



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones

Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autor :

Pablo Esteban Avila Campos C.I. 0105737118

Director :

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD C.I. 0103907036

Co-Director :

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD C.I. 0301496840

Cuenca - Ecuador

2017



Resumen

Las redes de bajo consumo y amplia área de cobertura ([Low Power Wide Area Network \(LPWAN\)](#)) se presentan como una nueva tendencia en la evolución de las telecomunicaciones, una de las tecnologías que ha surgido como parte de las LPWAN, es [Long Range \(LoRa\)](#); además de las claras ventajas de las LPWAN, [LoRa](#) se caracteriza por el bajo costo de los nodos y un rápido despliegue.

En este momento, surgen nuevos paradigmas en las redes de comunicaciones, como el Internet de las cosas ([Internet of Things \(IoT\)](#)), cuyas necesidades son solventadas en tecnologías aún en desarrollo como 5G, es por esta razón que grupos de desarrollo como [LoRa Alliance](#), proponen soluciones como [Long Range Wide Area Network \(LoRaWAN\)](#) para solventar las necesidades del mercado. [LoRaWAN](#), se define como una capa de [Media Access Control Layer \(MAC\)](#) que utiliza las características de [LoRa](#) para crear redes enfocadas en [IoT](#).

El propósito de este estudio es ajustar modelos de pérdidas de propagación utilizando mediciones del Indicador de Nivel de Señal Recibida ([Received Signal Strength Indicator \(RSSI\)](#)) y el Radio Señal a Ruido ([Signal to Noise Ratio \(SNR\)](#)) en diferentes ambientes, relacionados con el despliegue de redes de sensores en ambientes forestales, específicamente en riveras de ríos. Con estos modelos se pretende dar respuesta a la hipótesis de que en ambientes rurales se tendrá una mejor cobertura que en entornos urbanos.

La metodología utilizada consiste en el envío y captura de mensajes [LoRaWAN](#) con el kit de desarrollo 900 de Microchip. Estos envíos se realizan en intervalos de diez metros a una altura fija de dos metros sobre el nivel del suelo. En cada punto de envío, se transmiten veinte mensajes, diez de ellos con la mayor tasa de datos ([Data Rate \(DR\)](#)) y diez con la menor permitidos por el kit mencionado. El número de mensajes recibidos se utiliza como parámetro de calidad de cada transmisión, ayudando a determinar cuando ya no es factible enviar información.

Como resultados se demostró que en ambientes rurales en comparación a los urbanos, la cobertura mejora hasta en un 40 % con el mayor [DR](#) y un 60 % con el menor. Ambos [DR](#) presentan

modelos similares hasta determinada distancia que depende del ambiente medido. Esto demostraría que se debe usar un **DR** mayor siempre y cuando exista cobertura ya que su uso se traduciría en un menor consumo energético por un menor tiempo aire. Otro de los resultados que se presentan es que en ambientes urbanos existe mayor desviación estándar en las muestras. Esto confirmaría y está directamente relacionado con la mayor densidad de obstáculos, provocando también que los modelos ajustados en ambientes rurales, sean más confiables. Finalmente, se realizaron test estadísticos que comparan las distribuciones en los tres ambientes, confirmando la necesidad de caracterizar los ambientes de manera independiente.

Palabras clave : **LoRa, LoRaWAN, IoT, RSSI, SNR, pérdidas, forestal, río, propagación, modelo.**



Abstract

LPWAN are a new trend in the telecommunications evolution. One of the technologies that has emerged as part of **LPWAN**, is **LoRa**. In addition to the clear advantages of **LPWAN**, **LoRa** is characterized by low cost of nodes and rapid deployment.

At the moment, new paradigms as the **IoT** emerge in the telecommunications networks, whose needs are solved in technologies still in development like 5G. It is for this reason that development groups like **LoRa Alliance**, propose solutions like **LoRaWAN** to solve the needs of the market. **LoRaWAN**, is defined as a **MAC** that uses **LoRa** features to create networks focused on **IoT**.

The purpose of this study is to adjust propagation loss models using Received Signal Strength Indicator (**RSSI**) and Signal to Noise Ratio (**SNR**) measurements in different environments, related to the deployment of sensor networks in forest environments, specifically on riverbanks. These models are intended to answer the hypothesis that rural environments will have better coverage than urban.

The methodology consists in sending and capture messages **LoRaWAN** with the Microchip development kit 900. The transmissions are made at intervals of ten meters at a fixed height of two meters above ground level. At each point of transmission, twenty messages are transmitted. Ten with the highest data rate (**DR**) and ten with the lowest allowed by the kit. The number of received packets is used as the quality parameter of each transmission, helping to determine when it is no longer feasible to send information.

As a result, it is shown that coverage improved by up to 40 % with the highest **DR** and 60 % with the lowest comparing rural with urban environment. Both **DR** present similar models up to a certain distance depending on the measured environment. This would demonstrate that a higher **DR** should be used as long as there is coverage since its use would result in lower energy consumption. Another result found is a greater standard deviation in urban environment. This would confirm and is directly related to the greater density of obstacles, also causing the adjusted

models in rural environments, to be more reliable. Finally, we performed statistical tests that compared the distributions in the three environments, confirming the need to characterize the environments independently.

Keywords : **LoRa**, **LoRaWAN**, **IoT**, **RSSI**, **SNR**, path loss, forested, riverside, propagation, model



Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVII
Dedicatoria	XXII
Agradecimientos	XXIII
Abreviaciones y acrónimos	XXIV
1. Introducción	2
1.1. Identificación del Problema	3
1.2. Justificación	3
1.3. Alcance	4
1.4. Objetivos	5



1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Introducción	7
2.2. Redes de Sensores Inalámbricos	7
2.2.1. Principales Tecnologías de IoT	8
2.3. Redes de Amplia Cobertura y Baja Potencia (LPWAN)	9
2.3.1. Características Principales de una red LPWAN	9
2.4. Aspectos básicos de la modulación LoRa	9
2.4.1. Principios del Espectro Ensanchado	10
2.4.2. Espectro Ensanchado LoRa	11
2.4.3. Parámetros de Transmisión	12
2.4.4. Propiedades Clave de la Modulación LoRa	12
2.5. LoRa MAC: LoRaWAN	13
2.5.1. Clases en LoRaWAN	15
2.5.2. Formatos de Mensajes Físicos - Clase A	16
2.5.3. Formatos de Mensajes MAC - Clase A	17
2.5.4. Activación de Dispositivos Finales	18
2.5.5. Tasa de Datos (DR) y Potencia de Transmisión	19
2.6. Modelo de Pérdidas de Trayectoria	20
2.7. Conclusiones	21
3. Estado del Arte de LoRa y LoRaWAN	23



3.1. Introducción	24
3.2. Capa Física - LoRa	24
3.3. Capa MAC	26
3.4. Análisis del Sistema	27
3.5. Conclusiones	28
4. Metodología	29
4.1. Introducción	30
4.2. Descripción de Equipos	30
4.2.1. Kit de Evaluación de LoRa - 900	30
4.2.2. Raspberry Pi 3 Modelo B	32
4.2.3. Disposición de Equipos	32
4.3. Configuración de Dispositivos	33
4.4. Descripción del Ambiente	33
4.4.1. Ambiente 1: Urbano - Río Tomebamba	34
4.4.2. Ambiente 2: Semiurbano - Río Machángara	35
4.4.3. Ambiente 3: Rural - Río Yanuncay	36
4.5. Descripción del Procedimiento	38
4.5.1. Intervalos de Medición	38
4.5.2. Paquetes Enviados	38
4.5.3. Captura de Paquetes	39
4.5.4. Descriptado y Almacenamiento	40
4.6. Métricas de Análisis de Datos	40



4.6.1. Descripción de Datos con Medidas Numéricas	40
4.6.2. Estimación de Intervalos de Confianza	41
4.6.3. Análisis de Correlación	41
4.6.4. Comparación de Poblaciones	42
4.7. Conclusiones	42
5. Resultados: Análisis de Mediciones y Ajuste del Modelo Empírico basado en RSSI y SNR	44
5.1. Introducción	45
5.2. Mediciones Previas	45
5.2.1. Salto de Frecuencia	45
5.2.2. Cantidad de Paquetes	46
5.2.3. Índice de Potencia	46
5.3. Mediciones de RSSI y SNR	47
5.4. Análisis Estadísticos	49
5.4.1. Correlación	49
5.4.2. Comparación de Ambientes	49
5.5. Modelamiento en Base a Pérdidas de Trayectoria	51
5.5.1. Medición 1 - Ambiente Urbano	52
5.5.2. Medición 2 - Ambiente Urbano - Orilla 2	53
5.5.3. Medición 3 - Ambiente Semiurbano	53
5.5.4. Medición 4 - Ambiente Rural	55
5.5.5. Comparación de Modelos	57
5.6. Tasa de Errores de Paquetes	59



5.7. Conclusiones	62
6. Conclusiones y Recomendaciones	63
6.1. Conclusiones	64
6.2. Recomendaciones	64
6.3. Trabajos Futuros	65
A. Configuración de Dispositivos	68
A.1. Instalación y configuración del servidor y Gateway LoRaWAN	68
A.1.1. Instalación	69
A.1.2. Preparación del Sistema	70
A.1.3. Configuración del Servidor	73
A.1.4. Configuración de Red	75
A.1.5. Configuración Adicional para 915 MHz	78
A.2. Configuración del Nodo	79
B. Descriptado y Almacenamiento	84
B.1. Descriptación de Paquetes - LoRaWAN	85
B.2. Descriptado y Almacenaje	86
C. Mediciones de RSSI y SNR	91
C.1. Mediciones de RSSI	92
C.2. Mediciones de SNR	96
Bibliografía	101





Índice de figuras

2.1. Proceso de ensanchamiento [1]	10
2.2. Extracto del Espectrograma de un chirp (SF=8, BW=125kHz) [2]	11
2.3. Arquitectura del sistema LoRaWAN [3]	14
2.4. Arquitectura del protocolo LoRaWAN [3]	14
2.5. Clases LoRaWAN	15
2.6. Estructura Física de Uplink[4]	16
2.7. Estructura Física de Downlink[4]	16
2.8. Temporización de Recepción[4]	16
2.9. Formato de Mensaje LoRa[4]	17
3.1. Comparación de coberturas	26
4.1. Kit de Evaluación de LoRa - 900 [5]	31
4.2. Tarjeta RF y Gateway [6]	31
4.3. Mota LoRa [7]	32
4.4. Raspberry Pi 3 modelo B [8]	33
4.5. Disposición Física de Dispositivos	33



4.6. Ambiente 1 - Río Tomebamba	34
4.7. Ambiente 1 - Esquema de Elevación	35
4.8. Ambiente 2 - Río Machángara	36
4.9. Ambiente 3 - Río Yanuncay	37
4.10. Ambiente 3 - Esquema de Elevación	37
4.11. Captura de Paquetes	39
5.1. Valores de <i>RSSI</i> obtenidos para las diferentes frecuencias	46
5.2. Medición de <i>RSSI</i> en Ambiente 1 con DR0	48
5.3. Medición de <i>SNR</i> en Ambiente 1 con DR0	48
5.4. Análisis de Correlación de <i>RSSI</i> con DR0 - Ambiente 1	50
5.5. Análisis de Correlación de <i>RSSI</i> con DR3 - Ambiente 1	50
5.6. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 1 con DR0 - Río Tomebamba	52
5.7. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 1 con DR3 - Río Tomebamba	53
5.8. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 1 con DR0, orilla 2 - Río Tomebamba	54
5.9. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 1 con DR3, orilla 2 - Río Tomebamba	54
5.10. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 2 con DR0 - Río Machángara	55
5.11. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 2 con DR3 - Río Machángara	56
5.12. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 3 con DR0 - Río Yanuncay	56
5.13. Ajuste de <i>PL</i> del Ambiente 3 con DR3 - Río Yanuncay	57
5.14. Ajustes de <i>PL</i> con DR0 - Todos los Ambientes	58
5.15. Ajustes de <i>PL</i> con DR3 - Todos los Ambientes	59
5.16. Tendencia de Promedios de Pérdidas de Paquetes con DR0 - Medición 1	60



5.17. Promedios de Pérdidas de Paquetes con DR0 - Todos los Ambientes	61
5.18. Promedios de Pérdidas de Paquetes con DR3 - Todos los Ambientes	61
A.1. Esquema de configuración del kit LoRa [9]	69
A.2. Instalación de la suite de desarrollo de LoRa	70
A.3. Virtualización de Docker en Windows	71
A.4. Reglas de Reenvío de Puertos	72
A.5. Configuración de IP estática en adaptador de red Ethernet	73
A.6. Terminal Docker	74
A.7. Software de Utilidades de LoRa Microchip	75
A.8. Software de Utilidades de LoRa Microchip - Gateway	76
A.9. Configuración para Personalización Auto-Creada	77
A.10. Conexión con el servidor MySQL	77
A.11. Habilitación de ocho canales en el módulo RN	78
A.12. Envío de un mensaje Uplink desde el módulo RN	79
A.13. Cambio de Región del Gateway	79
C.1. Medición de RSSI del Ambiente 1 con DR0 - Río Tomebamba	92
C.2. Medición de RSSI del Ambiente 1 con DR3 - Río Tomebamba	93
C.3. Medición de RSSI del Ambiente 1, orilla 2 con DR0 - Río Tomebamba	93
C.4. Medición de RSSI del Ambiente 1, orilla 2 con DR3 - Río Tomebamba	94
C.5. Medición de RSSI del Ambiente 2 con DR0 - Río Machángara	94
C.6. Medición de RSSI del Ambiente 2 con DR3 - Río Machángara	95
C.7. Medición de RSSI del Ambiente 3 con DR0 - Río Yanuncay	95



C.8. Medición de RSSI del Ambiente 3 con DR3 - Río Yanuncay	96
C.9. Medición de SNR del Ambiente 1 con DR0 - Río Tomebamba	97
C.10. Medición de SNR del Ambiente 1 con DR3 - Río Tomebamba	97
C.11. Medición de SNR del Ambiente 1, orilla 2 con DR0 - Río Tomebamba	98
C.12. Medición de SNR del Ambiente 1, orilla 2 con DR3 - Río Tomebamba	98
C.13. Medición de SNR del Ambiente 2 con DR0 - Río Machángara	99
C.14. Medición de SNR del Ambiente 2 con DR3 - Río Machángara	99
C.15. Medición de SNR del Ambiente 3 con DR0 - Río Yanuncay	100
C.16. Medición de SNR del Ambiente 3 con DR3 - Río Yanuncay	100



Índice de tablas

2.1. Descripción de campos del mensaje MAC	17
2.2. Direcciones Almacenadas en el Dispositivo Final	18
2.3. Tabla de tasas de Datos (DR) [4]	19
2.4. Tabla de potencias de Transmisión [4]	20
4.1. Tasas de Datos Permitidas	39
5.1. Resultados de Desviación Estándar con diferentes número de paquetes	47
5.2. Variación de Índices de Potencia	47
5.3. Valores P del Test de Dunn	51
5.4. Valores utilizados para el cálculo de las pérdidas de trayectoria	52
5.5. Comparación de Características de Propagación con DR0	58
5.6. Comparación de Características de Propagación con DR3	59

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Pablo Esteban Avila Campos, autor del trabajo de titulación "Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 25 de octubre de 2017



Pablo Esteban Avila Campos

C.I: 0105737118

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Pablo Esteban Avila Campos, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 25 de octubre de 2017



Pablo Esteban Avila Campos

C.I: 0105737118



Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales, fue dirigido y revisado por mi persona.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'D. Astudillo Salinas', written over a horizontal line.

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD
Director



Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales, fue dirigido y revisado por mi persona.

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'A. VÁZQUEZ', written over a horizontal line.

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD
Co-Director



Dedicatoria

A mi madre Gloria.

Por el ejemplo de perseverancia y constancia que la caracterizan, por sus consejos, valores y la motivación que siempre me ha dado, lo que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

Pablo Avila



Agradecimientos

A mis familiares.

A mis tíos Olga, Lucy, Hugo, Fredy, Diana, mi abuela Carmela, mi padre Manuel y a todos aquellos que siempre me apoyaron, creyeron en mi y que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

¡Gracias a ustedes!

A mis maestros.

A todos quienes marcaron cada etapa de mi vida universitaria pero especialmente a los Ingenieros Fabián Astudillo y Andrés Vázquez por su gran apoyo y motivación para la elaboración de esta tesis.

Pablo Avila



Abreviaciones y Acrónimos

BW Bandwidth. [15](#), [16](#)

CR Coding Rate. [15](#)

DR Data Rate. [7](#), [15](#), [16](#), [23](#)

GPIO General Purpose Input/Output. [8](#)

LoRa Long Range. [3–5](#), [7–9](#), [19](#), [23](#)

LoRaWAN Long Range Wide Area Network. [3–5](#), [7](#), [10](#), [15](#), [16](#), [22](#), [23](#), [27](#)

LPWAN Low Power Wide Area Network. [3](#)

PER Packet Error Rate. [4](#), [7](#), [19](#), [28](#)

RSSI Received Signal Strength Indicator. [4](#), [5](#), [7](#), [11](#), [14–19](#), [22](#), [28](#), [33](#), [38](#)

SF Spreading Factor. [15](#), [16](#), [23](#)

SNR Signal to Noise Ratio. [4](#), [7](#), [14–17](#), [19](#), [28](#), [33](#), [38](#)

SPI Serial Peripheral Interface. [7](#)

WiFi Wireless Fidelity. [3](#)

WSN Wireless Sensor Network. [3](#), [13](#)



Capítulo 1

Introducción



En este capítulo, se presenta el problema a tratar, así como la justificación, el alcance y los objetivos general y específicos a cumplir durante esta investigación.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



1.1. Identificación del Problema

Se estima que para 2020, más de cincuenta billones de dispositivos estarán conectados mediante comunicaciones inalámbricas. [10] Esto es parte del enfoque de *hacer más con menos* que se encuentra con trabas al aplicar redes tradicionales como las celulares o tecnologías como WiFi debido a los requerimientos de escalabilidad y energía. Muchos de estos dispositivos serán parte de redes de sensores inalámbricos (WSN), por sus siglas en inglés. De hecho, actualmente, las WSN cubren un amplio rango de aplicaciones, una de las que se ha desarrollado con más éxito es la del monitoreo ambiental. [11]

Es por esto que surgen proyectos como el de *Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba* [12], realizado por el Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET) en beneficio del Programa para el Manejo del Agua y Suelo (PROMAS). En este proyecto, se pretende utilizar una tecnología que es parte de las WSN, llamada LoRaWAN para conectar nodos con sensores limnigráficos ¹. Para este tipo de proyectos que utilizan tecnologías nuevas, es necesario tener un primer acercamiento que permita facilitar la implementación del mismo.

