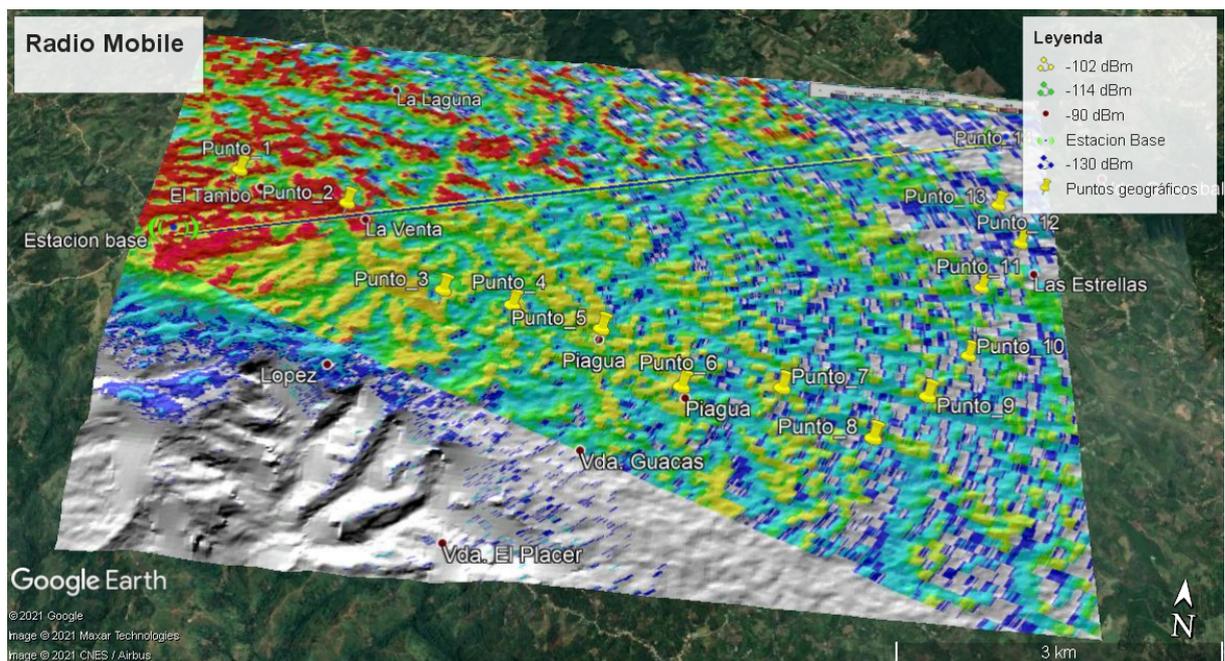


Fig. 72. Cobertura del sistema en Radio Mobile con margen de pérdidas adicionales de 10.7 dB. Fuente por los autores.

Para cada uno de los puntos geográficos la herramienta proporcionó una potencia de recepción con la que se calculó la SNR correspondiente. Las relaciones de la BER contra SNR se observan en la Fig. 73.

En la Fig. 73 las estrellas de color azul, amarillo y verde representan los valores calculados de la BER para cada valor de SNR a velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps, respectivamente. Cada estrella presentada corresponde a un valor de la BER calculado a partir de 500 transmisiones. Las curvas de color rojo, morado y azul representan funciones cuyos valores se aproximan a los valores de la BER para cada una de las velocidades indicadas.

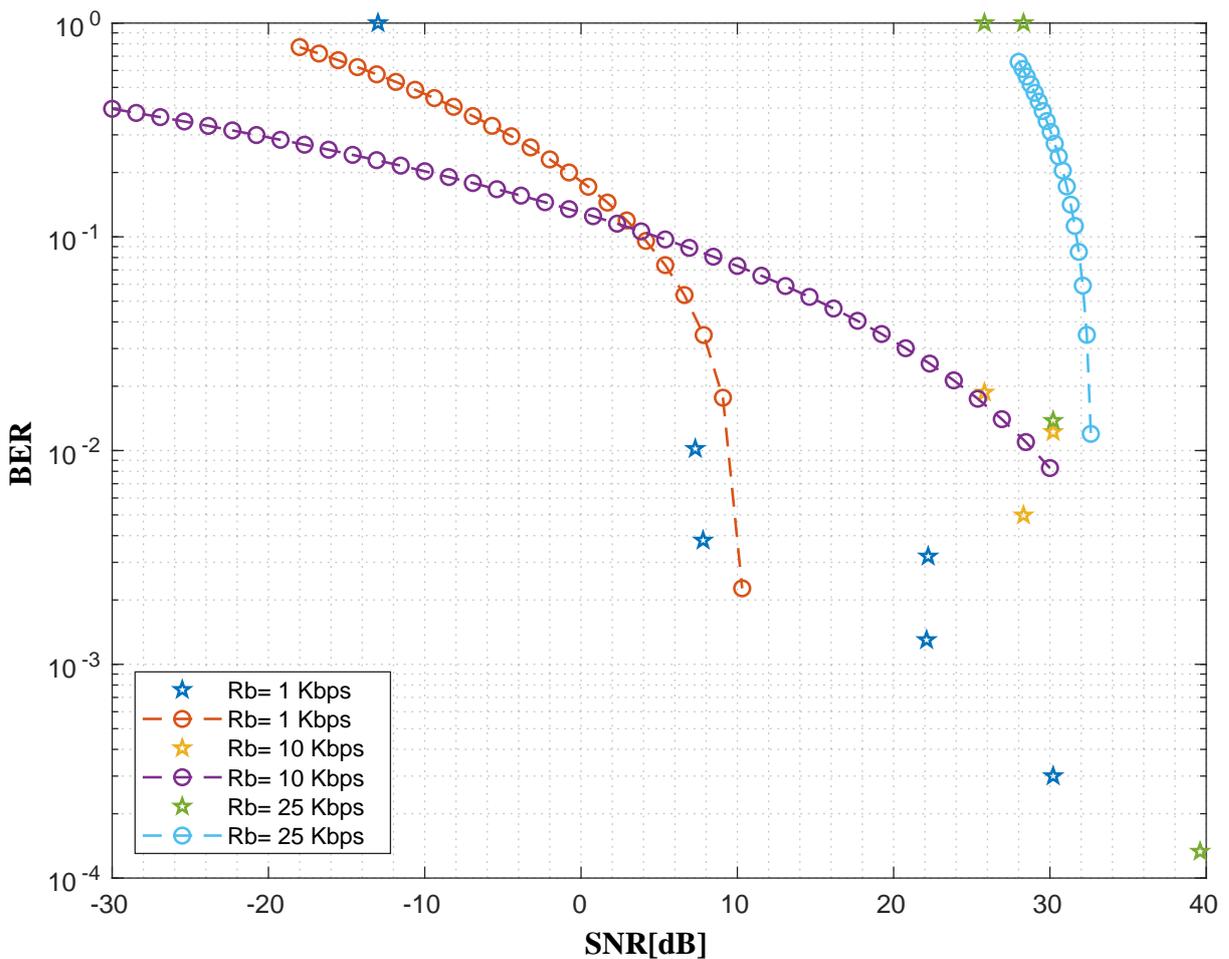


Fig. 73. BER contra SNR haciendo uso de herramienta Radio Mobile para velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps. Fuente por los autores mediante el uso de MATLAB.

En la Fig. 74 se presentan los valores de SNR para valores de la BER iguales a 10^{-1} y 10^{-2} , respectivamente. En la gráfica izquierda se relacionan valores de SNR empleando el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata y en la gráfica derecha valores de SNR haciendo uso de herramienta Radio Mobile. Los valores de SNR de la izquierda son menores que los valores de SNR de la derecha, lo cual indica que el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata calcula pérdidas mayores a las estimadas mediante la herramienta Radio mobile. Para ambas gráficas el mejor desempeño es para la curva a la velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps, la cual exige menores valores de SNR.