Junto al desarrollo de nuevas tecnologías como LoRaWAN, surgen también dudas relacionadas con el comportamiento de las mismas en ambientes específicos, como el mencionado anteriormente. Este comportamiento puede depender de diferentes factores que determinan su efectividad. Estos factores deben ser definidos con el objetivo de lograr el mejor provecho con respecto al alcance o a la confiabilidad que provee dicha tecnología.

1.2. Justificación

LoRaWAN es parte de las llamadas redes de área extensa y bajo consumo (LPWAN) por sus siglas en inglés, que representan una nueva tendencia en la evolución en las telecomunicaciones [14]. LoRaWAN utiliza los beneficios de LoRa. LoRa es una tecnología de radio frecuencia propietaria que se caracteriza por el uso eficiente de la energía con baterías que pueden durar hasta 10 años, cobertura con línea de vista de más de 10 km en entornos rurales, así como un rápido despliegue de red con nodos de bajo costo [3, 15]. Estos nodos pueden recolectar y transmitir información en tiempo real como temperatura, lluvia, humedad y otras variables

¹Medidores de los niveles de agua de los ríos, lagos o algún cuerpo de agua, se usan para la predicción de crecidas (máximas alturas de agua), definir o delinear zonas con riesgo de inundación y para proyectar estructuras (puentes u otras obras hidráulicas). [13]



climáticas [16], haciendo propicia a esta tecnología en entornos forestales como el propuesto en el proyecto mencionado [12].

De manera específica, **LoRaWAN**, es una capa de acceso al medio (MAC), creada con el objetivo de utilizar la modulación **LoRa** de la mejor manera y enfocarla al internet de las cosas (IoT) [4], por sus siglas en inglés. La información de los sensores, es transmitida a los Gateway, mediante un salto, para luego ser enviada a servidores web, en los que puede ser procesada para infinidad de aplicaciones. Entre los beneficios que agrega **LoRaWAN** están el direccionamiento, la seguridad a través de encriptación AES de 128 bits, y comandos MAC que hacen que el desarrollo de una red **LoRaWAN** sea rápido y preciso [4, 17, 18].

Hasta el momento, se han realizado estudios sobre desempeño, escalabilidad, propagación general en interiores y exteriores [2, 14, 16-23] pero dado que **LoRaWAN** es una tecnología aún nueva, no se han reportado estudios de evaluación de rango de transmisión en ambientes forestales.

1.3. Alcance

La contribución de este trabajo se centra en el desarrollo de un modelo de pérdidas de trayectoria que facilite el desarrollo de redes de sensores con tecnología **LoRaWAN**. Para lograr esto, se harán mediciones del Indicador de Nivel de Señal Recibida (**RSSI**), por sus siglas en inglés, utilizando el Kit de Evaluación **LoRa** 900, de Microchip [26]. Este kit permite la modificación de diferentes parámetros como el Factor de Ensanchamiento (SF), Ancho de Banda (BW) y Potencia de Transmisión, conforme los establecido en **LoRaWAN** [4], con las cuales, se pueden obtener diferentes alcances, permitiendo evaluar el rango de transmisión.

Se realizarán conjuntos de mediciones en la margen del río Tomebamba, en las que un nodo **LoRa** actuará como transmisor, y el *Gateway* del kit como receptor. La tasa de paquetes recibidos (**PER**), por sus siglas en inglés, actuará como parámetro de calidad general de la red. Las transmisiones serán receptadas por el Gateway, que a su vez las transmitirá al servidor, el mismo, irá guardando un registro de los **RSSI**, **SNR** y **PER** de las transmisiones.

Luego de obtenidos los datos, se propone ajustar una curva de pérdidas de trayectoria basada en **RSSI**, esto permitirá tener un modelo empírico de pérdidas para el área requerida [24-26], cumpliendo así con el objetivo principal de este trabajo de investigación.



1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Ajustar un modelo de pérdidas de trayectoria basado en RSSI que permita realizar modelos analíticos y simulaciones para facilitar la implementación de redes de sensores con tecnología [LoRaWAN](#) en márgenes de ríos con entornos forestales.

1.4.2. Objetivos específicos

- Hacer un análisis del estado del arte, así como de la metodología de medición.
- Configurar el kit de desarrollo de [LoRa](#) con [LoRaWAN](#), para el envío y captura de datos.
- Hacer dos conjuntos mediciones en las que se tomarán muestras de [RSSI](#) a distancias fijas y variables.
- Ajustar un modelo pérdidas de trayectoria adecuado para el uso de [LoRa](#) en márgenes de ríos con ambientes forestales.



Capítulo 2

Marco Teórico



En el presente capítulo, se muestra de manera detallada el funcionamiento de [LoRaWAN](#), partiendo desde una base general en la que se explican conceptos de Redes de Sensores Inalámbricos hasta el funcionamiento y aspectos importantes de la modulación [LoRa](#) y la manera en la que se puede utilizar el [RSSI](#) para determinar un modelo de pérdidas de propagación.

desde 1867



2.1. Introducción

Se estima que para 2020, más de cincuenta billones de dispositivos estarán conectados mediante comunicaciones inalámbricas [10]. Para esto, será necesaria la siguiente generación de sistemas de comunicación, llamada 5G. 5G debe integrar de manera nativa los servicios del Internet de las Cosas (IoT), sin degradar la calidad de los servicios tradicionales.

Hasta el momento, el término IoT ha sido utilizado para una variedad de tecnologías que en general intentan conectar objetos físicos al internet [3]. La principal diferencia entre el Internet tradicional y el Internet de las Cosas es que en IoT los dispositivos tienen menos recursos disponibles como memoria, potencia de procesamiento, ancho de banda y energía [10].

Esta tendencia de hacer más con menos se ha encontrado con restricciones tecnológicas en las redes inalámbricas actuales que no cumplen con los requerimientos energéticos ni de escalabilidad necesarios. Es por esto que han emergido nuevos protocolos y tecnologías como las Redes de Amplia Cobertura y Baja Potencia (LPWAN). Esta tecnología permite el desarrollo de redes de área amplia con Gateways y adaptar parámetros como la tasa de transmisión, potencia, modulación, etc, de tal manera que los dispositivos finales, llamados nodos sean eficientes en cuanto al gasto energético [10].

2.2. Redes de Sensores Inalámbricos

Debido en gran medida a los recientes avances en tecnologías inalámbricas y de electrónica digital, el diseño y desarrollo de nodos sensores de bajo costo y bajo consumo energético, se ha vuelto factible [27].

Las propiedades de los nodos individuales ubicados, por lo general, en diferentes puntos geográficos, presentan retos a los protocolos de comunicación en términos de consumo de energía. Es por esta razón que su enfoque principal se centra en la eficiencia energética al contrario que en redes tradicionales que se centran en mejorar el desempeño de retardo o cantidad de información procesada.

Las WSN se definen como sensores distribuidos que monitorean parámetros físicos o ambientales y que usualmente colaboran para transportar esa información hacia servidor o un nodo central [28].



2.2.1. Principales Tecnologías de IoT

En esta sección, se realiza una breve revisión de tecnologías relacionadas con IoT para proveer de una mejor perspectiva acerca de LoRaWAN [10]:

IEEE 802.15.4 es un estándar que define las capas física y de enlace para Redes Inalámbricas Personales de Baja Tasa de Transmisión (**LR-WPAN**) [29]. Entre sus principales características está el soporte de bandas sin licencia (868 MHz, Europa; 928 MHz, Norte América; 2.4 GHz, mundial). Ofrece tasas de datos de hasta 250 kbps y alcances con línea de vista (**LOS**) de hasta 1000 m. Sobre IEEE 802.15.4 se puede utilizar Zigbee que es una tecnología que ofrece perfiles de comunicaciones y una capa de red [30].

Bluetooth/LE fue originalmente creado para reemplazar inalámbricamente cables de dispositivos que típicamente se conectan entre sí, como teléfonos celulares, computadoras portátiles, dispositivos de audio, teclados, etc. Ofrece bajas tasas de datos de alrededor de 1 Mbps y corto alcance con distancias típicas de 5-10 m con bajo consumo energético. Luego de varias revisiones, en 2016 se presentó Bluetooth 5.0 [31]. Esta versión se encuentra sumamente enfocada en IoT. Es completamente compatible con la anterior versión 4.2, aumenta el ancho de banda hasta 2 Mbps, modo de bajo consumo (**LE**), por sus siglas en inglés, con alcances de hasta 240 m.

IEEE 802.11 ah provee un estándar LAN [32]. En comparación a IEEE 802.11 que opera a 2.4 GHz y 5 GHz, IEEE 802.11 ah soporta mayores rangos de transmisión de hasta 1 km a una potencia por defecto de 200 mW. Este estándar puede operar con un ancho de banda de 4 o 7.8 Mbps. Gracias a los nuevos esquemas de modulación y codificación de 802.11 ac se pueden alcanzar tasas de transferencia de cientos de Mbps.

Sigfox fue la primera tecnología LPWAN propietaria, propuesta para el consumidor. Su capa física utiliza una modulación de banda ultra estrecha (**UNB**). Teóricamente cada Gateway Sigfox puede soportar hasta un millón de dispositivos conectados con un área de cobertura de 30-50 km en entornos rurales y 3-10 km en áreas urbanas [33]. Cada nodo puede enviar hasta 140 mensajes por día, a una tasa de datos de hasta 100 bps.



2.3. Redes de Amplia Cobertura y Baja Potencia (LP-WAN)

El ecosistema **IoT** es amplio, conteniendo dispositivos con tasas de datos que van desde unos cuantos bps a Mbps. La cobertura es también variable desde pocos centímetros a varios kilómetros. **LPWAN** se encarga de cubrir estas necesidades en nuevas aplicaciones que surgen a diario [34].

2.3.1. Características Principales de una red LPWAN

Aunque estas redes deben cubrir diferentes necesidades, existen requerimientos comunes en el diseño de una red **LPWAN**:

- Su funcionamiento debe requerir un mínimo consumo energético. Esto dado a la limitada capacidad de las baterías actuales y su elevado costo.
- El costo es un factor importante. Especialmente en los nodos, se deben proveer herramientas de fácil instalación y tanto el hardware como el software deben ser limitados.
- El nivel de actividad depende de la aplicación, sin embargo, el dispositivo debe ser capaz de despertar únicamente al enviar información. Este punto apoyaría la idea de las arquitecturas tipo estrella contra las arquitecturas en malla.
- La infraestructura de red debe ser fácil de montar. La adición de dispositivos o el traslado a otros países debe cumplir con algún estándar.
- La transferencia de información entre el objeto y el usuario final, debe ser segura.
- Aunque en la mayoría de aplicaciones, los objetos no se encuentran en movimiento, por lo que el canal se mantiene constante, la robustez de modulación es una característica valiosa.

2.4. Aspectos básicos de la modulación LoRa

LoRa es un esquema de modulación propietario derivado de la modulación de espectro ensanchado con chirps (**CSS**), cuyo objetivo principal es mejorar la sensibilidad a costa de una reducción en la tasa de datos para un ancho de banda (**BW**) dado. Implementa tasas de datos variables, usando factores de ensanchamiento (**SF**) ortogonales, lo que permite hacer un compromiso entre tasa de datos y alcance, así como optimizar el desempeño de la red con un ancho de banda constante.

LoRa es una implementación de capa física y no depende de implementaciones en capas superiores. Esto le permite coexistir con diferentes arquitecturas de red. A continuación, se presentan algunos conceptos básicos sobre la modulación LoRa y las ventajas de desarrollar una red LPWAN. [1]

2.4.1. Principios del Espectro Ensanchado

En teoría de la información, el teorema de Shannon - Hartley, define la máxima tasa a la que la información puede ser transmitida en un canal de comunicaciones con un ancho de banda específico en presencia de ruido.

De esta conocida ecuación, se puede concluir que si se incrementa el ancho de banda, se puede compensar la degradación del SNR del canal de radio.

En los sistemas de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS), la fase de la portadora del transmisor cambia de acuerdo a una secuencia de código. Este proceso se logra multiplicando la señal de datos deseada con un código de ensanchamiento, conocido como secuencia chip. Esta secuencia chip tiene una más alta tasa que la señal de datos por lo que ensancha el ancho de banda de la señal original. Esto se observa en la Figura 2.1.

De esta manera, se produce una ganancia de procesamiento además de una reducción en la cantidad de interferencia. DSSS es ampliamente utilizado en aplicaciones de comunicación, sin embargo se presentan retos cuando se necesita reducir el costo y el gasto energético de los dispositivos con esta tecnología.

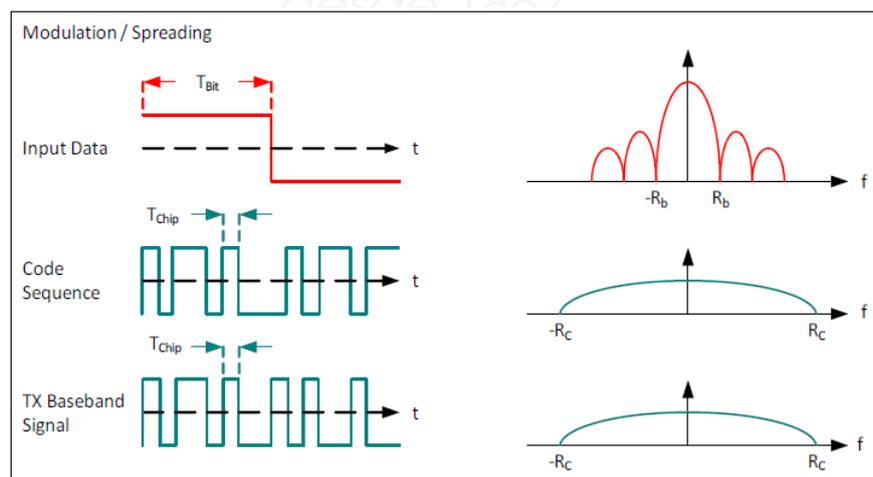


Figura 2.1: Proceso de ensanchamiento [1]

2.4.2. Espectro Ensanchado LoRa

La modulación LoRa, resuelve los problemas de DSSS proveyendo una alternativa de menor costo y menor consumo energético.

En la modulación LoRa, se logra el espectro ensanchado generando una señal chirp que varía continuamente en frecuencia, como se observa en la Figura 2.2. Una ventaja de este método es que las variaciones de temporización y frecuencia entre el transmisor y el receptor son equivalentes, reduciendo la complejidad del receptor. El ancho de banda de este chirp es equivalente al ancho de banda espectral de la señal. La señal deseada es ensanchada con un chip y modulada sobre un chirp. La relación entre la tasa de datos deseada, la tasa de símbolos y la tasa de chips para LoRa, se puede expresar de la siguiente manera:

En la ecuación 2.1, se define la tasa de bits de la modulación, R_b

$$R_b = SF * \frac{\text{Códigodetasa}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \text{ bits/sec} \quad (2.1)$$

Donde:

$$\text{Códigodetasa} = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.2)$$

Donde:

- SF = Factor de ensanchamiento, que puede variar entre 7 y 12
- CR = Tasa de codificación, que varía entre 1 y 4
- BW = Ancho de Banda (Hz)

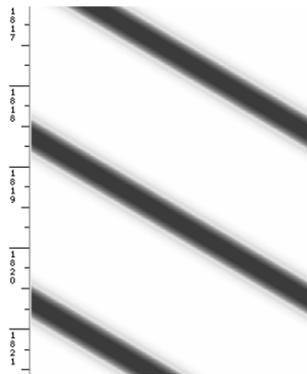


Figura 2.2: Extracto del Espectrograma de un chirp (SF=8, BW=125kHz) [2]



2.4.3. Parámetros de Transmisión

Como se ha mencionado ya anteriormente, un dispositivo **LoRa**, puede ser configurado para utilizar diferente Potencia de Transmisión (**TP**), Frecuencia de Portadora (**CF**), Factor de Ensamblamiento (**SF**), Ancho de banda (**BW**) y Tasa de Codificación (**CR**) para conseguir el mejor desempeño de conexión y menor consumo energético.