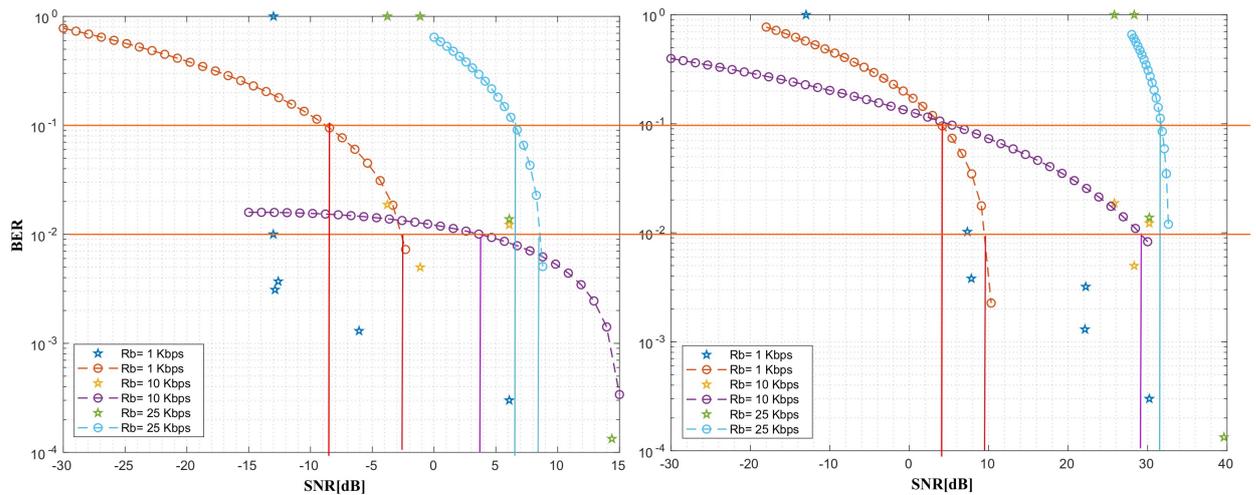


Fig. 74. BER contra SNR empleando modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata de BER contra SNR haciendo uso de Radio Mobile. Fuente por los autores.

- Potencia de recepción con Sigfox Coverage Tool de QGIS:** se hace uso de la herramienta de cobertura Sigfox Coverage Tool de QGIS [34], la cual realiza una estimación de la cobertura radioeléctrica empleando el modelo de Okumura-Hata. Se ingresan las características del sistema para obtener el mapa de cobertura en El Tambo, para una velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps, teniendo en cuenta los puntos geográficos desde los que se transmitió información. La cobertura del sistema sin agregar un margen de pérdidas adicionales se presenta en la Fig. 75.

Se realizó una simulación de cobertura con las características del sistema teniendo en cuenta las coordenadas geográficas de las posiciones desde las cuales la MS envió información y la posición de la BS. Para la simulación se tuvieron en cuenta las características del enlace y se introdujo un margen de pérdidas adicionales de 20.4 dB, con el objetivo de que la potencia deseada en el ultimo punto de transmisión coincida con la sensibilidad del receptor (-130 dBm). El mapa de cobertura con el margen de desvanecimiento considerado es presentado en la Fig. 76. Para cada uno de los puntos geográficos la herramienta se obtuvo una potencia de recepción con la que se calculó la SNR correspondiente.

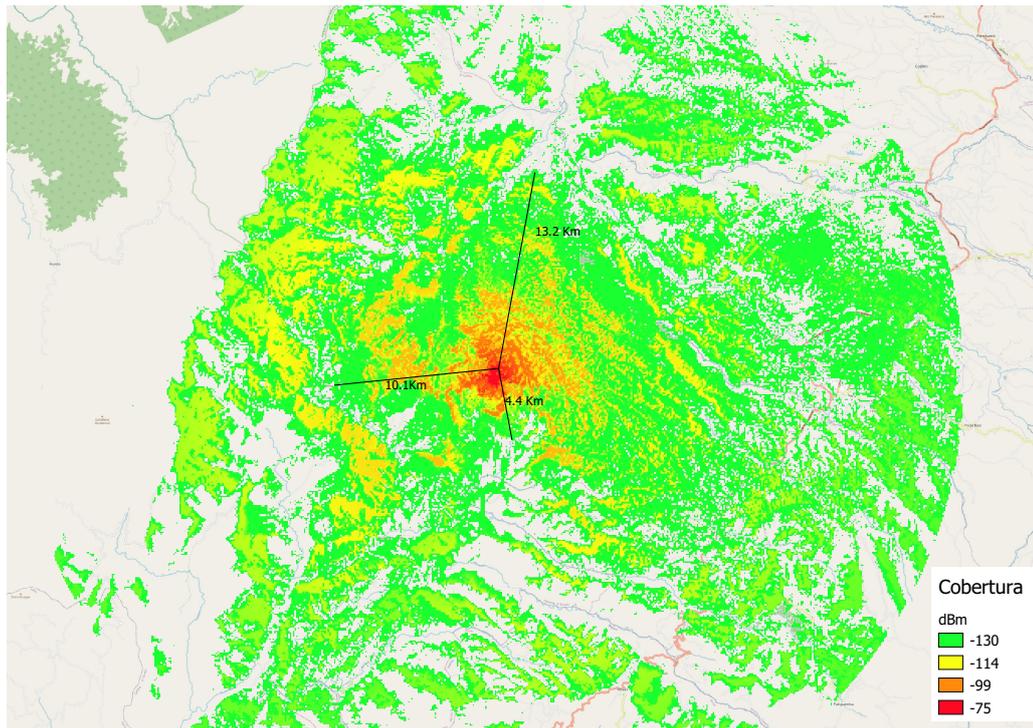


Fig. 75. Cobertura del sistema sin pérdidas adicionales - El Tambo (Cauca). Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox *Coverage Tool* de QGIS.

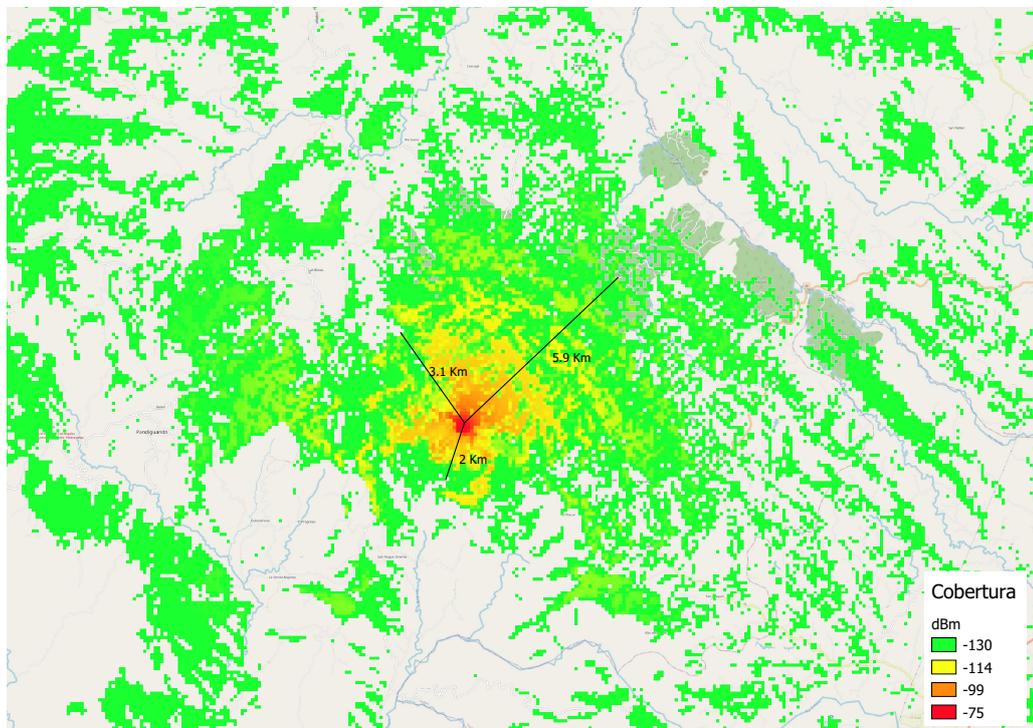


Fig. 76. Cobertura del sistema con pérdidas adicionales - El Tambo (Cauca). Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox *Coverage Tool* de QGIS.

En la Fig. 76 al agregar el margen de pérdidas adicionales a la simulación de cobertura del sistema en el municipio de El Tambo (Cauca), se obtiene un mapa de cobertura más ajustado a las características reales del sistema, notándose una disminución en el alcance de la comunicación del sistema respecto a la Fig. 75.

La Fig. 77 presenta el perfil del terreno desde el transmisor hasta el último punto donde se recibieron paquetes para una velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps. El área contenida entre las curvas rojas representan las zona de Fresnel al 60 por ciento, las cuales son obstruidas por los diferentes obstáculos presentes en el trayecto de la señal, por este motivo la herramienta calcula las pérdidas por difracción. Este perfil de terreno fue obtenido con la ayuda de la herramienta Sigfox *Coverage Tool* de QGIS, obteniendo valores de datos como pérdidas de espacio libre de 104.46 dB, número de obstáculos igual a 2 y pérdidas por difracción 0.74 dB. Sin las pérdidas adicionales del enlace, la potencia de recepción es de -108.8 dBm y con las pérdidas adicionales es de -129.2 dBm.

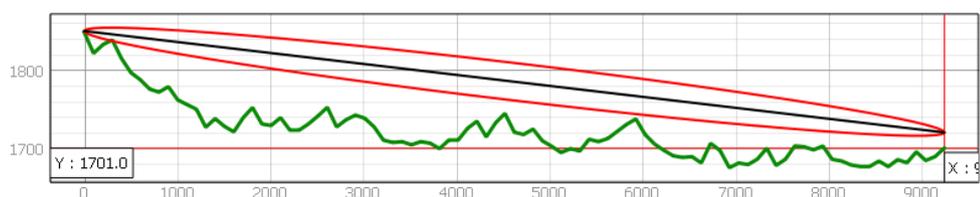


Fig. 77. Perfil a 9.4 Km de la BS. Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox *Coverage Tool* de QGIS.

Dentro de la zona de cobertura también se tienen áreas en las cuales por su situación geográfica, por la cantidad de obstáculos, y el consiguiente incremento de las pérdidas por difracción, la cantidad de paquetes erróneos es total, situación que se presenta en la Fig. 78. De la representación del perfil del terreno se obtienen datos tales como: potencia de recepción igual a -145.36 dBm, número de obstáculos igual a 4, pérdidas por difracción igual a 62 dB y pérdidas de espacio libre igual a 92.72 dB.

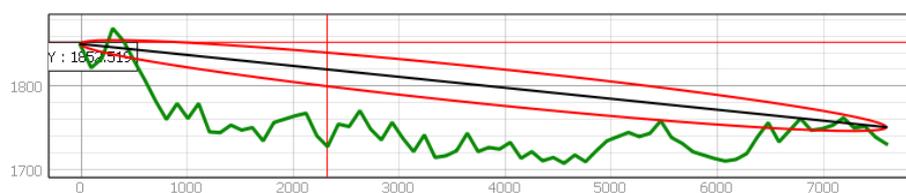


Fig. 78. Perfil a 7.8 Km de la BS Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox *Coverage Tool* de QGIS.

Otros puntos geográficos a considerar son aquellos que se encuentran cerca a la BS, a distancias del orden de los 2 Km, los cuales tienen unas pérdidas considerables debido a los obstáculos presentes en el trayecto de la señal, por ejemplo, como se presenta en la Fig. 79, en donde del simulador se obtienen datos como: potencia de recepción igual a -128.5 dBm, número de obstáculos igual a 1, pérdidas por difracción igual a 12.53 dB y pérdidas de espacio libre igual a 91.53 dB.

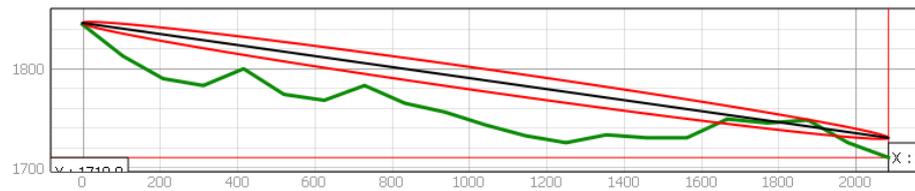


Fig. 79. Perfil a 2.3 Km de la BS Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox Coverage Tool de QGIS.

Los resultados de la potencia de recepción estimada mediante el programa Sigfox Coverage Tool de QGIS y la tasa de error de paquete obtenida en la prueba para la velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps se presentan en la Fig. 80. Se observa que la herramienta Sigfox Coverage Tool de QGI presenta potencias de recepción que son inversamente proporcionales a las PER obtenidas en la prueba, principalmente para distancias menores a 4.84 Km.



Fig. 80. Relación de potencia de recepción estimada y PER. Fuente por los autores.

Realizando una comparación entre la BER para cada velocidad de transmisión de datos y la SNR calculada a partir de las potencias de recepción que brinda la simulación y de (12), se obtienen las curvas presentadas en la Fig. 81.

En la Fig. 81 las estrellas de color azul, amarillo y verde representan los valores calculados de la BER para cada valor de SNR a velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps, respectivamente. Cada estrella presentada corresponde a un valor de la BER calculado a partir de 500 transmisiones. Las curvas de color rojo, morado y azul representan funciones cuyos valores se aproximan a los valores de la BER para cada una de las velocidades indicadas.