La combinación de estas variables resulta en alrededor de 6720 posibles configuraciones, lo que permite al usuario ajustar completamente **LoRa** a su aplicación [35]. A continuación, se hace una breve descripción de cada uno de los parámetros mencionados [36]:

1. **Potencia de Transmisión (TP)**: (**TP**) en **LoRa**, puede ser variado entre -4 dBm y 20 dBm, pero debido a límites de implementación, se puede ajustar de 2 dBm a 20 dBm. Con potencias mayores a 17 dBm sólo se puede usar el 1 % del ciclo de trabajo.
2. **Frecuencia de Portadora (CF)**: Es la frecuencia central que puede ser variada en saltos de 61 Hz entre 137 MHz y 1020 MHz, dependiendo del chip y la región de uso.
3. **Factor de Ensamblamiento (SF)**: Es la razón entre la tasa de símbolos y la tasa de chips. Un mayor **SF** no solo incrementa el **SNR**, el alcance y la sensibilidad, sino también el tiempo aire del paquete. Cada incremento en el **SF** también disminuye a la mitad la tasa de transmisión, duplica la duración de la transmisión y el consumo de energía. El **SF** puede variar entre 6 y 12, siendo útil para la separación de redes ya que los **SF** son ortogonales.
4. **Ancho de banda (BW)**: Es el rango de frecuencias en la banda de transmisión. Un **BW** mayor, da una mayor tasa de datos (menor tiempo aire), pero menor sensibilidad por agregación de ruido. Un menor **BW** requiere cristales mas precisos, es decir menos partes por millón (ppm). Los datos son enviados a una tasa de chips equivalente al **BW**; un **BW** de 125 kHz equivale a una tasa de chips de 125 kcps. Una red **LoRa** típica opera en: 125 kHz, 250 kHz o 500 kHz.
5. **Tasa de Codificación (CR)**: **CR** es la tasa de corrección de errores hacia adelante (**FEC**) usada por **LoRa** en contra de interferencias y puede ser configurada con: 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8. Un **CR** mayor ofrece más protección frente a ruido, pero incrementa el tiempo aire. Transmisores con diferente **CR** pueden comunicarse ya que el **CR** se encuentra en una cabecera del paquete que siempre se encuentra codificado a 4/8.

2.4.4. Propiedades Clave de la Modulación **LoRa**

A continuación, se presentan algunos aspectos clave que resaltan a **LoRa** y lo convierten en el mejor candidato para aplicaciones **IoT** [1]:

- **Ancho de Banda Escalable:** Puede usarse en saltos de frecuencia de banda estrecha y en aplicaciones de secuencia directa de banda ancha.
- **Bajo Consumo Energético:** La potencia de salida puede reducirse en comparación a **FSK** manteniendo el mismo o mejor presupuesto de enlace.
- **Alta Robustez:** Debido a naturaleza asíncrona, la señal **LoRa** es resistente a interferencias en y fuera de banda.
- **Resistente a Desvanecimiento:** Gracias a la banda ancha de los pulsos chirp, **LoRa** ofrece inmunidad a desvanecimiento y multitrayectoria, haciéndolo ideal para ambientes urbanos y suburbanos.
- **Resistente a Doppler:** El desplazamiento Doppler provoca un pequeño desplazamiento de frecuencia en el impulso **LoRa** que introduce un desplazamiento insignificante en el eje de tiempo de la señal de banda base, haciéndolo inmune al efecto Doppler.
- **Capacidad de Amplia Cobertura:** Comparado con **FSK**, manteniendo una misma potencia de transmisión, el presupuesto de enlace es mayor en **LoRa**.
- **Capacidad de Red Mejorada:** La modulación de SemTech **LoRa** emplea **SF** ortogonales que permiten transmitir múltiples señales de propagación al mismo tiempo y en el mismo canal sin una degradación considerable de la sensibilidad RX. Las señales moduladas con diferentes **SF** aparecen como ruido al receptor objetivo y pueden ser tratadas como tales.

2.5. LoRa MAC: LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de red creado por la LoRa Alliance¹ que optimiza los parámetros de **LoRa** para un menor consumo energético en dispositivos finales (nodos).

Las redes **LoRaWAN** son redes centralizadas que utilizan típicamente una topología estrella en la cual los *gateways* pasan los paquetes entre los dispositivos finales (nodos o motas) y un servidor de red central. Los *gateways* se conectan al servidor de red vía **IP** mientras que los dispositivos finales utilizan transmisiones de un solo salto con **LoRa** o **FSK**. Aunque la comunicación es bidireccional, el flujo de información desde el dispositivo final al *gateway* corresponde al tráfico predominante [4]. En la figura 2.3 se observa la arquitectura de un sistema **LoRaWAN**.

¹<https://www.lora-alliance.org/>

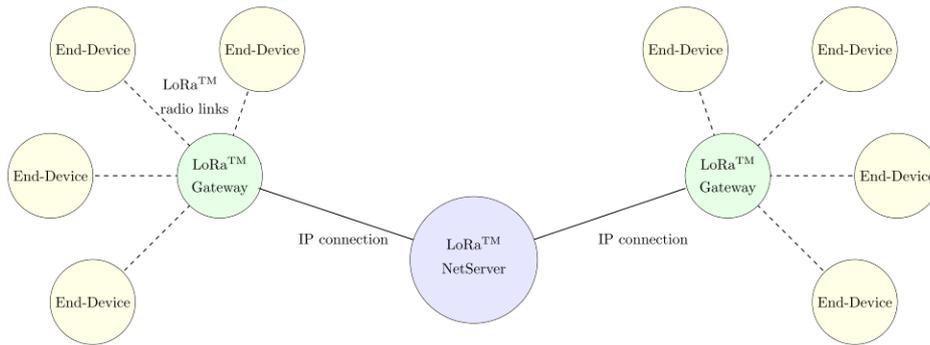


Figura 2.3: Arquitectura del sistema LoRaWAN [3]

La comunicación entre dispositivos finales y *gateways* utiliza diferentes frecuencias y canales, utilizando las siguientes reglas:

- El dispositivo final cambia de canal de manera pseudoaleatoria en cada transmisión.
- El dispositivo final respeta el máximo ciclo de trabajo de transmisión relativo a la sub-banda y a las regulaciones locales.
- El dispositivo final respeta la máxima duración de transmisión.

Una transmisión con **LoRaWAN**, utiliza las capas que se observan en la Figura 2.4.

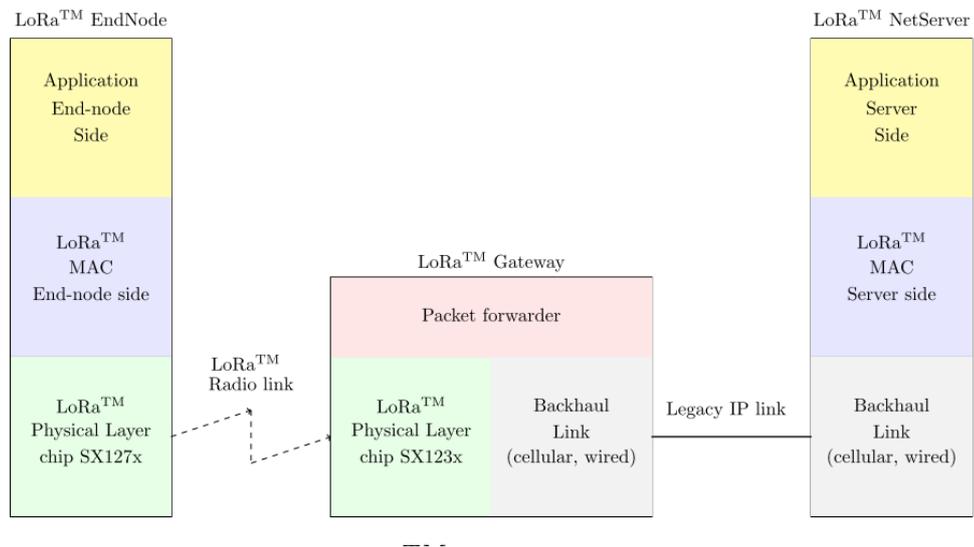


Figura 2.4: Arquitectura del protocolo LoRaWAN [3]

2.5.1. Clases en LoRaWAN

LoRaWAN define tres clases que fueron diseñadas para diferentes aplicaciones en las cuales se hace un compromiso entre gasto energético y latencia. Todos los dispositivos LoRaWAN deben implementar al menos la clase A y ser compatibles con la misma. En la Figura 2.5, se observa la ubicación de las clases con respecto a las capas de LoRa.

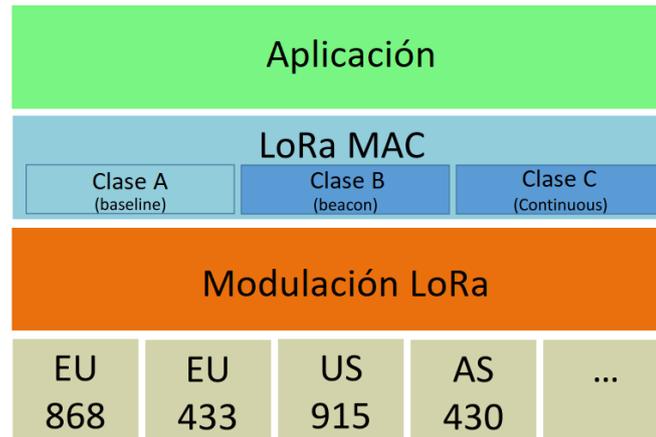


Figura 2.5: Clases LoRaWAN

- **Clase A:** Los dispositivos finales de clase A, permiten comunicación bidireccional ya que luego de cada transmisión *uplink* (nodo al servidor) existen dos ventanas *downlink* (servidor al nodo). La operación de clase A es la que menos consumo de energía produce.
- **Clase B:** Los dispositivos finales de clase B, permiten más ventanas de recepción. En adición a las ventanas de recepción de la clase A, la clase B abre ventanas de recepción extra en tiempos fijos. Esto se logra enviando Beacons desde el gateway para fijar el tiempo en el que el dispositivo final debe estar en modo de escucha.
- **Clase C:** Los dispositivos finales de clase C tienen ventanas de recepción casi continuas que solo se cierran cuando se encuentra transmitiendo. Los dispositivos clase C consumen más energía para su funcionamiento que la Clase A o Clase B, pero ofrecen la menor latencia entre el servidor y el dispositivo final.

Ya que todos los dispositivos LoRaWAN deben implementar al menos la Clase A y que el dispositivo a utilizar en este trabajo utiliza esta clase, en los siguientes puntos se explicará el protocolo desde este punto de vista.

2.5.2. Formatos de Mensajes Físicos - Clase A

En LoRaWAN, se distinguen mensajes *uplink* (nodo al servidor) y *downlink* (servidor al nodo).

Mensajes *Uplink*

Estos mensajes son enviados por dispositivos finales hacia uno o varios *gateways*, los que los reenvían hacia el servidor.

Estos mensajes utilizan el modo explícito en el cual se incluye una cabecera física LoRa (PHDR) más un encabezado CRC (PHDR_CRC). La integridad de la carga útil es protegida por el CRC. Estos encabezados son agregados por el transceptor. La estructura de un mensaje *Uplink*, se observa en la Figura 2.6.

Uplink PHY:



Figura 2.6: Estructura Física de *Uplink*[4]

Mensajes *Downlink*

Cada mensaje downlink es enviado por el servidor de red a uno de los dispositivos finales, siendo reenviado por un solo *gateway*. Figura 2.7.

Downlink PHY:

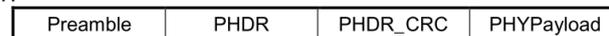


Figura 2.7: Estructura Física de *Downlink*[4]

Ventanas de Recepción

Como se mencionó anteriormente, luego de cada transmisión *uplink*, el dispositivo final abre dos ventanas cortas de recepción. Para definir el inicio se utiliza el final de la transmisión como referencia. Figura 2.8.

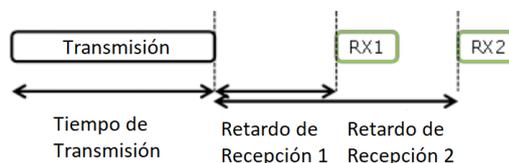


Figura 2.8: Temporización de Recepción[4]

2.5.3. Formatos de Mensajes **MAC** - Clase A

Todos los mensajes *uplink* y *downlink* llevan una carga útil **PHY** que empieza por un encabezado **MAC** de un octeto (MHDR), seguido por una carga útil **MAC** (MACPayload) y finalizando con un mensaje de integridad de código de 4 octetos (**MIC**). Las diferentes partes del mensaje Clase A, se observa en la Figura 2.9.

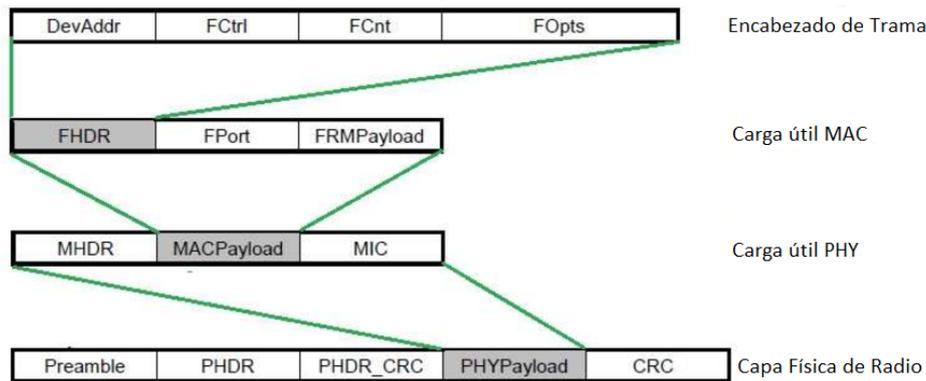


Figura 2.9: Formato de Mensaje **LoRa**[4]

En la Tabla 2.1, se da la descripción de las diferentes partes del mensaje:

Tabla 2.1: Descripción de campos del mensaje **MAC**

Campo de Mensaje MAC LoRa	Descripción
MHDR	Encabezado MAC , un octeto de longitud
MAC Payload	Datos de la capa superior
MIC	Código de Integridad de Mensaje, cuatro octetos de longitud
FHDR	Encabezado de trama
FPort	Campo opcional de puerto
FRMPayload	Campo opcional de carga útil de trama
Devaddr	Dirección del dispositivo
FCtrl	Octeto de control de trama
FCnt	Contador de trama, dos octetos de longitud
FOpts	Opciones de trama, para enviar comandos MAC , 15 octetos



2.5.4. Activación de Dispositivos Finales

Para ser parte de una red [LoRa](#), cada dispositivo debe ser activado. Esta activación se puede hacer de dos maneras: Activación en el Aire ([OTAA](#)), cuando se desea agregar un dispositivo nuevo o, Activación por Personalización ([ABP](#)). [4]

Datos Almacenados en el Dispositivo Final

Después de la activación, se almacena la siguiente información en el dispositivo final: Una dirección de dispositivo ([DevAddr](#)), un identificador de Aplicación ([AppEUI](#)), una clave de sesión de red ([NwkSKey](#)) y una clave de sesión de aplicación ([AppSKey](#)). La descripción de estas direcciones se muestra en la [Tabla 2.2](#).

Tabla 2.2: Direcciones Almacenadas en el Dispositivo Final

Clave	Descripción
DevAddr	Consiste de 32 bits que identifican al dispositivo en la red
AppEUI	Es un identificador global que identifica a una entidad capaz de procesar una trama de solicitud de agregación.
NwkSKey	Es usada por el servidor de red y el dispositivo final para calcular el MIC . Se usa para encriptar y desencriptar la carga útil del campo de carga útil en mensajes MAC .
AppSKey	Se usa para encriptar y desencriptar la carga útil del campo de carga útil en mensajes de datos específicos de una aplicación.

Activación en el Aire ([OTAA](#))

Para esta activación, los dispositivos finales deben seguir un procedimiento de agregación antes del envío de información con el servidor de red.

Una [OTAA](#) requiere que el dispositivo final tenga la siguiente información antes del procedimiento de agregación: un identificador único global ([DevEUI](#)), el identificador de aplicación ([AppEUI](#)) y la clave AES-128 ([AppKey](#)).

- Identificador de Dispositivo Final ([DevEUI](#)): Es una identificación global en el espacio de direcciones IEEE EUI64 que identifica de manera única al dispositivo.
- Clave de Aplicación ([AppKey](#)): Es una clave AES-128 única del dispositivo. Cuando el dispositivo final realiza una [OTAA](#), se utiliza la [AppKey](#) para generar la [NwkSKey](#) y [AppSKey](#) específicas del dispositivo que son usadas para encriptar y verificar la comunicación con la red.

Tabla 2.3: Tabla de tasas de Datos (DR) [4]

Tasa de Datos (DR)	Configuración	Tasa de bits física (bit/sec)
0	SF10 / 125 kHz	980
1	SF9 / 125 kHz	1760
2	SF8 / 125 kHz	3125
3	SF7 / 125 kHz	5470
4	SF8 / 500 kHz	12500
5:7	RFU	
8	SF12 / 500 kHz	980
9	SF11 / 500 kHz	1760
10	SF10 / 500 kHz	3900
11	SF9 / 500 kHz	7000
12	SF8 / 500 kHz	12500
13	SF7 / 500 kHz	21900
14:15	RFU	

El procedimiento que siguen los dispositivos consiste en un mensaje de solicitud de agregación o activación en el que se incluye [AppEUI](#) y [DevEUI](#). El servidor de red responde con un mensaje de aceptación de agregación que contiene una dirección de dispositivo final ([DevAddr](#)) y un campo **AppNonce** que es usado por el dispositivo para calcular la [NwkSKey](#) y [AppSKey](#).

Activación por Personalización (ABP)

Bajo determinadas circunstancias, los dispositivos finales pueden ser activados o agregados a la red por personalización. Este procedimiento agrega al dispositivo directamente a la red sin la necesidad de los mensajes de solicitud y aceptación de la red utilizados en la [ABP](#).