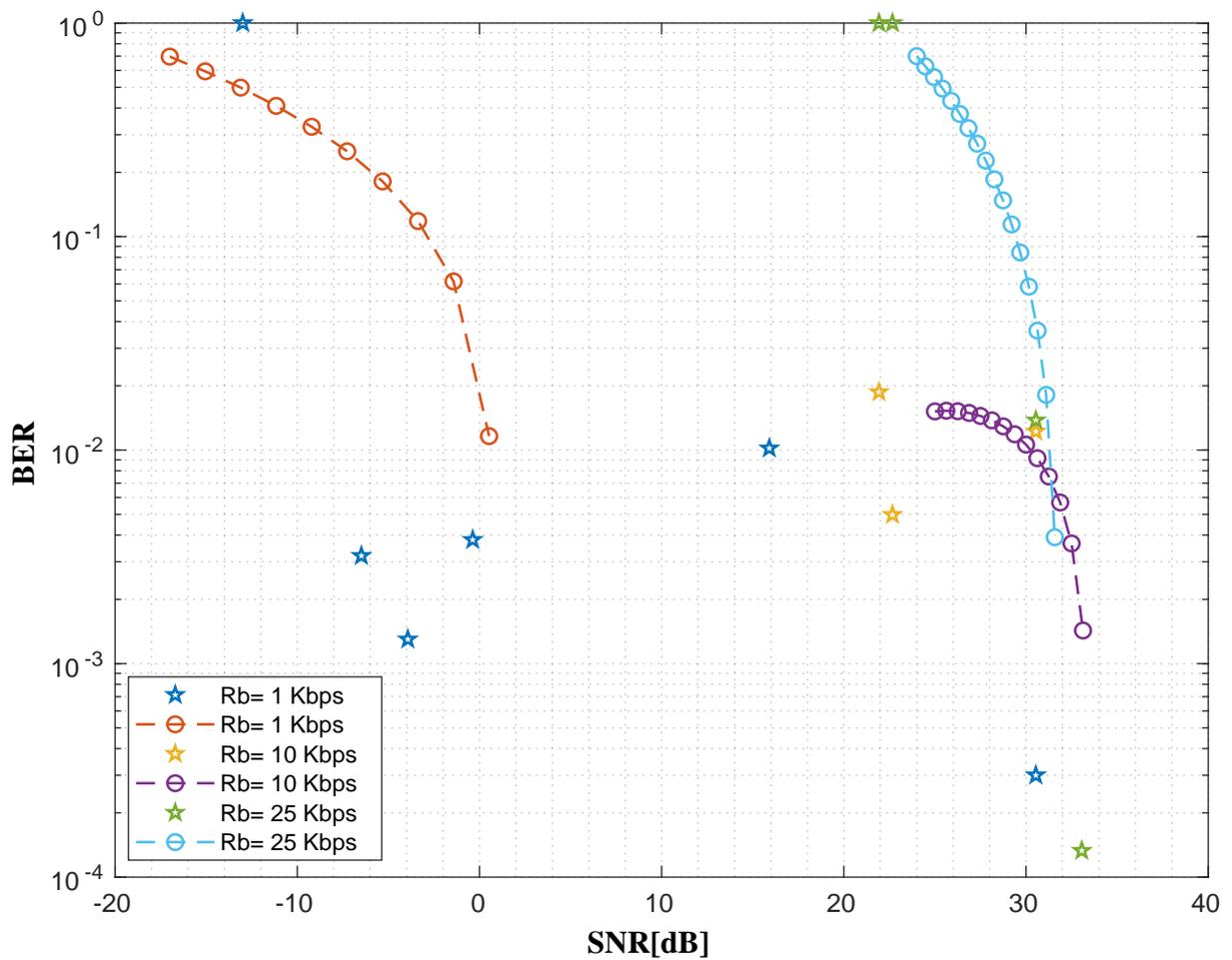


Fig. 81. BER contra SNR empleando modelo de pérdidas de propagación de Sigfox Coverage Tool de QGIS para velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps. Fuente por los autores mediante el uso de MATLAB.

Realizando una simulación del sistema desde la escuela rural Institución Educativa Las Huacas – Sede Quintana, ubicada en la zona rural de Popayán, se obtiene el mapa de cobertura para la zona de Quintana sin pérdidas adicionales presentado en la Fig. 82 y se obtiene la cobertura con pérdidas adicionales de 20.4 dB presentada en la Fig. 83.

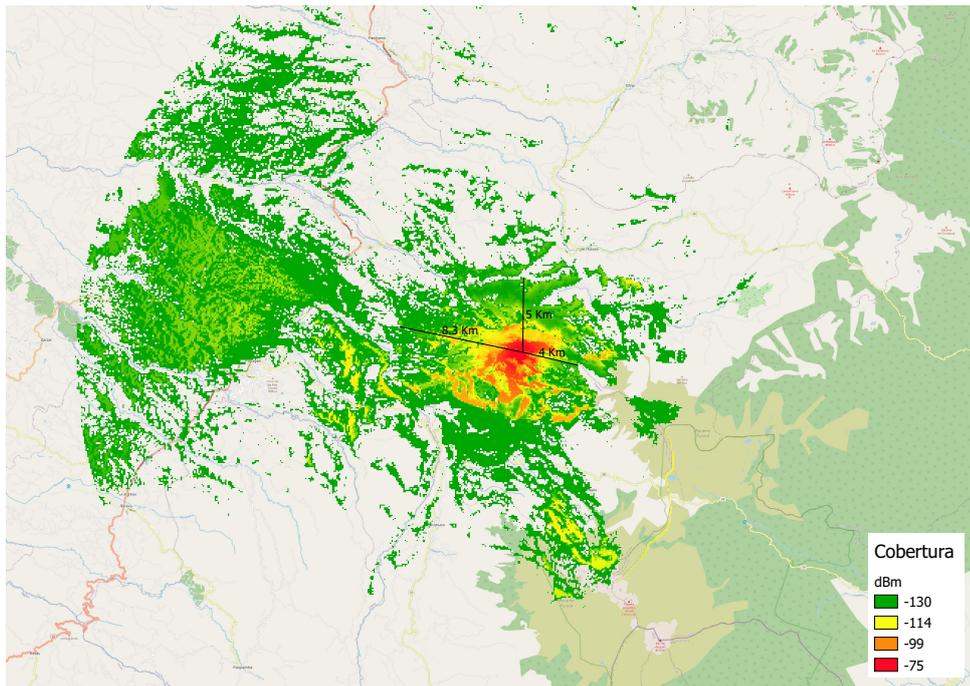


Fig. 82. Cobertura del sistema sin pérdidas adicionales - Institución Educativa Las Huacas. Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox *Coverage Tool* de QGIS.

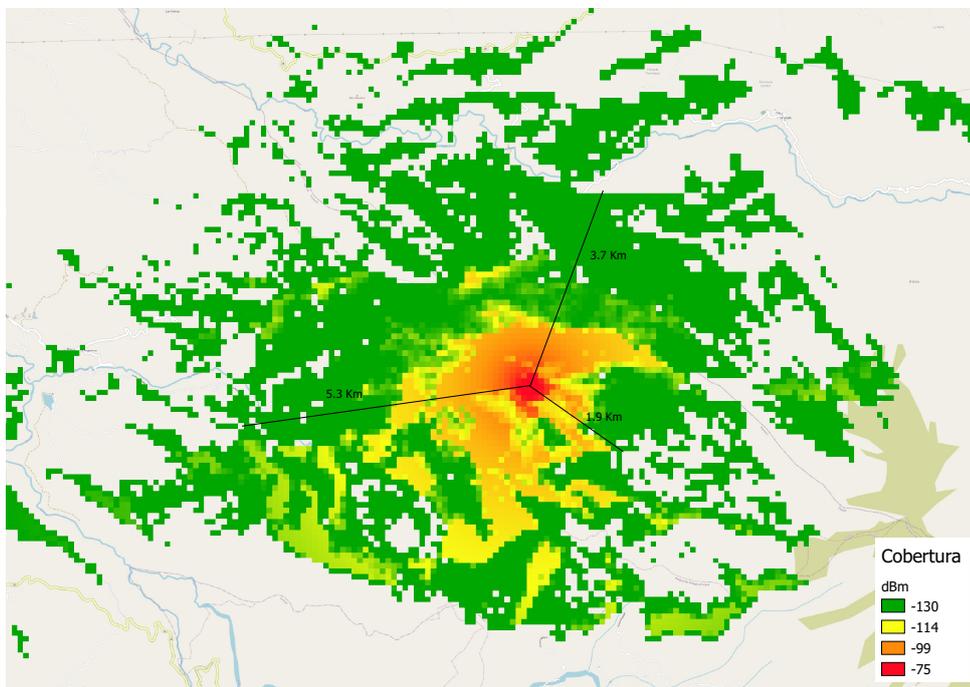


Fig. 83. Cobertura del sistema con pérdidas adicionales - Institución Educativa Las Huacas. Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox *Coverage Tool* de QGIS.

En la Fig. 84 se presentan las coberturas estimadas del sistema para la Institución Educativa Las Huacas y El Tambo (Cauca).