Esta activación requiere que las claves la [DevAddr](#) y las dos claves de sesión [NwkSKey](#) y [AppSKey](#) estén ya almacenadas en el dispositivo final. Cada dispositivo debe tener [NwkSKey](#) y [AppSKey](#) únicas, para no comprometer la seguridad de la comunicación de otros dispositivos. Estas claves deben ser creadas de tal manera que no puedan ser calculadas a partir de información pública.

2.5.5. Tasa de Datos (DR) y Potencia de Transmisión

[LoRaWAN](#) cumple con las regulaciones establecidas por la [FCC](#) que impone un tiempo máximo de transmisión de 400 *ms* en *Uplink* en la banda US 902-928 MHz. En la [Tabla 2.3](#) se presentan los [DR](#) permitidos con sus respectivas configuraciones.



Las potencias de transmisión por su parte, se especifican en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Tabla de potencias de Transmisión [4]

TXPower	Configuración
0	30 dBm - 2*TXPower
1	28 dBm
2	26 dBm
3:9	...
10	10 dBm
11:15	RFU

2.6. Modelo de Pérdidas de Trayectoria

El indicador de energía de la señal **RSSI**, mide la intensidad de la señal que llega al receptor en *dBm*. Este parámetro de la señal, ha sido ampliamente usado para medir la calidad de la propagación en diferentes ambientes y con diferentes tecnologías [20, 22, 24, 37]. Se usa para posicionamiento y rastreo en nodos móviles como se evidencia en [38–40]. En cualquier caso, se debe tomar en cuenta que los valores de **RSSI** fluctúan debido a cambios en el ambiente que afectan a la propagación.

Modelo de Pérdidas

Para que los resultados de un estudio sean útiles, usualmente se genera un modelo de pérdidas de trayectoria. Estos modelos reflejan la reducción de potencia de la señal mientras se propaga por el espacio y comúnmente se expresan de manera logarítmica, como se muestra en la Ecuación 2.3 [24].

$$P_L(dB) = P_0(dBm) + 20\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\theta \quad (2.3)$$

dónde d y d_0 son la distancia de transmisión y la distancia de referencia, mientras que P_0 es el nivel de potencia en d_0 . X_θ es una variable aleatoria con distribución normal con desviación estándar θ

La otra manera comúnmente usada para expresar la propagación en entornos forestales introducida por Weissberger y modificada en los modelos de ITU-R y COST235 es la de desvanecimiento exponencial que se observa en la Ecuación 2.4 [41].

$$L(dB) = A * f^B d^C \quad (2.4)$$

dónde f es la frecuencia, d la distancia; A , B y C son ajustados en base a los datos medidos.

En trabajos como [15] y [24], se combina y simplifica los modelos en la Ecuación 2.5.

$$P_L(dB) = a + b * \log(d) + X_\theta \quad (2.5)$$

En el cual a y b son ajustados por los datos medidos, mientras X_θ representa la característica estocástica de la señal debido a ruido y desvanecimiento multitrayectoria. En esta forma, el factor exponencial de distancia es expresado por b , mientras otros factores en (2.3) y (2.4) son incluidos en a .

La aleatoriedad de la señal recibida es calculada con los datos medidos. Se asume una distribución normal con media cero y distribución estándar θ .

Cálculo de Pérdidas de Trayectoria con RSSI y SNR

Para calcular las pérdidas de trayectoria que serán ajustadas a la curva logarítmica descrita por la Ecuación 2.5, se utiliza la Ecuación 2.6, tomada de [15].

$$P_L = |RSSI| + SNR + P_{tx} + G_{rx} \quad (2.6)$$

Donde SNR es el radio señal a ruido, P_{tx} es la potencia radiada por el transmisor y G_{rx} es la ganancia de la antena receptora.

2.7. Conclusiones

LoRa se presenta como una solución tecnológica que ayudará y será parte de 5G. Existen varias tecnologías con características **LPWAN** que pueden solventar algunas de las necesidades de esta evolución, sin embargo, no fueron diseñadas para cumplir este propósito específico.

En cuanto a su capa física, se presenta como una modulación de espectro ensanchado que permite la modificación de parámetros fundamentales como factor de ensanchamiento, ancho de banda, potencia de transmisión y tasa de codificación, permitiendo al usuario enfocar **LoRa** a sus necesidades específicas. Su resistencia a Doppler, bajo consumo energético y grandes rangos de cobertura que superan los 10 km en entornos rurales, la hacen fiable para redes de sensores inalámbricos **WSN**.



Por otro lado, **LoRaWAN** es un protocolo de red que hace uso de **LoRa** con un enfoque **IoT**. A pesar de que muchas de las características variables de **LoRa** son suprimidas en **LoRaWAN**, se intenta dar opciones al usuario a través de Clases y se provee seguridad usando diferentes claves que permiten la encriptación de la información.

RSSI se presenta como un indicador de energía recibida que, en conjunto con el **SNR**, pueden ser utilizados para generar modelos de pérdidas de trayectoria. Estos modelos son usados para caracterizar una tecnología en un ambiente específico por lo que es importante definir el tipo de modelo a ajustar.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Capítulo 3

Estado del Arte de **LoRa** y **LoRaWAN**



Este capítulo presenta un resumen de los principales trabajos realizados en la capa física **LoRa**, **MAC LoRaWAN** y trabajos que analizan de manera general a redes **LoRa**.



3.1. Introducción

Como se ha mostrado en el capítulo anterior, las ventajas de esta tecnología permiten su uso no solo con el enfoque del Internet de las Cosas como lo propone [LoRaWAN](#) sino, con otros enfoques que se han venido desarrollando desde que se presentó [LoRa](#).

A continuación, se mostrarán algunos de estos enfoques y se hará una comparativa que demostrará el estado del arte de [LoRa](#).

3.2. Capa Física - [LoRa](#)

Como ya se discutió en el capítulo anterior, la capa física [LoRa](#) es propietaria y fue desarrollada por Semtech por lo que las diferentes implementaciones utilizan chips Semtech. En general los protocolos propietarios no se extienden de igual manera que los libres por lo que se han hecho trabajos [2] que analizan e implementan con un análisis a ciegas (*Blind Analysis*), diferentes partes de la capa física [LoRa](#). Entre las partes analizadas, están la demodulación, la detección del preámbulo, inicio de trama y cabecera. Otra parte fundamental es la decodificación en la que se presenta el *gray indexing*, *whitening*, entrelazado y FEC. Lo anteriormente mencionado es implementado en gr-[LoRa](#), que se encuentra libre, mejorando el desarrollo del [LoRa](#).

Otro de los puntos claves en la capa física de [LoRa](#) es el alcance. Éste ha sido probado en varios trabajos tanto en interiores como en exteriores. En [15], se estudia la cobertura en dos ambientes: en la ciudad de Oulu, Finlandia y en el mar. Para evaluar la cobertura, se estima la tasa de pérdida de paquetes. Se usa una potencia de transmisión de 14 dBm, Factor de ensanchamiento (**SF**) de 12 y Ancho de Banda (**BW**) de 125kHz. Se presentan inconvenientes con la tasa de envío de paquetes y la potencia de transmisión, debido a regulaciones de telecomunicaciones del país. Los autores, lograron distancias de 15km en tierra y 30km en mar con pérdidas de hasta el 38% de envíos.

Otro trabajo que presenta mediciones de propagación en exteriores es [20]. Su característica principal es que considera el área de Fresnel, enfocándose en propagación en espacio libre. El área de medición se divide en de corto y largo alcance. El corto alcance cubre distancias de hasta 6km. Se realizan dos pruebas con diferentes valores de **SF**, **BW**, **CR** y carga útil. Los parámetros de medición son la tasa de errores de paquetes (**PER**), Indicador de nivel de la señal recibida (**RSSI**) y la relación señal a ruido (**SNR**). Los autores lograron una distancia máxima de 6.66 km con un **PER** <7.3% con la configuración de la prueba 1 (**SF**=10, **BW**=250 kHz, **CR**= 4/6, **DR**= 1626.6 bps).



En [22], se prueba la cobertura en interiores de LoRa en un edificio de concreto reforzado en la ciudad de Praga. Se realizan dos experimentos uno con el receptor en el sótano y otro con el receptor en el techo del edificio. Se utiliza el RSSI para graficar el mapa de calor del edificio. Los dispositivos usados no son capaces de cubrir todo el edificio; sin embargo, se logran mejores resultados con el receptor en el techo, cubriendo casi la totalidad del edificio.

Otro trabajo en interiores, se presenta en [19]. La finalidad del mismo es la de comprobar la confiabilidad del sistema en casos relacionados con la salud. Un nodo LoRa en el brazo de una persona envía paquetes cada 13 segundos. Los parámetros de transmisión son elegidos para lograr el mayor alcance. SF=12 y BW=125kHz, data rate= 293bps, Ptx= 14 dBm, f=868 MHz. Se envían de 300 a 1800 paquetes en los diferentes lugares. El radio de paquetes correctos fue de 96.7 %, por lo que se concluye que es una tecnología fiable para esta aplicación.

LoRa se presenta como una tecnología orientada a redes de sensores por lo que en trabajos como [18], se prueba su confiabilidad en esta aplicación. La confiabilidad se prueba haciendo que se envíen paquetes durante largos periodos de tiempo y con condiciones de SF y canal, aleatorios. Se concluye que esta tecnología puede ser confiable para aplicaciones de sensado remoto de bajo costo; sin embargo, la topografía y la densidad de las edificaciones juega un rol importante en la propagación de la señal.

En los siguientes trabajos de investigación, se muestra una clara tendencia con respecto a la combinación de LoRa con otras tecnologías que aprovechen de mejor manera características como alcance, ancho de banda o facilidad de implementación de las mismas.

En el caso de [42], la tecnología WiFi se combina con LoRa. WiFi destaca por su mayor ancho de banda y alcance por otro lado LoRa ofrece bajo consumo de potencia y aún mayor alcance. En [21], además de estas dos tecnologías, se usa Bluetooth de baja energía (BLE) y a través de un algoritmo que es controlado por un agente, se toma la decisión de qué tecnología usar. La decisión se basa en maximizar la tasa efectiva y minimizar el gasto de energía. En ambos casos se ve una mejoría, especialmente de los niveles de RSSI.

En resumen, en cuanto a los parámetros comparables entre los trabajos anteriores, la frecuencia es una de las principales variables que definen el alcance de un sistema de comunicaciones inalámbricas. En el caso de los artículos descritos, todos usan 868MHz excepto por [22] que utiliza 2.4 GHz. Otra variable importante es la potencia de transmisión. Como se sabe, esto se ve generalmente restringido por las regulaciones de cada país, es así que en [15] y [19] se utiliza 14dBm. El valor de ganancia depende de la antena elegida y varía de 2 a 4.5dBi en [15] y tiene un máximo de 8dBi en [42]. La tasa de bits (BR), depende del valor de SF que tiene un valor de 12 en el caso de [15], [22] y [19], por otro lado 10 en [20]. Se dan valores altos para lograr mayores alcances pero se debe tomar en cuenta que disminuye el BR y el Ancho de Banda (BW). Con respecto al BW, se dan valores de 125KHz en [15], [22] y [19]; un valor de 25KHz en

[20]. La tasa de codificación es otro de los factores que define el BR, sin embargo en la mayoría de los estudios no se da el valor utilizado, excepto en [22] en que el CR es de 4/6.

Como era de esperarse, el alcance depende de una variedad de parámetros, además del tipo de aplicación. El mayor alcance se logra en [42] con 20km, en [15] 15km, luego 7.482km en [22], 420m en [19]. Figura 3.1

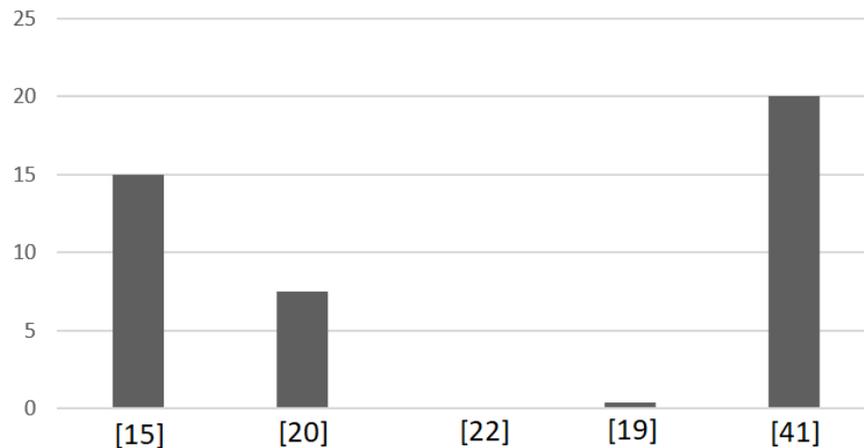


Figura 3.1: Comparación de coberturas

Se debe tomar en cuenta que en la mayoría de los trabajos presentados, se realizaron pruebas con diferentes valores de BR, BW y SF, por lo que lo definido anteriormente pertenece a los alcances máximos logrados por cada estudio.

3.3. Capa MAC

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, la capa MAC de LoRa, está definida por diferentes implementaciones. La más extendida es LoRaWAN. LoRaWAN fué desarrollado por LoRa Alliance [4] y entre sus características, define tres clases diferentes de dispositivos que aprovechan de la mejor manera las capacidades de LoRa. Este protocolo está orientado hacia el Internet de las Cosas (IoT) y divide a la red en cuatro partes. Dispositivos finales en donde se encuentran los sensores, Gateways que enrutan el tráfico, servidores de red y servidores de aplicación que procesan y responden a las peticiones respectivamente. [4]

En general, las diferentes implementaciones de la capa MAC sobre LoRa, se enfocan en lograr mayores alcances o implementar diferentes formas de arquitectura. En el caso de [36], se presenta



un análisis de desempeño y capacidad del transceptor Semtech SX1272. Para esto, se implementa el protocolo **MAC** LoRaBlink que permite la recolección de datos con multisalto. Se concluye que los radios **LoRa** pueden usar multisalto y, a pesar del aumento de complejidad, mantiene la eficiencia de uso energético.

Otro trabajo relacionado con la capa **MAC** es el realizado en [43]. Se presenta LoRa FABIAN como una pila de protocolos que puede ser usada sobre cualquier capa física. Está enfocada en la simplificación del acceso, utilizando protocolos comunes de internet como **DNS** y **HTTP**. Su principal ventaja sobre **LoRaWAN** es su interoperabilidad con internet. Al igual que en anteriores trabajos, se mide el desempeño utilizando el **PER**, **RSSI** y **SNR**. Se concluye que la ubicación y elevación de la antena juegan un rol fundamental en el desempeño y que el **RSSI** por si solo, no es un buen medidor ya que las mediciones no muestran una fuerte correlación.

3.4. Análisis del Sistema

Al ser **LoRa** una tecnología relativamente nueva, algunos trabajos se han concentrado en evaluar sus características de manera más general.

En el caso de [14], se hace la medición del desempeño de un único nodo **LoRa** utilizando la tasa efectiva de *uplink* y tiempo de transmisión de datos. Para varios escenarios, se analiza el número máximo de nodos que pueden ser servidos por un GW. Se demuestra que la capacidad de *uplink*, depende de la distancia a la Estación Base (BS) y no excede de 2 kbps. En conclusión, los autores determinan que solo BS **LoRa** puede servir teóricamente a millones de dispositivos, sin embargo, la mayoría de estos deben estar a una distancia media de la BS. **LoRaWAN** tiene gran cobertura, y escalabilidad con poco tráfico, sin embargo, tiene baja confiabilidad, retardos, y bajo desempeño en tráfico *downlink*. **LoRa** debe ser usado, por lo tanto, con dispositivos con poco tráfico que no requieran estricta latencia o confiabilidad por ejemplo, monitoreo ambiental no crítico.

Otro trabajo que hace un análisis general es el presentado en [17]. En este artículo, se provee un marco de modelado de desempeño de una red **LoRa** con un GW. Se incluyen peculiaridades de **LoRa** como la técnica de modulación, limitaciones de regulación y el uso de ALOHA. Se determina que la probabilidad de cobertura decae exponencialmente con el aumento de nodos debido a la interferencia de señales utilizando la misma secuencia de spreading. El análisis teórico matemático realizado en este trabajo fue verificado mediante simulaciones. Analizando los resultados de la simulación, se obtuvo que el aumento de nodos, produce interferencia que conlleva a un problema de desempeño y falta de escalabilidad.

Como se puede observar, existen resultados comunes entre los estudios que muestran a **LoRa**



como una tecnología útil para ciertas aplicaciones como redes de sensores que no requieran gran fiabilidad ni escalabilidad.

3.5. Conclusiones

Los trabajos realizados hasta el momento, demuestran que la tecnología **LoRa** no tiene un escenario de operación definido por lo que la investigación se ha centrado en probar diferentes enfoques con el objeto de definir el área de trabajo ideal.

La capa física **LoRa** ofrece ventajas relacionadas con el alcance, consumo energético y simplicidad. Estas ventajas se ven reflejadas en los diferentes trabajos realizados en los cuales se destacan las variables de medición de la calidad de enlace usadas: **PER**, **RSSI** y **SNR**. Otro aspecto a destacar en este punto es que no existe un consenso con respecto al número de paquetes a enviar y algunas de las características de la transmisión, no son presentadas, complicando la replicabilidad de algunos de los estudios. Quizás, el aspecto más importante a reflejar es el alcance logrado. El mayor alcance, se logra en [6] con 20km y sin obstáculos. Es importante recalcar en este punto que la mayoría de los trabajos utilizan 868 MHz y no 915MHz lo cual presenta una oportunidad para más investigaciones.