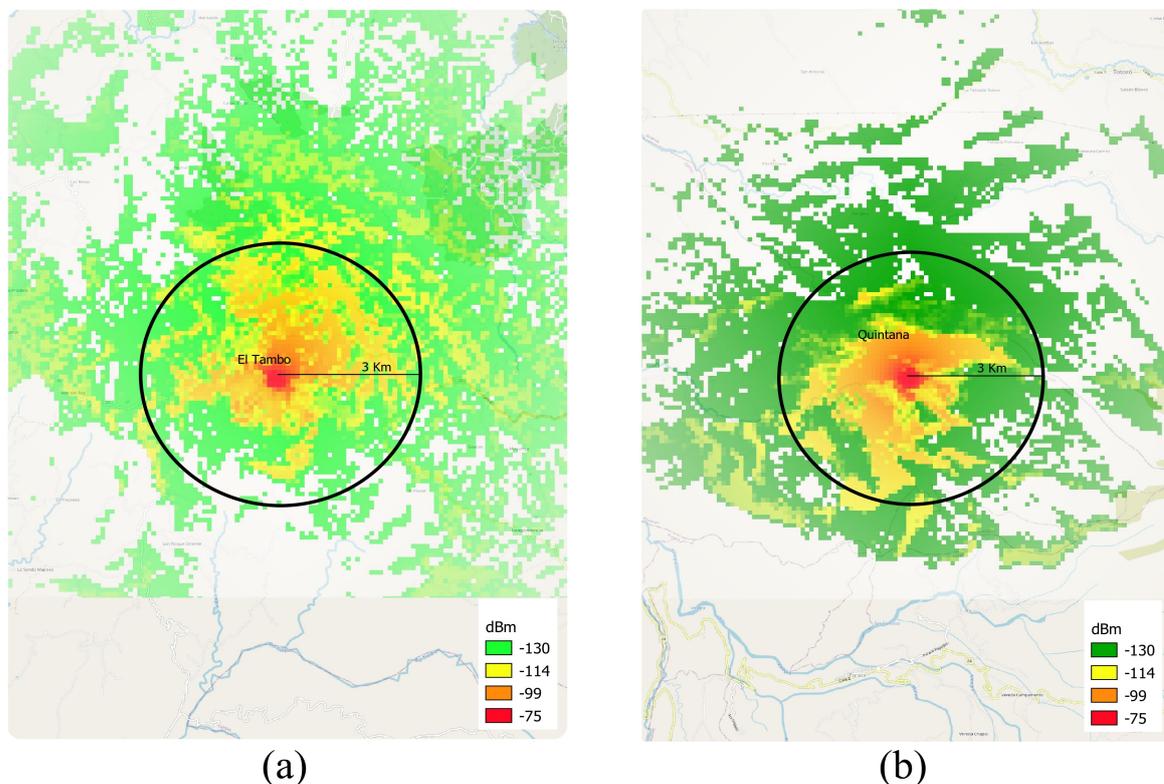


Fig. 84. Cobertura del sistema con radio de 3 Km. a) Simulación en el municipio El Tambo (Cauca). b) Simulación en Quintana. Fuente por los autores mediante la herramienta de cobertura Sigfox *Coverage Tool* de QGIS.

5.2.3.3 Pruebas sobre el dispositivo

Se realizaron medidas del consumo de corriente eléctrica de la MS para sus diferentes estados de funcionamiento con el fin de estimar el tiempo de duración de la batería del dispositivo. Los principales estados de funcionamiento de la MS son cuando transmite información, cuando recibe información y cuando se encuentra en modo de reposo mientras espera la siguiente transmisión. Para esta prueba se insertó en serie con la batería de la MS un amperímetro. Los resultados indicaron un flujo de corriente eléctrica de 290 mA en estado o modo de transmisión, 80 mA en estado de recepción y de 60 mA cuando se encuentra en modo de reposo. La Fig. 85 presenta el periodo de tiempo que emplea la MS en cada estado de funcionamiento cuando es configurada a una velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps y se encuentra en estado de operación normal.

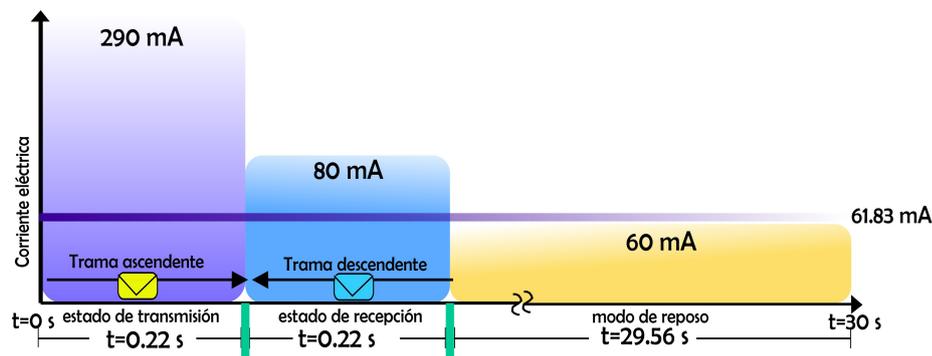


Fig. 85. Consumo de corriente eléctrica de la MS en estado de operación normal. Fuente por los autores.

El consumo de corriente eléctrica promedio de la MS es de 61.83 mA. Teniendo en cuenta que la MS en estado de operación normal envía un mensaje a la BS cada 30 segundos y que la batería empleada tiene una capacidad de 8000 mAh, el tiempo de duración de la batería del dispositivo se calcula a continuación:

$$D_{bateria}[h] = \frac{\text{capacidad disponible}}{\text{consumo corriente eléctrica}} = \frac{8000 \text{ mAh}}{61.83 \text{ mA}} = 129.39 \quad (23)$$

Cuando una MS ingresa en estado de alerta el tiempo de transmisión de las coordenadas es de 15 segundos. La Fig. 86 presenta el segmento de tiempo que emplea la MS en cada estado de funcionamiento cuando es configurada a una velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps y se encuentra en estado de alerta.

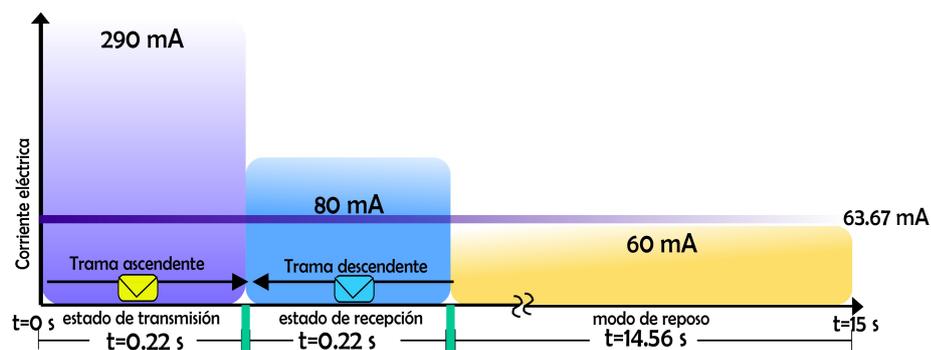


Fig. 86. Consumo de corriente eléctrica de la MS en estado de alerta. Fuente por los autores.

En el escenario de mayor consumo de energía eléctrica, el tiempo de duración de la batería del dispositivo en estado de alerta se calcula a continuación:

$$D_{bateria}[h] = \frac{\text{capacidad disponible}}{\text{consumo corriente eléctrica}} = \frac{8000 \text{ mAh}}{63.67 \text{ mA}} = 125.65 \quad (24)$$

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El siguiente es el análisis de resultados para la pruebas realizadas en el municipio El Tambo (Cauca) con el sistema prototipo:

- En las pruebas realizadas con las tarjetas LoRa[®] de referencia E32T30D, un ancho de banda de 125 KHz y una velocidad de transmisión de datos 1 Kbps, el alcance de la comunicación entre la BS y la MS fue de 9.4 Km. Para una velocidad de transmisión de datos de 10 Kbps el alcance fue de 3.85 Km y para una velocidad de transmisión de datos de 25 Kbps el alcance fue de 1.84 Km. Esto se debe a que a menor velocidad de transmisión de datos se emplea un mayor factor de ensanchamiento, lo cual implica una menor relación SNR mínima y por lo tanto una mayor sensibilidad, lo que resulta en una mayor capacidad de escucha del receptor y por lo tanto un mayor alcance.
- En las pruebas realizadas sobre la base de datos y la interfaz de administración, se observó que las funciones realizadas por el administrador, tales como administración de los usuarios, administración de dispositivos, gestión de alertas y visualización de posición geográfica de los usuarios, se desarrollan adecuadamente, lo cual se debe a que la comunicación entre el controlador del lado del servidor y el controlador del lado del microcontrolador permite una correcta consulta y actualización de la base de datos.
- En las pruebas realizadas sobre el enlace se obtuvo la PER para las velocidades de transmisión de datos a diferentes distancias desde el transmisor. A partir de la PER y de los 220 bits que componen un paquete de información, se estimó el valor de la BER. Se calculó la potencia de ruido y con el fin de estimar la potencia de recepción de señal deseada del enlace, se calculó un balance del enlace que empleó el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata. A partir de los valores calculados se estimó la SNR para los diferentes puntos de prueba del enlace en el recorrido y se realizaron gráficas de la BER contra SNR. La curva para la velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps tiende a asociar valores de SNR negativos para valores de la BER. Los valores de SNR negativos se deben a la técnica de transmisión utilizada por LoRa[®], en la cual a mayor factor de ensanchamiento (menor velocidad de transmisión de datos) menor es la relación SNR mínima, lo que permite obtener un menor valor de sensibilidad y por lo tanto un mayor alcance. El alcance del sistema a distintas velocidades de transmisión de datos permite verificar que la sensibilidad esta cambiando, esta ganancia sobre el enlace es debida a la ganancia de procesamiento o factor asociado directamente al factor de ensanchamiento.
- De las pruebas realizadas sobre el enlace se obtuvieron gráficas de la BER contra SNR a partir de los valores de potencia de recepción estimados mediante la herramienta Radio Mobile. Las curvas para las velocidades de transmisión de datos de 1 Kbps, 10 Kbps y 25 Kbps asocian valores positivos de SNR. Los valores de SNR positivos se deben a que la herramienta Radio Mobile emplea el modelo Longley-Rice, el cual es un modelo de predicción troposférica para transmisión radio sobre terreno irregular en enlaces de largo-medio alcance, en el que las pérdidas obtenidas fueron más bajas que las estimadas mediante el balance del enlace.