Los trabajos relacionados con la capa **MAC**, se enfocan en el desempeño general del sistema, buscando utilizar de la mejor manera las características de **LoRa**. En este documento se revisan tres principales enfoques de capa **MAC**: **LoRaWAN**, **LoRaBlink** y **LoRa FABIAN**. Cada una de estas capas **MAC** tiene diferentes enfoques. **LoRaWAN** pretende el uso de **LoRa** para Internet de las cosas con arquitectura de un salto. Por otro lado, **LoRaBlink** permite multisalto, manteniendo la eficiencia energética. Por último, **LoRa FABIAN** adapta de mejor manera **LoRa** a los protocolos de Internet para facilitar su uso.

Por último, existen estudios que evalúan **LoRa** desde un plano superior. Uno de los aspectos evaluados es la escalabilidad en la que se han realizado simulaciones y pruebas de campo en las que se concluye que la confiabilidad de **LoRaWAN** es baja y debe ser usado en aplicaciones no críticas. Por otro lado, se evalúa también el desempeño general de **LoRa** en el que la cobertura es un aspecto esencial que decae exponencialmente con el aumento de nodos.



Capítulo 4

Metodología



En este capítulo se trata la metodología de manera técnica, mostrando las características de los dispositivos utilizados, la disposición física de los mismos, los ambientes elegidos y la metodología utilizada para las mediciones y su posterior análisis.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

4.1. Introducción

Uno de los pilares de la investigación es sin duda la replicabilidad. La replicabilidad se basa en que un estudio debe producir los mismos resultados si se repite exactamente. Para lograrlo, es importante que la metodología se encuentre clara para el lector, es por esto que en este capítulo se tratan aspectos técnicos de los dispositivos utilizados así como los parámetros utilizados para su configuración.

Otro punto importante al hacer un estudio de campo es el describir el ambiente a profundidad para determinar todas las variables que podrían incidir en la toma de datos. Parte fundamental de la metodología es la descripción del procedimiento de medición, en el que se explica cómo se midieron las variables como el **RSSI**, **SNR** o **PER**. Por último, se explican los análisis estadísticos a realizarse en el siguiente capítulo y cuál es su influencia sobre el estudio.

4.2. Descripción de Equipos

En este punto, se describen los equipos utilizados durante las mediciones de **RSSI**, **SNR** y **PER**. Primero, se da una breve descripción del kit de Evaluación de **LoRa** en la sección 4.2.1, luego, en la sección 4.2.2, se habla sobre el Raspberry Pi, que controla al transmisor (mota o nodo), y finalmente, en la sección 4.2.3, se presenta la disposición de los equipos utilizados en las pruebas.

4.2.1. Kit de Evaluación de **LoRa** - 900

El kit de evaluación de **LoRa** provee varias herramientas para probar parámetros como el alcance y tasas de datos (**DR**) de **LoRaWAN**. El kit se compone de un *Gateway* y dos motas o nodos con el módulo RN2903. En la Figura 4.1 se observan los componentes mencionados. A continuación, se describen las principales características de los dispositivos:

Gateway LoRaWAN con tarjeta de RF

El *gateway LoRa* es una placa demostrativa fabricada para el uso con módulos que utilicen los transceptores RN de Microchip a 915 MHz. Provee la comunicación con el servidor de aplicación de la red **LoRa**. Los paquetes *Uplink* son capturados y retransmitidos a través del protocolo TCP/IP de acuerdo a la especificación de **LoRaWAN**. Figura A.8.

La tarjeta de radio captura todos los paquetes *Uplink* usando dos transceptores Semtech SX1257 y los envía al procesador de banda base SX1301 que a su vez los envía a la tarjeta *Gateway* vía Interfaz Periférica Serial (**SPI**). La tarjeta *Gateway* recibe la

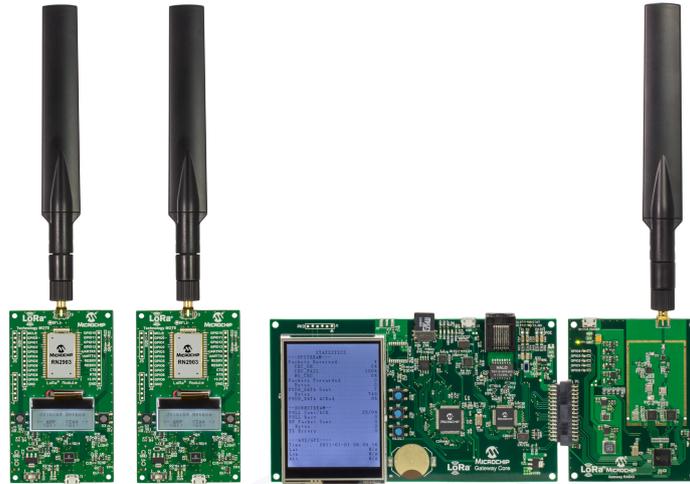


Figura 4.1: Kit de Evaluación de LoRa - 900 [5]

información capturada por la tarjeta de red. Utilizando el PIC-24 con el dispositivo codificador (ENC624J600), el *gateway* convierte los paquetes en TCP/IP y los envía al puerto ethernet.

Mota LoRa RN2903

La mota LoRa es una tarjeta demostrativa que facilita un primer acercamiento hacia la tecnología LoRa. Figura 4.3. Provee acceso al módulo LoRa a través de un puente USB a UART y soporta conexiones mediante puertos GPIO. El acceso USB es provisto mediante un PIC 18 que es parte de la placa que permite el manejo del módulo LoRa con comandos ASCII. Se puede también modificar la información del PIC utilizando los conectores

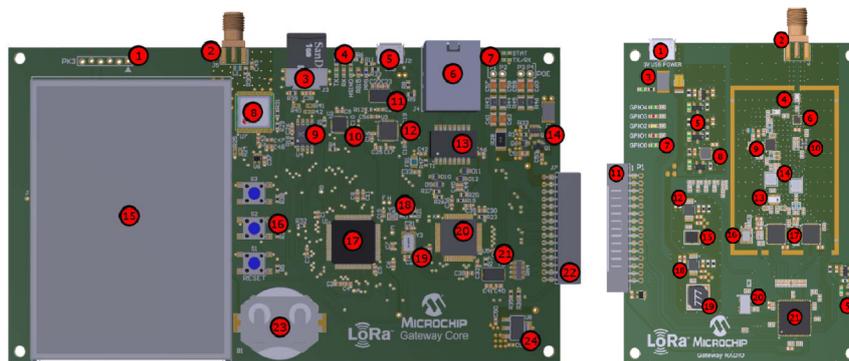


Figura 4.2: Tarjeta RF y Gateway [6]

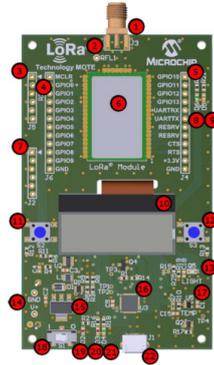


Figura 4.3: Mota LoRa [7]

disponibles en la tarjeta.

Se soportan dos modos: **USB** y **batería**. Cuando la tarjeta está conectada a un computador mediante USB, opera en modo USB. Como se mencionó anteriormente el PIC18LF45K50 funciona como un puente USB-UART, de manera que se puedan enviar comandos directamente al módulo.

Cuando no está conectado mediante USB sino energizado por las baterías AAA, la tarjeta entra en modo batería. En este modo el PIC18LF45K50 puede ejecutar funciones personalizadas enviando comandos ASCII directamente al módulo.

4.2.2. Raspberry Pi 3 Modelo B

Raspberry Pi es una microcomputadora linux de bajo costo (\$20-\$35) del tamaño de una tarjeta de crédito. Fue desarrollada por la fundación Raspberry Pi, esta fundación está enfocada en promocionar de las ciencias computacionales y en hacer que el aprendizaje sea fácil [8]. Para este caso, fue utilizado para el envío de paquetes mediante el modo USB de la mota descrita en la sección anterior. Figura 4.4.

4.2.3. Disposición de Equipos

La disposición de los equipos se muestra en la Figura 4.5. El nodo o mota LoRa es controlado mediante la interfaz USB por el Raspberry Pi, el cual envía paquetes ASCII. En el lado del receptor, los paquetes son recibidos por el *Gateway* y reenviados mediante TCP/IP hacia el servidor que captura los mismos y los guarda en su base de datos.



Figura 4.4: Raspberry Pi 3 modelo B [8]

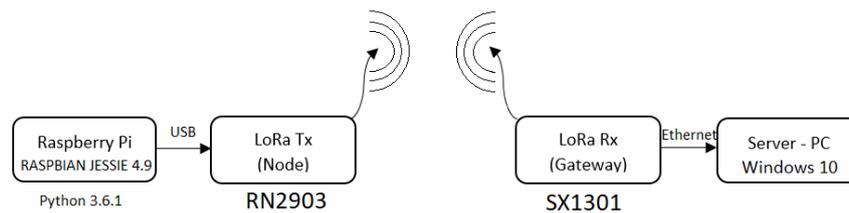


Figura 4.5: Disposición Física de Dispositivos

4.3. Configuración de Dispositivos

Al ser los dispositivos un kit de evaluación de [LoRaWAN](#), algunas de las funciones como el envío de datos o el servidor, ya venían implementadas, sin embargo fue necesaria la configuración y la modificación, en el caso del nodo para ajustar los parámetros de transmisión a la metodología escogida y descrita en la Sección 4.5. En el Apéndice A, se detalla la configuración de los dispositivos descritos.

4.4. Descripción del Ambiente

El objetivo de la investigación es el de evaluar el rango de transmisión de [LoRaWAN](#) y sus características de propagación en ambientes forestales en las riveras de ríos, usando diferentes mediciones. Para estas mediciones, se tomó en cuenta el ambiente planteado en el proyecto de aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba [12]. Dado que se requiere darle generalidad a la investigación, se escogieron tres ambientes en zonas: urbana, semiurbana y rural de la ciudad de Cuenca, Ecuador. En los cuales



Figura 4.6: Ambiente 1 - Río Tomebamba

se buscó que exista diferente densidad forestal así como diferente vegetación.

Por trabajos relacionados con mediciones de [RSSI](#), se sabe que las mismas usualmente se realizan en tramos en los que existe una línea recta entre el transmisor y el receptor, por lo que se trató que los ambientes seleccionados pertenezcan a tramos rectos [24, 41].

En cuanto a los factores climáticos, las mediciones se tomaron en el día, en horas de la mañana y la tarde. La temperatura promedio es un parámetro difícil de estimar puesto que resulta sumamente variante en esta región del país, sin embargo, de manera general varía entre los 10 y 19 grados centígrados. No se registraron precipitaciones ni niebla durante las mediciones. A continuación, se describen con detalle cada uno de los ambientes analizados.

4.4.1. Ambiente 1: Urbano - Río Tomebamba

El río Tomebamba es uno de los principales afluentes de la ciudad de Cuenca. Fue escogido como ambiente propicio ya que cruza a la ciudad de Cuenca cerca de su zona urbana. La Figura 4.6 muestra el tramo escogido. Este tramo, fue elegido porque no presenta mayor curvatura y por su cercanía a la Universidad de Cuenca.

Vegetación

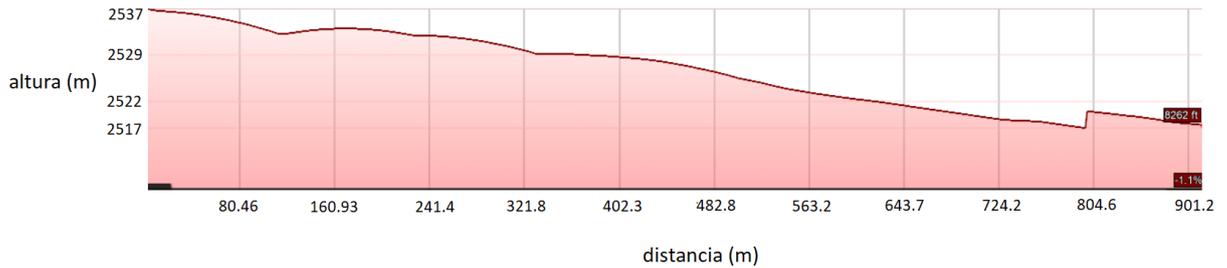


Figura 4.7: Ambiente 1 - Esquema de Elevación

En cuanto a la vegetación, se observan variadas especies de árboles con alturas de entre 2 y 4 metros, plantadas con una distancia de entre 3 a 5 metros.

Topografía

La topografía es uno de los factores más importantes en la medición de propagación ya que influye directamente en la potencia recibida en el *Gateway*. En la Figura 4.7, se muestra el perfil de elevación.

Otros

Siguiendo los lineamientos de medición planteados en [12], los envíos se realizaron a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo y lo más próximos a la orilla que es dónde se concentra la mayor cantidad de vegetación. Se debe resaltar que en ciertos tramos de la medición, por obstáculos como puentes, el transmisor se encontraba a una altura mayor, lo que influye en los resultados que se mostrarán en el capítulo 5. Al ser éste un estudio exploratorio, se decidió medir en las dos orillas del río, que tiene un ancho variable de entre 10 y 18 metros, con el objetivo de definir la diferencia que puede existir entre las dos orillas de un mismo río. Por este motivo, en los siguientes capítulos se presentarán dos mediciones relacionadas con el ambiente 1.

4.4.2. Ambiente 2: Semiurbano - Rio Machángara

El segundo ambiente elegido es otro de los afluentes de la ciudad de Cuenca. Este río nace al norte del parque nacional El Cajas. Se escogió este ambiente porque se encuentra al borde del perímetro urbano de la ciudad. No existen grandes construcciones cerca del mismo y presenta características de ambiente semiurbano. De manera más precisa, se escogió el tramo del sector de Patamarca, al frente de la ciudadela de los médicos. La Figura 4.8, muestra el tramo medido que tiene las siguientes características:

Vegetación

En el caso del río Machángara, la densidad de vegetación presente, fue notablemente



Figura 4.8: Ambiente 2 - Río Machángara

menor. Se observaron principalmente dos clases de vegetación: arbustos de hasta tres metros de altura y gran cantidad de eucaliptos de hasta siete metros de altura, con espaciamentos de entre tres y siete metros entre ellos.

Topografía

La topografía del lugar escogido no presenta grandes pendientes, por lo que puede considerarse plana.

Otros

De igual manera que en el ambiente 1, se debe considerar, en el análisis de resultados que en algunos puntos, debido a la metodología de medición que será descrita en la Sección 4.5, algunos envíos resultan en zonas poco favorables en cuanto a la altura del transmisor o a la vegetación cercana.

4.4.3. Ambiente 3: Rural - Río Yanuncay

Las WSN, como se revisó en el segundo capítulo, pueden ser desplegadas en variedad de ambientes. Es por esta razón que el tercer ambiente complementa los anteriores, presentando un escenario rural libre de edificaciones. De manera específica, las mediciones se realizaron en la población de Barabón. En la Figura 4.9 se presenta el tramo medido, que tiene las siguientes características:

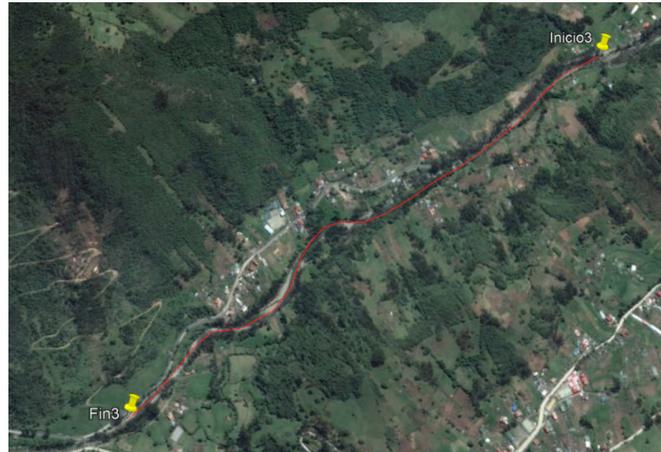


Figura 4.9: Ambiente 3 - Río Yanuncay



Figura 4.10: Ambiente 3 - Esquema de Elevación

Vegetación

En el caso de este río, se observó mayor densidad de vegetación así como una mayor variedad de especies de árboles y plantas. Existen árboles entre 1 y 7 metros de altura, plantados a menos de un metro de distancia entre los mismos.

Topografía

La zona elegida está cerca al parque nacional El Cajas, por lo que presenta una tendencia a la elevación del terreno que se observa claramente en la Figura 4.10.

Otros

Al no existir construcciones aledañas, se observa una mejora significativa en términos de RSSI, SNR y número de paquetes recibidos, lo cual será analizado en el Capítulo 5.



4.5. Descripción del Procedimiento

El procedimiento de medición, consistió en el envío de paquetes desde un transmisor (mota) que variaba su distancia en intervalos fijos. El receptor (*Gateway*), y el transmisor fueron colocados de manera fija a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo, con el objetivo de que la señal pase a través de la vegetación. Tanto el transmisor como el receptor cuentan con antenas de 1.3 dBi de ganancia. En cada punto se enviaron 20 paquetes, de los cuales se recolectó **RSSI**, **SNR** y número de paquetes no recibidos.

4.5.1. Intervalos de Medición

Para la adquisición de datos, se utilizó el proceso de medición llamado de promediado espacial, propuesto por [44]. De acuerdo a este procedimiento, uno debe moverse una distancia de entre 20λ y 40λ en una frecuencia dada.