- De las pruebas realizadas sobre el enlace se obtuvieron gráficas de la BER contra SNR a partir de los valores de potencia de recepción estimados mediante la herramienta *Sigfox Coverage Tool* de QGIS que emplea el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata. La curva para la velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps asocia valores negativos de SNR. Estos valores de SNR son mayores a los valores de SNR calculados con el balance del enlace para la misma BER. La diferencia entre los valores de SNR se debe a que la herramienta *Sigfox Coverage Tool* de QGIS emplea el modelo de pérdidas de propagación Okumura-Hata, pero, a diferencia del balance del enlace calculado, también considera la información topográfica del municipio El Tambo (Cauca), lo que asocia pérdidas adicionales por difracción.
- Se emplearon tres formas distintas para estimar la potencia de recepción deseada en el sistema: inicialmente se calculó un balance del enlace que empleó el modelo de pérdidas de propagación Okumura-Hata; la segunda forma fue a través de la herramienta Radio Mobile que emplea el modelo Longley-Rice; y finalmente, la tercera forma fue estimar la potencia de recepción mediante la herramienta *Sigfox Coverage Tool* de QGIS que emplea el modelo de pérdidas de propagación de Okumura-Hata e incluye una estimación de las pérdidas por difracción en función del escenario. A los tres métodos se les agregó un margen de desvanecimiento o pérdidas adicionales con el fin de que la potencia recibida según la herramienta de simulación o el balance del enlace coincida con el valor de sensibilidad de la tarjeta E32-433T30D, el margen pérdidas adicionales que se agregó a Okumura-Hata, Radio Mobile y *Sigfox Coverage Tool* de QGIS fue de 51.08 dB, 10.7 dB y 20.4 dB, respectivamente.
- Se estimó la cobertura para el municipio El Tambo (Cauca) empleando la herramienta *Sigfox Coverage Tool* de QGIS. A cada uno de los 14 puntos geográficos desde donde se transmitió información a una velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps, se asoció un valor de potencia de recepción y una PER que al compararla con las pruebas realizadas sobre la zona, muestran, para distancias de hasta 4 Km, que a mayor potencia de recepción menor es la PER (ver Fig. 80). Se realizó una simulación del sistema con las mismas características en la vereda Quintana, la cual se presenta en la Fig. 88. Los resultados indican un alcance de 3 Km ubicando la BS en la Institución Educativa las Huacas. Teniendo en cuenta que la comunidad de Quintana recorre trayectos de aproximadamente 3 Km, el sistema prototipo sería adecuado como herramienta en la gestión de riesgo, lo cual le permitirá a la comunidad de Quintana conocer la posición geográfica de los usuarios del sistema, y adicionalmente contar con una herramienta que permita en todo momento conocer donde se encuentran los niños y niñas en el trayecto de la casa a la escuela o viceversa.
- La utilización de QGIS y la API de Leaflet permiten implementar mapas geográficos en paginas web sin acceso a la red de Internet, además incluyen una función de georeferenciación para ilustrar zonas con un alto nivel de relieve, como es el caso de la vereda Quintana.
- La librería *serial.py* de python permite realizar una comunicación directa entre un arduino y un servidor, lo cual permite la implementación de arquitecturas de red

basados en LoRa[®] en los que no es estrictamente necesaria la utilización de pasarelas LoRa[®].

- Se calculó el tiempo de duración de la batería del dispositivo, la cual tiene una capacidad de 8000 mAh. Los resultados indican una duración de: 129.39 horas cuando la MS se encuentra en constante funcionamiento y no reporta un estado de alerta (estado de operación normal); y de 125.65 horas cuando la MS se encuentra en constante funcionamiento y en estado de alerta. El tiempo de duración de la batería del dispositivo es aproximadamente de 5 días en constante funcionamiento, por lo tanto, si el tiempo de uso diario de la MS es menor a 24 h, el tiempo de la duración de la batería se incrementará proporcionalmente.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo de grado implementó un sistema prototipo de localización y comunicación vía radio con tecnología LoRa[®] para la gestión del riesgo en un escenario rural. El sistema prototipo es una herramienta de comunicación de datos, que permitirá a las comunidades rurales expuestas a diferentes riesgos, ya sean naturales, seminaturales o antrópicos, informarse de la existencia de estos riesgos de manera rápida y oportuna, a través de una alerta. La comunicación de la alerta se realiza con el fin de evitar que se presenten lesiones físicas, pérdidas humanas y materiales. El sistema ofrece el servicio de localización a través de una página web en la que se puede visualizar un mapa con la posición geográfica de los usuarios. La página web ofrece funcionalidades de administración del sistema prototipo, para observar la posición geográfica de los usuarios, generar alertas, atender alertas, asignar las MS y administrar los usuarios. El presente trabajo de grado tuvo principal interés en la Institución Educativa Las Huacas – Sede Quintana, ubicada en la zona rural del municipio de Popayán, con el fin de brindar seguridad a la comunidad, y sobretodo a los niños y niñas en sus desplazamientos de la casa al colegio y del colegio a la casa, y como una herramienta de comunicación en la gestión del riesgo ambiental, acorde con los objetivos planteados en el proyecto de investigación asociado, el cual se denomina “uso y apropiación de las tecnologías de información y comunicación para la gestión del riesgo en el ámbito rural: una respuesta al desafío del cambio climático desde la escuela” [3].

- En este trabajo de grado se construyó un sistema prototipo de localización y comunicación de datos vía radio basado en tecnología LoRa[®], para la gestión de riesgo en el sector rural del municipio de Popayán, departamento del Cauca. La adaptación de la tecnología LoRa[®], permitió desplegar una red de bajo costo y comunicación de largo alcance. Se empleó la combinación de diferentes herramientas como, por ejemplo: el uso de diferentes lenguajes de programación, herramientas de sistemas de información geográfica y tecnología LoRa[®]. Mediante las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos, se determinó que la tecnología LoRa[®] es adecuada para aplicaciones de localización y comunicación de datos en zonas rurales.
- En este trabajo de grado se diseñó e implementó un sistema prototipo de localización y comunicación de datos vía radio utilizando tecnología LoRa[®] para un escenario rural, que permitió brindar servicios de localización, comunicación de datos y reporte de eventos, como herramientas de un sistema de gestión del riesgo en zonas rurales. El diseño definió tres componentes principales: la MS, la BS y el sistema de comunicación inalámbrico LoRa[®], lo cual permitió establecer el funcionamiento

general del sistema, el intercambio de mensajes entre los tres componentes y sus funciones individuales.