Como se dijo en el marco teórico, **LoRaWAN** hace saltos pseudoaleatorios de frecuencia, sin embargo, para el cálculo realizado en las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.3), se consideró la frecuencia de funcionamiento de los equipos de 915 MHz.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{915 * 10^6} = 0,327m \quad (4.1)$$

$$20 * \lambda = 6,54m \quad (4.2)$$

$$40 * \lambda = 13,08m \quad (4.3)$$

Dado que el valor debe estar en el intervalo entre (4.2) y (4.3), se eligió 10 m por operatividad.

4.5.2. Paquetes Enviados

Dado que los equipos descritos utilizan **LoRaWAN**, la configuración de parámetros como el **SF**, **BW**, y **CR** se encuentran limitados, no sólo por la especificación de parámetros regionales de **LoRaWAN** [45], que se puede encontrar en la Tabla 2.3 sino por las características técnicas del kit de desarrollo utilizado. En la Tabla 4.1, se muestran los **DR** permitidos.

Tabla 4.1: Tasas de Datos Permitidas

Data Rate	Configuración [SF/BW]	Bit Rate [bit/sec]
0	SF10 / 125 kHz	980
1	SF9 / 125 kHz	1760
2	SF8 / 125 kHz	3125
3	SF7 / 125 kHz	5470



Figura 4.11: Captura de Paquetes

Dado que es un estudio inicial, se utilizaron las tasas de datos mínima y máxima DR0 y DR3 en cada punto de envío con 10 paquetes para cada DR. Para facilitar el cálculo de paquetes perdidos, cada mensaje es enviado con un número de envío en su carga útil.

4.5.3. Captura de Paquetes

Al ser este un trabajo de evaluación referente a parámetros físicos de la tecnología LoRaWAN, y por la facilidad de guardado de los paquetes recibidos, se optó por no utilizar el servidor LoRaWAN puesto que los valores de RSSI, SNR y carga útil se pueden obtener y almacenar de una manera más óptima haciendo una captura de los mismos, la configuración se detalla en el Apéndice A.1.

Dado que el Gateway recibe los paquetes y los envía por el puerto Ethernet hacia el servidor, estos pueden ser fácilmente capturados con un software como Wireshark. En Wireshark, se realiza la captura de los 20 paquetes enviados y se los guarda para su posterior descryptado.

En la Figura 4.11 se muestra la imagen de una de las capturas realizadas con Wireshark y guardadas en formato .txt:

Como se observa, los paquetes de DR0 y DR3, se encuentran mezclados y la carga útil, se encuentra encriptada, por lo que es necesario un proceso de selección, descryptado y almacenamiento, descrito en la Sección 4.5.4.



4.5.4. Descriptado y Almacenamiento

Para realizar la separación, descriptado y almacenamiento de los paquetes, se hizo un script en Python que utiliza el decodificador de paquetes de LoRaWAN [46]. este decodificador, requiere de la instalación previa de Node.js y npm, que son plataformas de programación basadas en Javascript. El decodificador, también distingue los diferentes tipos de paquetes posibles, por lo que fue necesario modificarlo para realizar sólo la decodificación. El código final, se encuentra en el Apéndice B. El código en Python realiza el siguiente procedimiento:

- Separa los diferentes paquetes en sus componentes (RSSI, SNR, frecuencia, modulación, tasa de codificación, canal y carga útil)
- Decodifica las cargas útiles de cada uno de los paquetes
- Separa los paquetes con DR0 de los de DR3
- Almacena cada captura en un archivo .csv
- Crea un archivo resumen con las medias y desviaciones estándar de los RSSI y SNR.

4.6. Métricas de Análisis de Datos

A continuación, se desarrollan las herramientas que serán utilizadas para el análisis de las mediciones obtenidas en los tres ambientes anteriormente descritos.

4.6.1. Descripción de Datos con Medidas Numéricas

Las medidas numéricas carecen de la efectividad de las gráficas, sin embargo ayudan a tener una idea de la tendencia de los datos sin la necesidad de observar la imagen de los mismos [47].

Medidas Centrales: Son medidas a lo largo del eje horizontal de una distribución que localizan el centro de la misma. La media, mediana y moda son utilizados para describir conjuntos de datos.

Medidas de Variabilidad: Dos conjuntos de datos pueden tener el mismo centro pero diferente dispersión o variación. Las medidas de variabilidad ayudan a crear una imagen de la distribución de los datos. Entre ellas se encuentra el rango, que es la diferencia entre la medición más grande y la más pequeña; la varianza de la población y de la muestra que se definen como los promedios de los cuadrados de las desviaciones alrededor de la media. La desviación estándar es igual a la raíz cuadrada positiva de la varianza. Una

característica de ésta es que su unidad de medida es la misma que la de las mediciones [47].

4.6.2. Estimación de Intervalos de Confianza

Se trata de encontrar un intervalo en el que se esté seguro con cierta probabilidad de que sea un parámetro de interés. Esta probabilidad se llama coeficiente de confianza. Usualmente se construyen intervalos de confianza al 95 % [47].

Construcción del Intervalo de Confianza

Cuando la distribución muestral de una variable, en el caso el RSSI, es aproximadamente normal, se puede aplicar la Ecuación 4.4 que se basa en el número de muestras y en la desviación estándar.

$$\text{media} \pm 1,96 * \frac{\theta}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

Siendo θ la desviación estándar y n el número de muestras.

Intervalo de Confianza en el Caso de cantidades de Muestras Pequeñas

Existen casos en el que es difícil o resulta costoso obtener un gran número de observaciones. En estos casos la Ecuación 4.4 puede no aplicarse, siendo necesaria una distribución alternativa como la t Student [48]. En este caso, el intervalo de confianza se puede encontrar con la Ecuación 4.5.

$$\text{media} \pm t * \frac{\theta}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

El valor de t se encuentra en la tabla de la distribución t Student, en donde se deben tomar en cuenta $n - 1$ grados de libertad, además del nivel de confianza típico de 0.95. Dado que las muestras de este trabajo tienen un $n = 10$, se debe utilizar la distribución t-student para calcular los intervalos de confianza.

4.6.3. Análisis de Correlación

El análisis de correlación, se basa en el coeficiente de correlación (r) que no es más que una medida de la fuerza de la relación entre dos variables. Este puede asumir valores entre -1 y +1.

Un $r = -1$ indica una relación negativa perfecta entre las variables. En general, mientras mayor



sea el valor absoluto de r , más fuerte será la relación entre las variables [48].

Este análisis es usado en este trabajo para determinar la fuerza de la relación entre las mediciones 1 y 2 que se realizaron en dos orillas diferentes del mismo río (Ambiente 1).

4.6.4. Comparación de Poblaciones

El objetivo de esta prueba es el de comparar las mediciones de RSSI entre los tres ambientes estudiados. Para esto, se utiliza el test de **Kruskal-Wallis** que prueba la hipótesis con respecto a la distribución de tres o más poblaciones, utilizando las medianas. Esto se lo hace puesto que el RSSI no sigue una distribución normal. Se prueba la hipótesis nula de que los tres ambientes tienen la misma distribución [47].

Esto se realiza con el objetivo de saber si es necesario hacer un ajuste a los tres ambientes definidos. En el caso de que se cumpla la hipótesis alternativa de que al menos un ambiente es diferente, se procede a realizar el test de **Dunn** que reporta los resultados entre las combinaciones de los ambientes [47]. Estas pruebas, se realizarán utilizando el software libre de análisis estadístico R¹.

4.7. Conclusiones

La evaluación de rango de transmisión requiere que se tomen en cuenta diferentes variables que, para este trabajo, se basan en el procedimiento y equipos que son descritos con detalle en este capítulo.

El kit de Evaluación de LoRa tiene la ventaja de que permite variar la mayoría de los parámetros de configuración disponibles en LoRa, esto con el objetivo de realizar pruebas globales del sistema. La adición de sensores de temperatura y luz en la mota, permiten probar la fiabilidad en la transmisión de la información. La adición de una interfaz gráfica en conjunto con un servidor pre configurado, ayudan a que la experiencia del usuario ante esta nueva tecnología sea la mejor.

Los ambientes escogidos para la toma de muestras de RSSI, SNR y PER obedecen a la necesidad del despliegue de sensores en las orillas de ríos en la ciudad de Cuenca que ayuden al monitoreo en tiempo real del caudal de los mismos. Para ganar generalidad se escogieron tres ambientes: urbano, semiurbano y rural cuyos datos y resultados, son explicados en capítulos posteriores.

¹<https://www.r-project.org/>



Las pruebas estadísticas como el análisis de correlación y los test de comparación de distribuciones, ayudarán a validar las mediciones realizadas, interpretar y a mostrar los resultados de la mejor manera.

Por otro lado, como se explicó en la introducción, se ha considerado como importante el describir con exactitud el procedimiento de medición para que el mismo pueda ser validado y de ser necesario, replicado.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Capítulo 5

Resultados: Análisis de Mediciones y Ajuste del Modelo Empírico basado en RSSI y SNR

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

En este capítulo se cumple el último objetivo planteado en este trabajo, que es el de ajustar un modelo de pérdidas de trayectoria para el uso de LoRa en márgenes de ríos con ambientes forestales. Antes del ajuste, se realizan pruebas estadísticas de validación que demuestran que la correlación entre las dos orillas de un río es alta y que no existe relación de distribuciones entre los ambientes urbano y semiurbano. Se comparan los diferentes ambientes y se muestra cómo la desviación estándar disminuye en el ambiente rural debido a que existen menos obstáculos. Finalmente, se muestran las pérdidas de paquetes en las mediciones como medida de calidad de la transmisión.



5.1. Introducción

Como se planteó en el capítulo anterior, con los valores de **RSSI** y **SNR**, se puede generar un modelo de pérdidas de trayectoria que sea fiable y que pueda ser ajustable a una ecuación logarítmica que sirva para hacer estimaciones de cobertura y simulaciones con redes de sensores que usen tecnología **LoRaWAN**. Antes de generar los modelos, se puede realizar un análisis estadístico de correlación que confirme la hipótesis de que no existe gran diferencia en la propagación de las dos orillas de un mismo río. Esto se lo realizó únicamente con el ambiente 1 (Río Tomebamba).

Los modelamientos se los realizó con la función *fit* de Matlab. En estos se confirma que los ambientes rurales presentan menos obstáculos por lo que se observa un mayor alcance. Por otro lado, se calcula la desviación estándar que está ligada al llamado desvanecimiento por sombra, provocado por obstáculos.

Para finalizar, como se propuso en el primer capítulo, se utiliza la tasa de pérdida de paquetes para saber cuando la transmisión ya no es fiable y por lo tanto las mediciones deben detenerse. Dependiendo de la aplicación, el porcentaje de paquetes perdidos aceptable varía, sin embargo, para este procedimiento, y teniendo en cuenta que la frecuencia de transmisión máxima típica de redes **LoRaWAN** es de cinco minutos, se fijó un límite del 60 % de paquetes perdidos para detener la medición.

5.2. Mediciones Previas

En este punto se describen algunas de las mediciones que sirvieron para determinar la influencia del salto de frecuencia de **LoRaWAN**, el número óptimo de paquetes a enviar y el índice de potencia a seleccionar.

5.2.1. Salto de Frecuencia

Como se explicó en la Sección 2.5, referente a las reglas que utilizan los dispositivos con **LoRaWAN**, los dispositivos finales o nodos transmiten en diferentes canales de manera pseudoaleatoria. Como se observa en la Figura 5.1, al transmitir 100 paquetes en un ambiente de prueba, la frecuencia varía desde 902.3 MHz hasta 903.5 MHz, en intervalos de 200 kHz. El objetivo de este estudio previo fue el de definir si el canal atenúa el **RSSI** de manera selectiva en determinadas frecuencias.

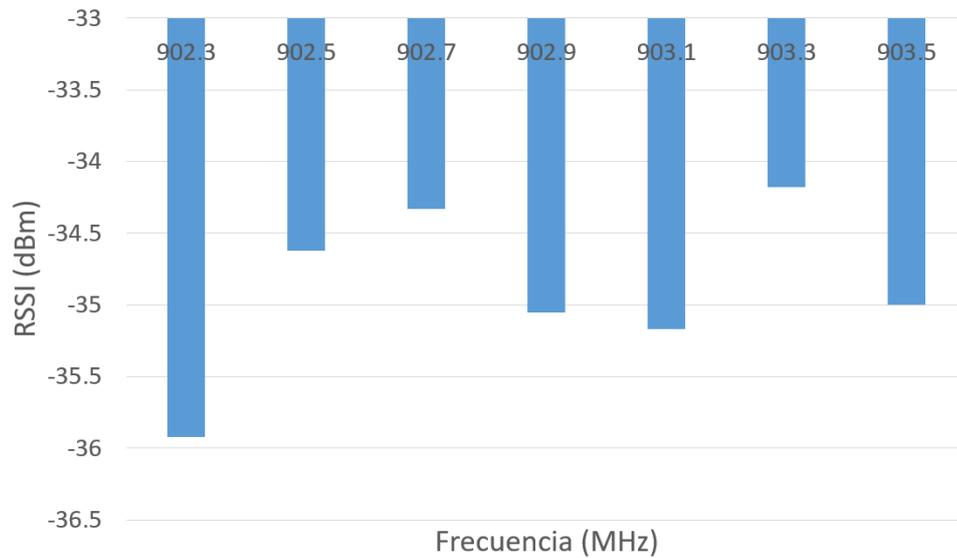


Figura 5.1: Valores de RSSI obtenidos para las diferentes frecuencias

De la Figura 5.1, se puede concluir que no existe un canal selectivo por lo que el salto de frecuencia propuesto por LoRaWAN, es válido.

5.2.2. Cantidad de Paquetes

Para determinar el número de paquetes necesarios en cada punto de transmisión, primero se revisó en los diferentes trabajos que fueron parte del estado del arte, presentado en el capítulo 3. En estos se enviaban diferentes cantidades de paquetes y no se da una explicación a esto. Por este motivo se realizó una prueba en la que se fueron enviando diferentes cantidades de paquetes y se calculó la desviación estándar de cada grupo. En la Tabla 5.1, se observan los resultados.

Se observa que de manera general, la desviación estándar disminuye 1 dBm. Aunque existe esta disminución, la misma no es significativa, por lo que, como se explicó en la sección 4.5.2, en cada transmisión se envían 10 paquetes.

5.2.3. Índice de Potencia

El índice de potencia define la potencia con la que el nodo o mota transmite el paquete. El módulo de Microchip RN2903, admite los índices 5, 7, 8, 9, 10 [49]. Se sabe que la potencia



Tabla 5.1: Resultados de Desviación Estándar con diferentes número de paquetes

Prueba Nro.	Nro. Paquetes	Desviación Estándar (dBm)
1	10	1.94
2	20	1.16
3	30	1.76
4	40	1.63
5	50	2.06
6	60	1.57
7	70	1.18
8	80	1.10
9	90	1.25
10	100	1.05

máxima de transmisión pertenece al índice 5, sin embargo, se realizó una prueba en un ambiente controlado, variando este índice. Los resultados, se observan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Variación de Índices de Potencia

Índice	RSSI promedio (dBm)
5	-23.7
7	-27.9
8	-29.8
9	-30.2
10	-32.3

Como se observa en la Tabla 5.2, el índice 5, provee el mayor RSSI por lo que fue seleccionado para usarse en las mediciones mostradas en la Sección 5.3. Se debe acotar que no se encontró una referencia a la potencia de transmisión de los otros índices. Esta información, fue solicitada a Microchip, sin obtener respuesta.

5.3. Mediciones de RSSI y SNR

Para estas gráficas se tomó en cuenta una distribución t student en cada punto debido al reducido número de muestras (10). En cada gráfica, se muestra la media y el intervalo de confianza al 95%. En las Figuras 5.2 y 5.3, se observan el RSSI y SNR correspondientes a la primera medición. Los demás resultados de las mediciones de RSSI y SNR, se muestran en las gráficas del Apéndice C.

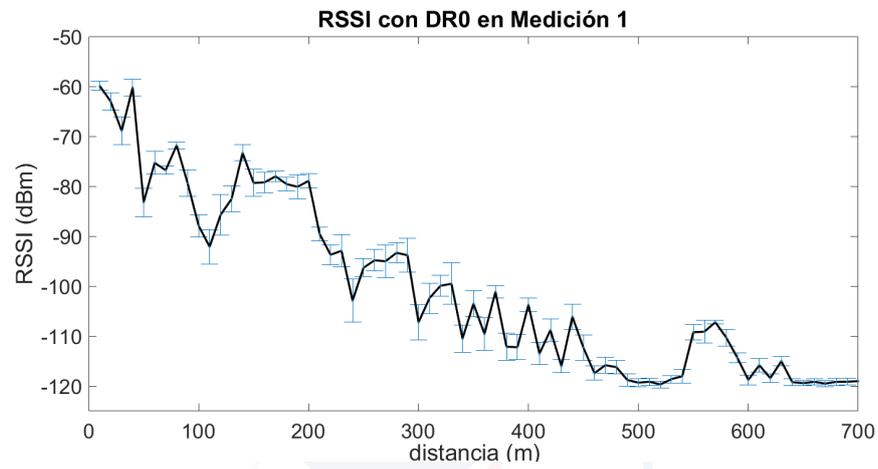


Figura 5.2: Medición de RSSI en Ambiente 1 con DR0

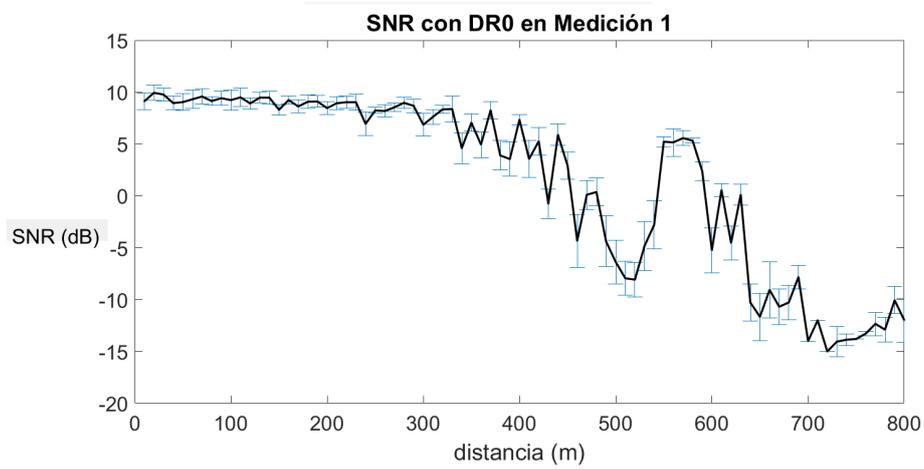


Figura 5.3: Medición de SNR en Ambiente 1 con DR0



5.4. Análisis Estadísticos

A continuación, se presentan los análisis estadísticos que ayudarán a validar las mediciones y a comprobar las hipótesis planteadas en este trabajo.

5.4.1. Correlación

Como se mencionó en el capítulo anterior, la correlación muestra la fuerza de la relación entre dos variables. En este caso, se quiere mostrar que la relación entre los **RSSI** de las dos orillas del Ambiente 1 - Río Tomebamba, es fuerte. Esto indicaría que el cambio de orilla y ligera variación de topografía y vegetación, no afecta en gran medida a los valores de **RSSI**. Las características del ambiente probado se detallan en la Sección 4.4.1.

Análisis de Correlación con DR0

El análisis de correlación muestra una fuerte relación entre las dos orillas presentando un valor de 0.92. En la Figura 5.4, se presentan los dos **RSSI** con DR0 del Ambiente 1. Como se puede observar, se presenta una clara tendencia de linealidad que confirma el alto valor de correlación.

Análisis de Correlación con DR3

De igual manera que en el punto anterior, el valor de correlación muestra una alta relación entre los valores de **RSSI** de ambas orillas del río Tomebamba. El valor obtenido es de 0.92. De igual manera, la gráfica confirma una fuerte relación entre ambas variables. Figura 5.5.

5.4.2. Comparación de Ambientes

Como se explicó en la sección 4.6.4, se realizará una prueba de comparación de las distribuciones en los tres ambientes de medición (urbano, semiurbano y rural). Esto con el objetivo de probar que se requiere un ajuste para cada entorno. Como se observa en la sección 5.3, las mediciones realizadas tanto de **RSSI** como de **SNR**, con DR0 y DR3 son muy parecidas por lo que estas pruebas estadísticas se realizarán solamente con los valores de **RSSI** con DR0 de las Mediciones 1, 3 y 4.

Test de Kruskal-Wallis Al realizar el Test de Kruskal-Wallis en R, se obtuvo un valor p de 0.01. Al ser menor a 0.05, indica una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula, así

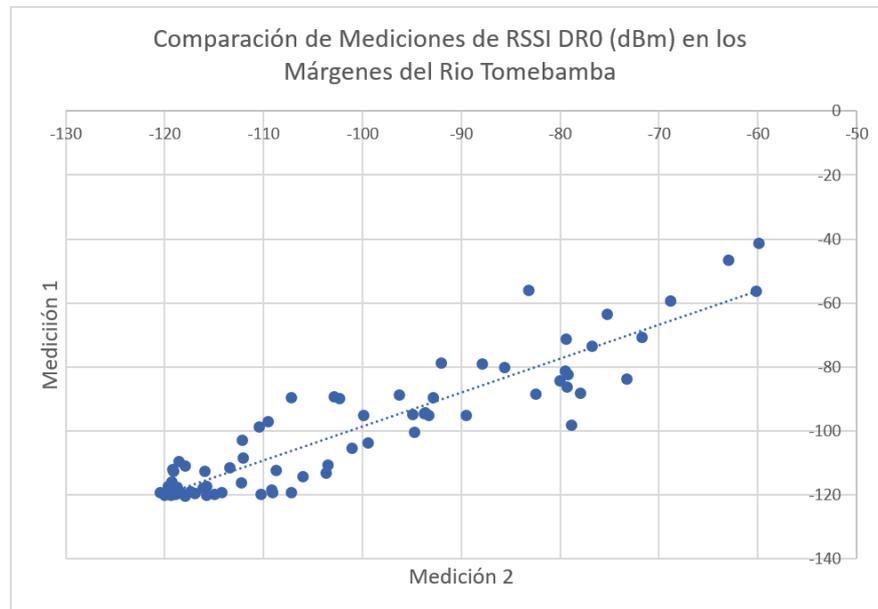


Figura 5.4: Análisis de Correlación de RSSI con DR0 - Ambiente 1

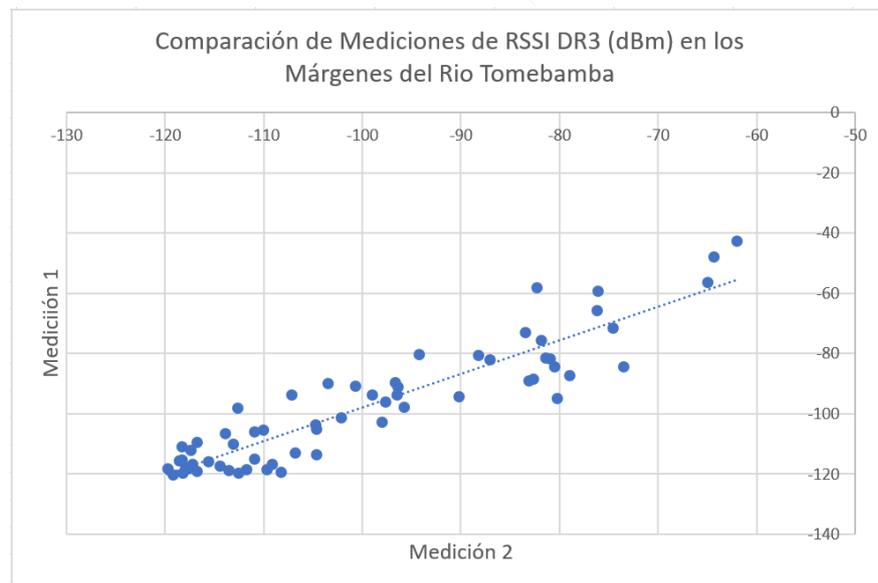


Figura 5.5: Análisis de Correlación de RSSI con DR3 - Ambiente 1



que se puede rechazar la misma. Por lo tanto, las distribuciones de los tres ambientes, no son iguales. Para determinar que ambientes son estadísticamente iguales y cuales no, se utiliza el Test de Dunn.

Test de Dunn

Una vez realizado el Test de Dunn, en la Tabla 5.3 se pueden observar los resultados de la comparación:

Tabla 5.3: Valores P del Test de Dunn

Valor P	Rural	SemiUrbano
SemiUrbano	0.0010	
Urbano	0.3788	0.01

Se puede observar que la única combinación que no rechaza la hipótesis nula es la de Urbano con Rural. Se puede decir entonces que las distribuciones de las demás combinaciones no están relacionadas.

Test de Mann-Whitney-Wilcoxon Ya que al parecer no existe una diferencia significativa en las mediciones urbana y rural, se decidió hacer el test de Mann-Whitney-Wilcoxon que prueba la independencia de dos poblaciones sin la necesidad de asumir que las mismas tienen distribuciones normales [47, 48]. El valor p obtenido fue de 0.9721 por lo que nuevamente se concluye que no existe suficiente evidencia para concluir que los ambientes urbano y rural sean diferentes.

Estos test estadísticos no son usuales en el área de telecomunicaciones, por lo que se recomienda una futura verificación y validación de los resultados obtenidos.

5.5. Modelamiento en Base a Pérdidas de Trayectoria

Como se explicó en la sección 2.6, la ecuación que se utiliza para el modelamiento es una logarítmica. (Ecuación 5.1).

$$P_L(dB) = a + b * \log(d) + X_\theta \quad (5.1)$$

Para realizar el ajuste se debe calcular las pérdidas de trayectoria (PL) utilizando la Ecuación 2.6, con los parámetros fijos presentados en la Tabla 5.4.

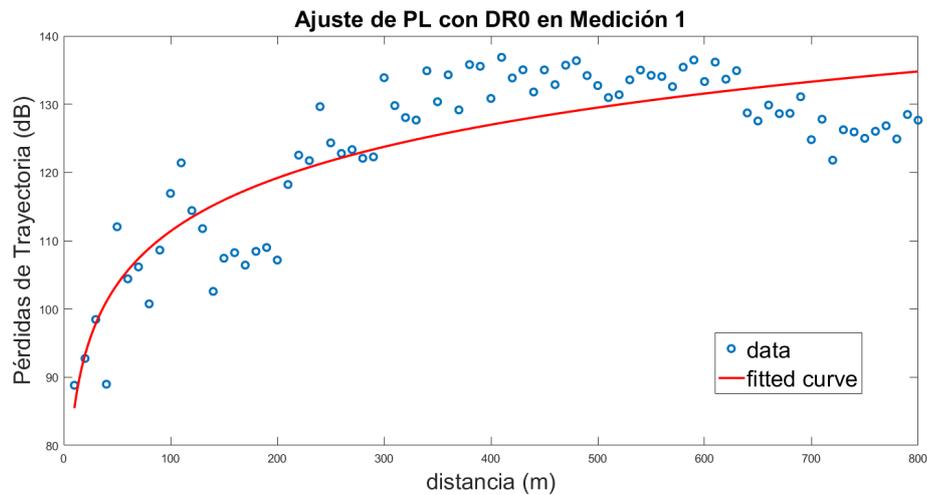

 Figura 5.6: Ajuste de PL del Ambiente 1 con DR0 - Río Tomebamba

Tabla 5.4: Valores utilizados para el cálculo de las pérdidas de trayectoria

Constante	Valor
Ptx	18.5 dBm
Grx	1.3 dBi

5.5.1. Medición 1 - Ambiente Urbano

Pérdidas de Trayectoria con DR0

En la Figura 5.6 se observa el ajuste logarítmico realizado a las PL de la medición 1 con DR0, correspondiente al ambiente urbano descrito en la sección 4.4.1. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.2.

$$P_L(dB) = 59,53 + 11,26 * \log(d) + X_\theta(\theta = 6,29) \quad (5.2)$$

Pérdidas de Trayectoria con DR3

En la Figura 5.7 se observa el ajuste logarítmico realizado a las PL de la medición 1 con DR3, correspondiente al ambiente urbano, descrito en la sección 4.4.1. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.3.

$$P_L(dB) = 53,38 + 12,98 * \log(d) + X_\theta(\theta = 5,12) \quad (5.3)$$

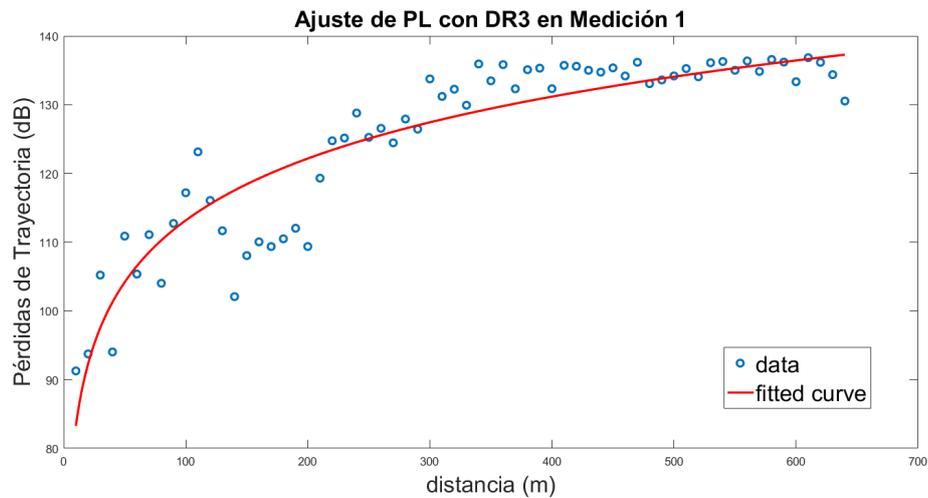


Figura 5.7: Ajuste de PL del Ambiente 1 con DR3 - Río Tomebamba

5.5.2. Medición 2 - Ambiente Urbano - Orilla 2

Pérdidas de Trayectoria con DR0

En la Figura 5.8 se observa el ajuste logarítmico al PL de la medición 2 con DR0, correspondiente a la orilla 2 del ambiente urbano descrito en la sección 4.4.1. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.4.

$$P_L(dB) = 44,96 + 13,39 * \log(d) + X_\theta(\theta = 5,83) \quad (5.4)$$

Pérdidas de Trayectoria con DR3

En la Figura 5.9 se observa el ajuste logarítmico realizado a las PL de la medición 2 con la tasa de datos máxima, correspondiente a la orilla 2 del ambiente urbano descrito en la sección 4.4.1. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.5.

$$P_L(dB) = 26,24 + 17,49 * \log(d) + X_\theta(\theta = 3,72) \quad (5.5)$$

5.5.3. Medición 3 - Ambiente Semiurbano

Pérdidas de Trayectoria con DR0

En la Figura 5.10 se observa el ajuste logarítmico realizado a las PL de la medición 3 con

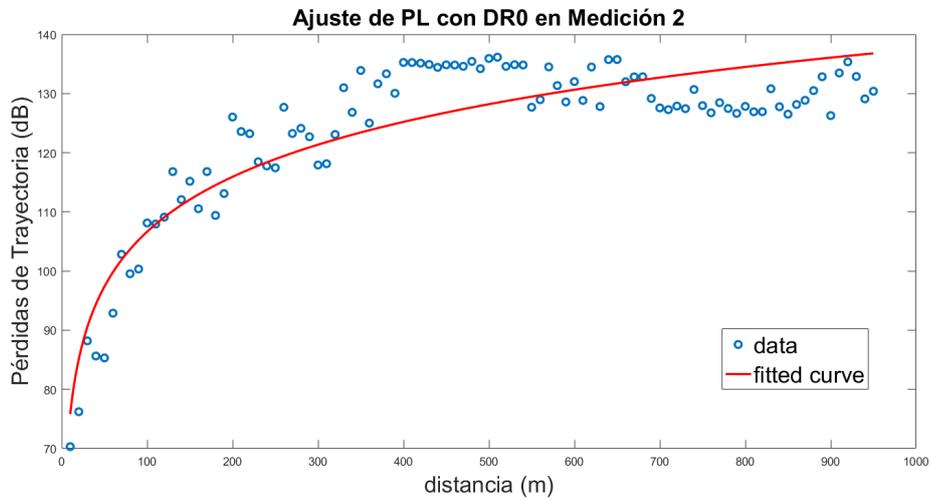


Figura 5.8: Ajuste de PL del Ambiente 1 con DR0, orilla 2 - Río Tomebamba

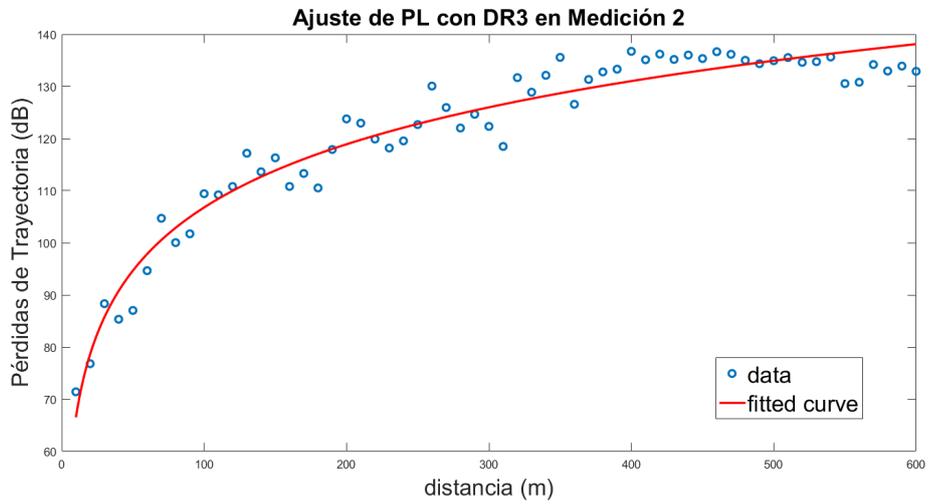


Figura 5.9: Ajuste de PL del Ambiente 1 con DR3, orilla 2 - Río Tomebamba

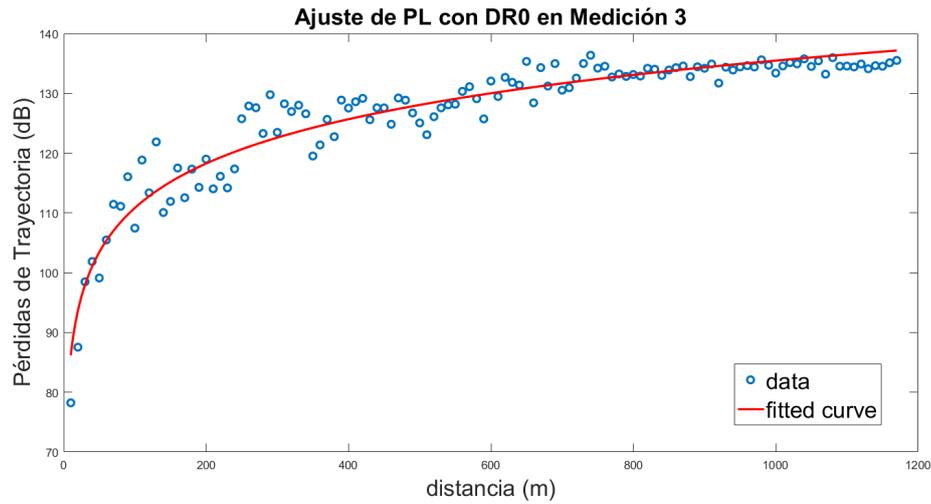


Figura 5.10: Ajuste de PL del Ambiente 2 con DR0 - Río Machángara

DR0, correspondiente al ambiente semiurbano descrito en la sección 4.4.2. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.6.