- En este trabajo de grado se evaluó el adecuado desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos utilizando tecnología LoRa[®], ya que se obtuvo un correcto funcionamiento para aplicaciones de localización y comunicación de datos en zonas rurales como mecanismo de gestión del riesgo, permitiendo establecer comunicaciones bidireccionales a distancias de alrededor de 9.4 Km en El Tambo (Cauca) a una velocidad de transmisión de datos de 1 Kbps y un ancho de banda de 125 KHz, siendo la opción que mayor cobertura ofreció para el servicio de localización.
- La tecnología LoRa[®] define una técnica de modulación CSS para establecer comunicaciones inalámbricas de largo alcance y baja potencia. La eficiencia espectral definida para la tecnología LoRa[®] es baja en comparación con otras tecnologías de banda estrecha. Sin embargo, LoRa[®] ofrece la posibilidad de reutilizar el ancho de banda empleado mediante la combinación de canales ortogonales con diferentes factores de ensanchamiento y anchos de banda. La mayoría de aplicaciones basadas en la tecnología LoRa[®] utilizan un nodo pasarela LoRa[®] y varios nodos finales aprovechando las ventajas del protocolo LoRaWAN. En cambio, en este trabajo de grado se emplearon dos nodos finales LoRa[®] para conformar una red LoRa[®] definida en función de una BS y varias MS, lo cual hace posible la implementación de redes más simples y económicas.
- Las baterías son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica que se utilizan para alimentar a la MS, cuya capacidad se define en miliamperios por hora (mAh) e indica la cantidad de energía almacenada. Para la mayoría de aplicaciones de conectividad a larga distancia que emplean LoRa[®] se define una duración de la batería de 5 a 12 años. De las pruebas realizadas sobre el sistema, se define una duración promedio de 5 días, donde el mayor consumo de energía proviene de los dispositivos encargados de la obtención y procesamiento de los datos. Por lo anterior, se concluye que para futuros sistemas de telecomunicaciones basados en la tecnología LoRa[®], es importante emplear estrategias que optimicen la duración de las baterías teniendo en cuenta el consumo eléctrico de los componentes adicionales al módulo LoRa.
- La gestión del riesgo contribuye a disminuir las consecuencias de pérdidas humanas, físicas o materiales debido a desastres de origen natural, antrópico o semi-antrópico. Los riesgos de origen natural afectan principalmente a las comunidades rurales, como es el caso de la comunidad de Quintana, ubicada en el municipio de Popayán (Cauca). Actualmente existen diversos programas con proyectos para la implementación de estrategias para la gestión del riesgo en zonas rurales de Colombia, sin embargo, los esfuerzos no llegan a la mayoría de las zonas rurales en el país, por esta razón, la construcción de herramientas para la gestión del riesgo en zonas rurales, de bajo costo, soportadas en TIC y que hacen uso de tecnologías IoT, representan una solución conveniente que adicionalmente brinda seguridad a las familias en zonas rurales, especialmente de los niños y niñas en el recorrido de sus hogares hasta las instituciones educativas.

- En el diseño del sistema prototipo se empleó una topología en estrella en la cual las MS están conectadas directamente a una BS. Se identificaron dos ventajas importantes al implementar esta topología: la primera es la facilidad de agregar una nueva MS al sistema, debido a que solo se requiere de la configuración de una comunicación punto a punto entre la MS y la BS; la segunda ventaja esta relacionada con la independencia de los enlaces de comunicación, razón por la cual, si un enlace falla no altera el funcionamiento de todo el sistema prototipo. De las pruebas realizadas se observó que la topología en estrella es adecuada para el tipo de aplicación planteada, ya que con una sola BS se establece la cobertura necesaria para ofrecer el servicio de localización y comunicación de datos a una comunidad rural en un rango de alcance de aproximadamente 3 Km.
- La técnica de modulación de espectro ensanchado tipo Chirp define cuatro parámetros para la transmisión de la información, estos son: el factor de ensanchamiento, que establece la cantidad de bits que se utilizan para construir un símbolo y determina el valor de la ganancia de procesamiento; la velocidad de transmisión de datos; la tasa de codificación de canal, la cual es opcional y contribuye a la detección y corrección de errores en el destino; y el ancho de banda, que es directamente proporcional a la velocidad de transmisión de datos. En la técnica de modulación CSS los símbolos se diferencian entre sí por el valor de frecuencia de inicio y finalización del símbolo. Un símbolo esta compuesto por 2^{SF} chips los cuales a la velocidad de transmisión de chip recorren el ancho de banda configurado. Una de las principales características que se destacan en un sistema CSS es que la velocidad de transmisión de chip es igual al ancho de banda del sistema. La anterior característica es la que permite establecer una relación entre los parámetros para la transmisión de la información, con el fin de realizar diseños de enlaces de telecomunicaciones para las distintas aplicaciones basadas en la tecnología LoRa.

6.2 LECCIONES APRENDIDAS

- Antes de emprender cualquier investigación es importante definir el planteamiento del problema, ya que todo el trabajo de grado se orientará a dar respuesta a la pregunta de investigación y cumplir con los objetivos planteados. Se recomienda para el planteamiento del problema iniciar con literatura general y progresivamente incluir documentación más específica en función del tema escogido. La formulación adecuada del problema de investigación permite desarrollar de una mejor forma las posteriores fases de la investigación.
- La comunicación entre el arduino y un servidor puede hacerse a través de Python empleando la librería serial.py. Este hecho resulta sumamente útil cuando se quiere evitar interfaces de comunicación adicionales para la transmisión de la información.
- Para el correcto intercambio de mensajes en la BS fue necesaria la interacción entre los diferentes lenguajes. Por lo tanto, es importante una adecuada organización de código para optimizar las funciones y procedimientos que permiten una identificación y una corrección de errores más eficiente durante la construcción de los programas.

- En la implementación de la MS fue necesario configurar la lectura serial en el microcontrolador, estableciendo diferentes canales seriales de comunicación en los que se realizaron lecturas secuenciales para la recepción y transmisión de la información hacia la BS. Esto fue necesario, ya que debido a las características del microcontrolador arduino nano, no se pueden establecer dos canales seriales simultáneos. Un canal serial se destinó para la comunicación con la tarjeta LoRa y el otro canal serial para la comunicación con el modulo GPS.
- Es importante definir un plan de pruebas antes de iniciar con las actividades relacionadas con el trabajo de campo. La definición apropiada de un plan de pruebas permitió definir actividades para lograr los objetivos del trabajo de grado. La correcta ejecución del plan de pruebas facilitó la obtención de resultados y su análisis.
- La metodología es una herramienta útil y adecuada para el desarrollo de un trabajo de grado, ya que permite realizar la organización y ejecución de las etapas para el desarrollo del sistema prototipo, estableciendo un plan de trabajo que a su vez permite que el análisis de requerimientos, el diseño, la implementación y la realización de pruebas, se lleven cabo de manera organizada logrando una gestión adecuada de tiempo y recursos. Es importante definir una metodología adecuada y adaptable al trabajo a realizar.
- Se recomienda realizar una correcta soldadura de las tarjetas, ya que, por ejemplo, en este trabajo de grado, la MS estuvo en constante movimiento por lo que fue necesario reforzar los contactos entre los pines.

6.3 TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo de grado como cualquier otro proyecto de investigación, deja abiertas líneas de investigación en las que es posible continuar explorando. Durante el desarrollo del presente trabajo de grado han surgido algunas líneas que se han dejado abiertas y que se espera se puedan estudiar en un futuro, algunas de ellas están más directamente relacionadas con este trabajo de grado y son el resultado de las observaciones realizadas durante la realización del mismo.

A continuación se presentan algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse como continuación de esta investigación así como otros temas que no fueron tratados con suficiente profundidad debido a que estaban fuera del alcance de este trabajo de grado. Además, se sugieren algunos desarrollos específicos para apoyar y mejorar el modelo y metodología propuestos. Entre los posibles trabajos futuros se destacan:

- Análisis del número de usuarios simultáneos que el sistema prototipo puede soportar.
- Construir una aplicación móvil que se integre con la base de datos del sistema, para que cualquier usuario pueda acceder a la información y posición de los usuarios desde cualquier lugar con acceso a Internet.
- Realizar pruebas de funcionalidad del sistema en un ambiente urbano, para determinar la cobertura de la BS y la pérdida de información de los paquetes.

- Realizar un diseño del sistema en el que el nodo LoRa[®] de la BS sea un nodo pasarela LoRa[®], con el fin de determinar la mejora en desempeño del nuevo sistema con referencia al sistema desarrollado en este trabajo de grado.
- Agregar sensores de humo, temperatura, humedad o proximidad a la MS, con el objetivo de obtener mayor información de la condiciones ambientales en la que se encuentra el usuario del sistema, y tomar decisiones para la gestión del riesgo basados en los datos obtenidos por los sensores.

REFERENCIAS

- [1] J. L. Berné Valero, N. Garrido Villén, y R. Capilla Romá, GNSS: GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU: fundamentos y métodos de posicionamiento. Valencia, España: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2019.
- [2] "Diagnóstico y base del municipio de Popayán departamento del Cauca con énfasis en los resguardos indígenas de Poblazón y Quintana y territorio campesino ASO-CAMPO y ASOPROQUINATANA". Organización Panamericana de la Salud (2011), [En línea], Disponible: <https://www.sdgfund.org/sites/default/files/Colombia>. (consultado el 14 de Enero de 2021).
- [3] "Uso y apropiación de las tecnologías de información y comunicación para la gestión del riesgo en el ámbito rural: una respuesta al desafío del cambio climático desde la escuela", Grupo de radio e inalámbricas, Proyecto de Investigación, Universidad del Cauca, Popayán, 2020, [En línea], Disponible: <http://grialunicauca.co/proyecto-gestion-riesgo-quintana/>. (consultado el 12 de Febrero de 2021).
- [4] A. Vega Ayala, "Análisis comparativo de la técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP) y diferencial GNSS (DGNSS) para áreas urbanas y estaciones de referencia de operación continua (CORS) de la red The Multi-GNSS Experiment (MGEX)." Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacan, 2020.
- [5] A. El-Rabbany, *Introduction to GPS: The Global Positioning System*. Boston, London: Artech House, 2002.
- [6] Y. Urlichich, V. Subbotin, G. Stupak, V. Dvorkin, A. Povalyaev, y S. Karutin, "GLONASS Modernization," *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS)*, Portland, OR, pp.3125-3128, 2011.
- [7] "Galileo: el Sistema Global de Navegación por Satélite Europeo" *European Global Navigation Satellite System Agency* (2018), [En línea], Disponible: <https://www.gsa.europa.eu/galileo-el-sistema-global-de-navegacion-por-satelite-europeo>. (consultado el 13 de febrero de 2021).
- [8] S. A. García Bahón y E. Portillo Aldana, "Ciencia, tecnología y sociedad: entorno global en el desarrollo del GPS." Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Telemática y Electrónica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- [9] M. E. Cortés Gonzales, "Sistemas de localización en UMTS." Tesis de pregrado, Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones, Escuela Superior de Ingenieros, Sevilla, 2009.
- [10] S. Hernández Caballero, "Estudio en detalle de LoRaWAN. comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico." Tesis de Máster, Departamento de Ingeniería Telemática y Electrónica, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, 2020.

-
- [11] B. Y. León Ávila, Y. R. Hernández Cabrera, y L. A. Quintero Domínguez, "Retos de la 5G en el despliegue del IoT." en Instructions for preparing informática Habana convention's paper, La Habana, Marzo 2020.
- [12] A. Yegin, T. Kramp, P. Dufour, R. Gupta, R. Soss, O. Hersent, D. Hunt, y N. Sornin, *3 - LoRaWAN protocol: specifications, security, and capabilities* . Academic Press, pp. 37-63, 2020.
- [13] B. S. Chaudhari y M. Zennaro, "Introduction to low-power wide-area networks," *in LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, pp. 1–13, Elsevier, 2020.
- [14] SIGFOX, "The global communications service provider for the internet of things (2020)", [En línea], Disponible: <https://www.sigfox.com/en>. (consultado el 10 de Septiembre de 2020).
- [15] C. Gomez, J. C. Veras, R. Vidal, L. Casals, y J. Paradells, "A Sigfox Energy Consumption Model." *Sensors*, Castelldefels, 2019.
- [16] I. Ordóñez Monfort, "Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa." Tesis de pregrado, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, Junio 2017.
- [17] LoRa - Eric B, "LoRa documentation" (2018), [En línea], Disponible: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>. (consultado el 15 de Noviembre de 2020).
- [18] D. Jiménez y A. Ballart, "Estudio de la cobertura de la modulación lora en la banda de 915[mhz] en un ambiente urbano," Tesis de pregrado, Universidad de Chile, 2018.
- [19] A. Rojas, "Mapa Rural de la Ciudad de Popayán, Departamento del Cauca".
- [20] M. E. Sandoval López, "Ruta de transición agroecológica como propuesta de adaptación al cambio climático del sistema ganaría en las comunidades campesinas de Quintana municipio de Popayán Cauca." Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias agropecuarias, Universidad del Cauca, Popayán, 2013.
- [21] RCN, "El índice de homicidios en El Tambo, Cauca, aumentó un 200 %", (2009), [En línea], Disponible: <https://www.noticiasrcn.com/nacional/el-indice-de-homicidios-en-el-tambo-cauca-aumento-un-200-361827> (consultado el 30 de Agosto de 2020).
- [22] A. J. M. Acosta, E. A. Riveros, C. H. A. Walteros, and A. R. Romero, "Sistema de información geografica municipal 2013 actualización," p. 15.
- [23] C. Vela "Alcaldía Municipal de El Tambo Cauca", [En línea], Disponible: <http://www.eltambo-cauca.gov.co/> (consultado el 24 de Agosto de Mayo).
- [24] L. G. Castro, "Gestión del riesgo, riesgo y amenaza (2015)." [En Línea], Disponible: <https://luigie2.wixsite.com/admonrecursos/single-post/2015/11/20/gestión-delriesgo>. (consultado el 30 de Marzo de 2021).

-
- [25] G. Barrantes Castillo y R. Márquez Reyes, "De la atención del desastre a la gestión del riesgo: una visión desde la geografía," *Revista Geográfica de América Central*. Vol. 2, No. 47, pp. 15–38, San José, 2011.
- [26] A. Campos G, C. Díaz, D. M. Rubiano V, y C. R. Costa P, *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial, Bogotá, 2012.
- [27] H. García R, *Deforestación en Colombia: Retos y perspectivas* . Fedesarrollo, Bogotá, 2012.
- [28] A. Capacci y S. Mangano, "Las catástrofes naturales," . *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, vol. 24, n. 2, pp. 35-51, jul. 2015.
- [29] I. Sommerville F., *Ingeniería del Software*. Pearson Education S.A., Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad de Alicante, séptima ed. Madrid, 2005.
- [30] Technical hands SAS - electronic, "Módulo GPS NEO 6" (2019), [En Línea] Disponible: <https://technicalhands.com.co/product/modulo-gps-neo-6/>. (consultado el 10 de Marzo de 2019).
- [31] EBYTE, "Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd." (2020), [En línea], Disponible: <http://www.ebyte.com/en/product-view-news.aspx?id=108>. (consultado el 10 de Marzo de 2019).
- [32] Banyancin, "Antenna manufacturer dropshipping Store " (2020), [En línea] Disponible: https://banyangxing.es.aliexpress.com/store/sale-items/4699021.html?origin=nisFreeShip&SortType=bestmatch_sort&promotionType=sale. (consultado el 10 de Marzo de 2019).
- [33] RedGps, "Soluciones para cada vertical de rastreo" (2020), [En línea], Disponible: <https://www.redgps.com/dispositivos-iot/arduino-nano>. (consultado el 10 de Marzo de 2019).
- [34] E. O. Navarro Astudillo, "Herramienta prototipo software de estimación de cobertura radioeléctrica para la planificación de una red IoT." Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayan, 2019.
- [35] D. C. Borda White, "Estudio técnico de modelos de propagación de cobertura en el servicio de televisión digital terrestre," p. 73, 2019.