$$P_L(dB) = 61,55 + 10,7 * \log(d) + X_\theta(\theta = 2,92) \quad (5.6)$$

Pérdidas de Trayectoria con DR3

En la Figura 5.11 se observa el ajuste logarítmico realizado a las PL de la medición 3 con DR3, correspondiente al Ambiente semiurbano descrito en la sección 4.4.2. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.7.

$$P_L(dB) = 62,74 + 10,67 * \log(d) + X_\theta(\theta = 3,20) \quad (5.7)$$

5.5.4. Medición 4 - Ambiente Rural

Pérdidas de Trayectoria con DR0

En la Figura 5.12 se observa el ajuste logarítmico realizado a las PL de la medición 4 con DR0, correspondiente al Ambiente rural descrito en la sección 4.4.3. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.8.

$$P_L(dB) = 55,36 + 11,27 * \log(d) + X_\theta(\theta = 3,73) \quad (5.8)$$

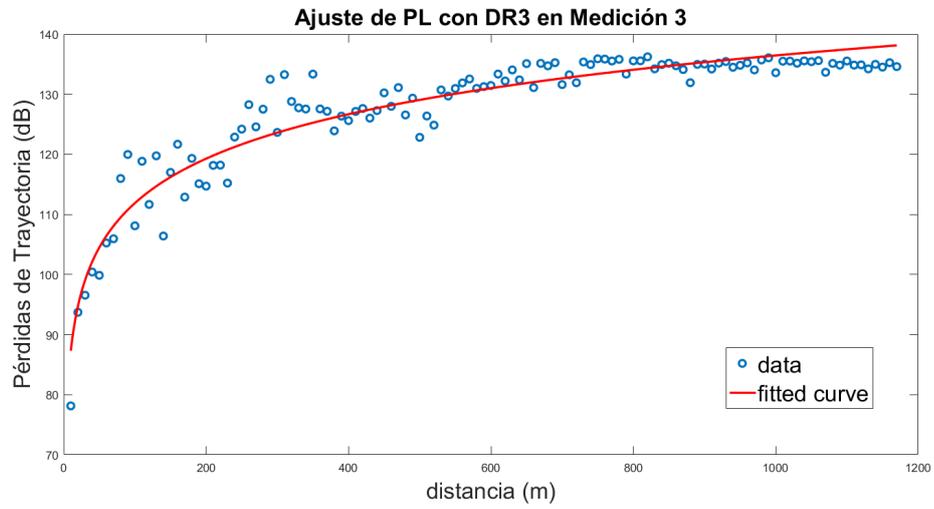


Figura 5.11: Ajuste de PL del Ambiente 2 con DR3 - Río Machángara

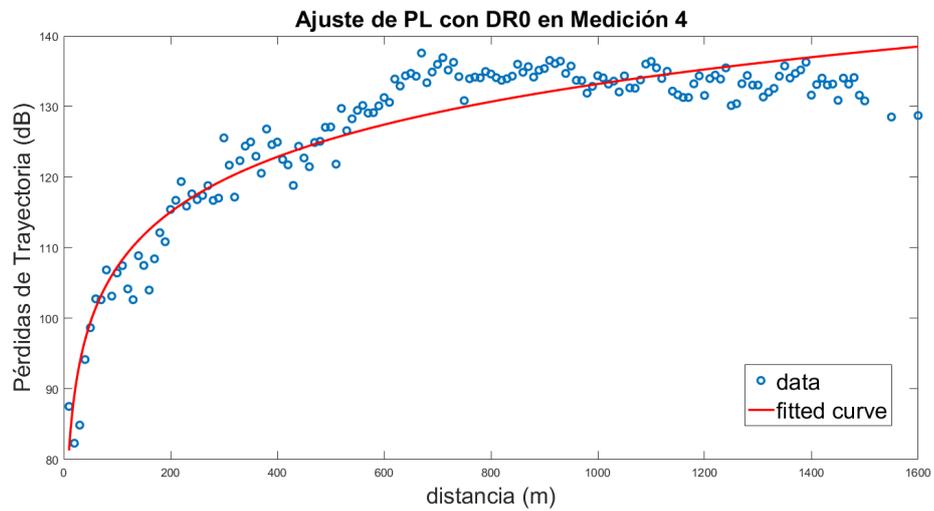


Figura 5.12: Ajuste de PL del Ambiente 3 con DR0 - Río Yanuncay

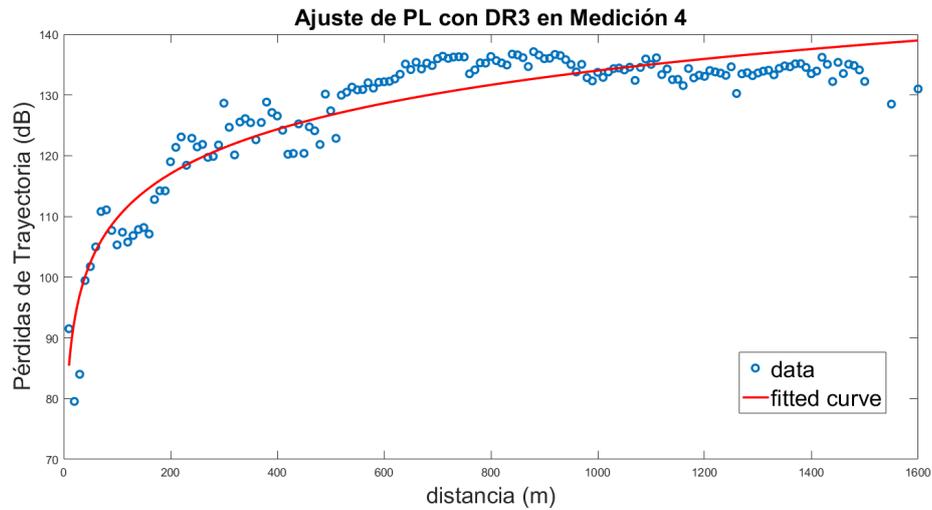


Figura 5.13: Ajuste de PL del Ambiente 3 con DR3 - Río Yanuncay

Pérdidas de Trayectoria con DR3

En la Figura 5.13 se observa el ajuste logarítmico realizado a las PL de la medición 4 con DR3, correspondiente al Ambiente rural descrito en la sección 4.4.3. El resultado del mismo, se presenta en la Ecuación 5.9.

$$P_L(dB) = 61,13 + 10,55 * \log(d) + X_\theta(\theta = 3,88) \quad (5.9)$$

5.5.5. Comparación de Modelos

Una vez obtenidos los ajustes logarítmicos, se puede hacer una comparación para determinar cual de los ambientes provee el mejor alcance al desplegar una red utilizando tecnología LoRa.

Comparación de Ambientes con DR0

A continuación, la Figura 5.14, muestra los ajustes de PL con DR0 en las cuatro mediciones. En la Tabla 5.5, se observa un resumen de los resultados.

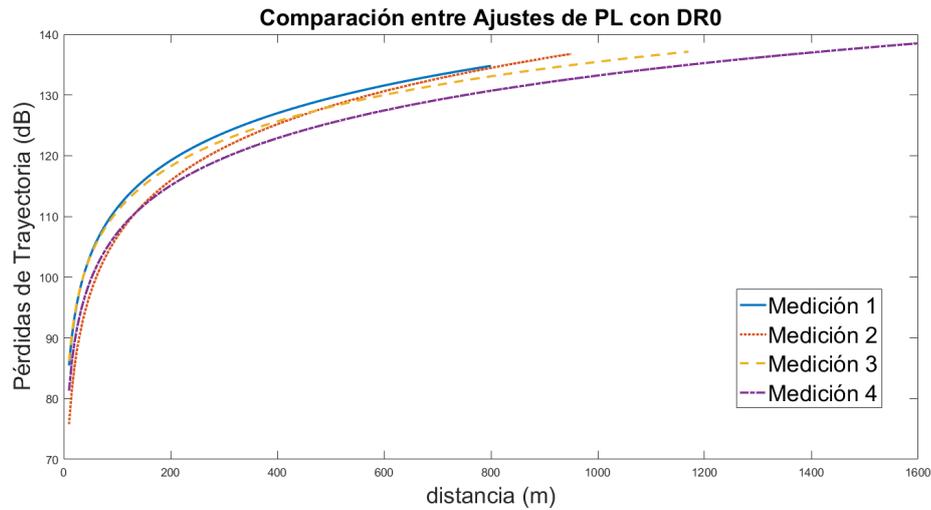

 Figura 5.14: Ajustes de PL con DR0 - Todos los Ambientes

Tabla 5.5: Comparación de Características de Propagación con DR0

Parámetro	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4
Distancia Máxima (m)	800	950	1170	1600
Desviación Estándar (dB)	6.29	5.83	2.92	3.73

Se puede observar que la Medición 4, perteneciente al Ambiente Rural, presenta el mejor alcance de las cuatro. En el caso de la Medición 1, perteneciente al Ambiente Urbano, decrece rápidamente hasta llegar alrededor de 800 metros en donde ya no existe conexión fiable. La Medición 3, como era esperado, presenta un resultado intermedio. En cuanto a las desviaciones estándar, se sabe que se encuentran relacionadas directamente con el entorno. En los ambientes urbanos se presenta mayor cantidad de obstáculos por lo que las mediciones son variantes y la curva no se ajusta de la mejor manera al contrario que en los ambientes semiurbano y rural.

Comparación de Ambientes con DR3

A continuación, la Figura 5.15 muestra los ajustes PL con DR3 en las cuatro mediciones. En la Tabla 5.6, se observa un resumen de los alcances y desviaciones estándar.

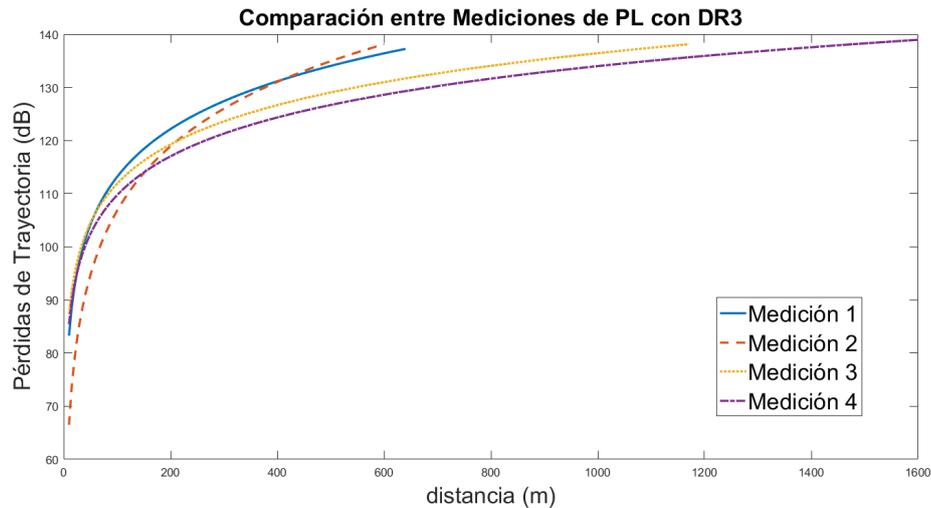

 Figura 5.15: Ajustes de PL con DR3 - Todos los Ambientes

Tabla 5.6: Comparación de Características de Propagación con DR3

Parámetro	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4
Distancia Máxima (m)	640	600	1100	1500
Desviación Estándar (dB)	5.12	5.72	3.20	3.88

De igual manera que en la Figura 5.14, la Figura 5.15 muestra que el ambiente Rural tiene el mayor alcance. Algo que se puede resaltar es que las mediciones 3 y 4 presentan curvas muy parecidas hasta alrededor de los 1200 metros. En cuanto a las mediciones 1 y 2 decaen de manera rápida y su diferencia se debe principalmente al entorno en el que se hicieron las mediciones.

5.6. Tasa de Errores de Paquetes

Como se explicó en el capítulo introductorio, se envían 10 paquetes con cada tasa de datos. En el receptor, se registran cuantos de estos paquetes llegaron con éxito. Esto se lo realiza como una medición del desempeño general de las transmisiones y que además da una pauta para detener las mismas.

A continuación se muestran las tasas de errores de paquetes, que fueron calculadas con Ecuación 5.10 [50].

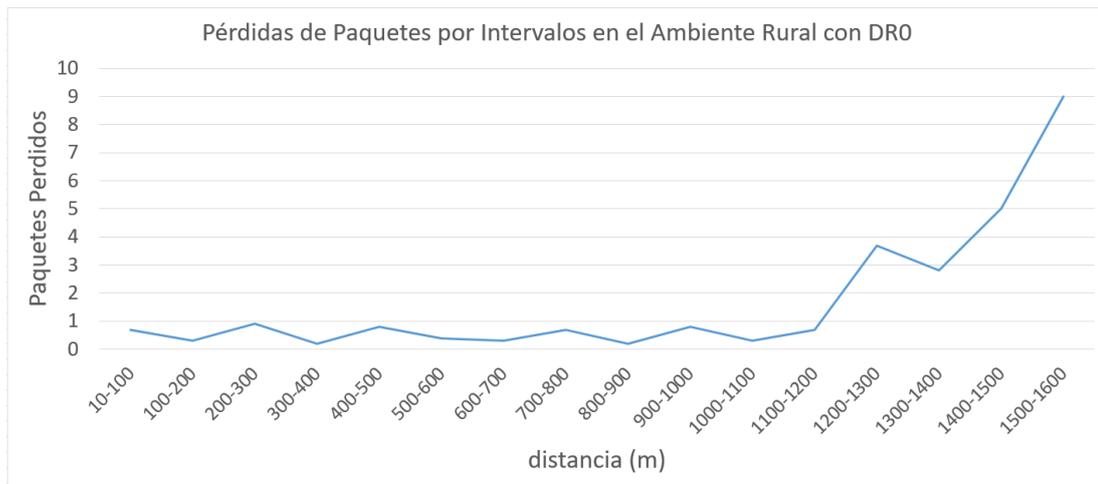


Figura 5.16: Tendencia de Promedios de Pérdidas de Paquetes con DR0 - Medición 1

$$Error = \left| \frac{10 - \text{paquetesrecibidos}}{10} \right| \quad (5.10)$$

En las Figura 5.16, se observa la tendencia de pérdidas de paquetes en la primera medición con la menor tasa de datos. Se observa una tendencia a crecer de manera rápida al acercarse el alcance máximo.

Promedios de Pérdidas de Paquetes enviados con DR0

En la Figura 5.17, se formaron intervalos de 100 metros y se calculó el promedio de paquetes perdidos para las cuatro mediciones realizadas. Se puede observar en las diferentes mediciones que al alcanzar sus límites de cobertura, presentados e las tablas 5.5 y 5.6, la pérdida aumenta rápidamente.

Promedios de Pérdidas de Paquetes enviados con DR3

De igual manera que en la Figura 5.17, la Figura 5.18 presenta la tendencia de aumento de pérdidas de paquetes conforme la distancia aumenta, para el caso de una transmisión con mayor tasa de bits.

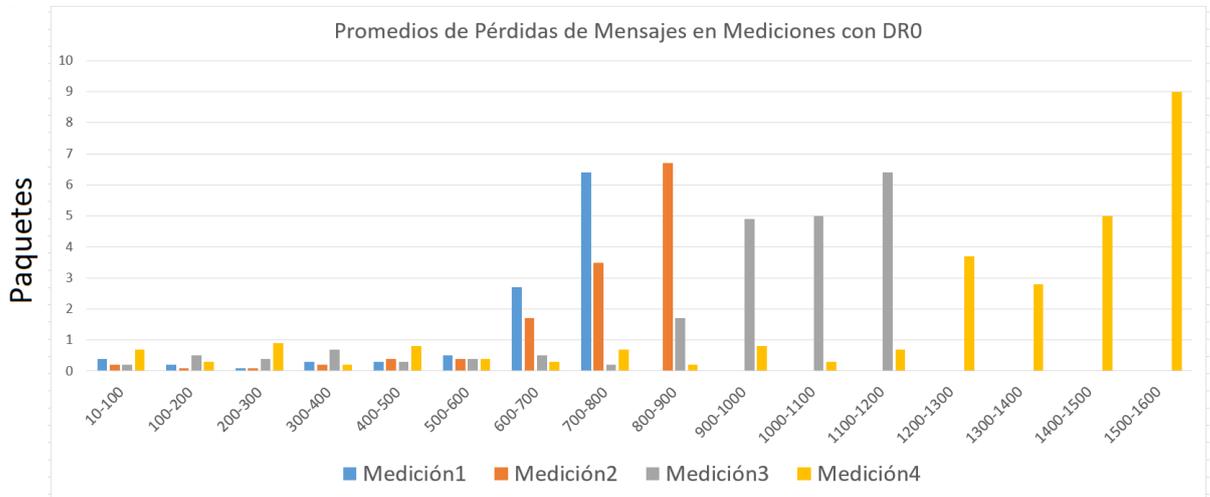


Figura 5.17: Promedios de Pérdidas de Paquetes con DR0 - Todos los Ambientes

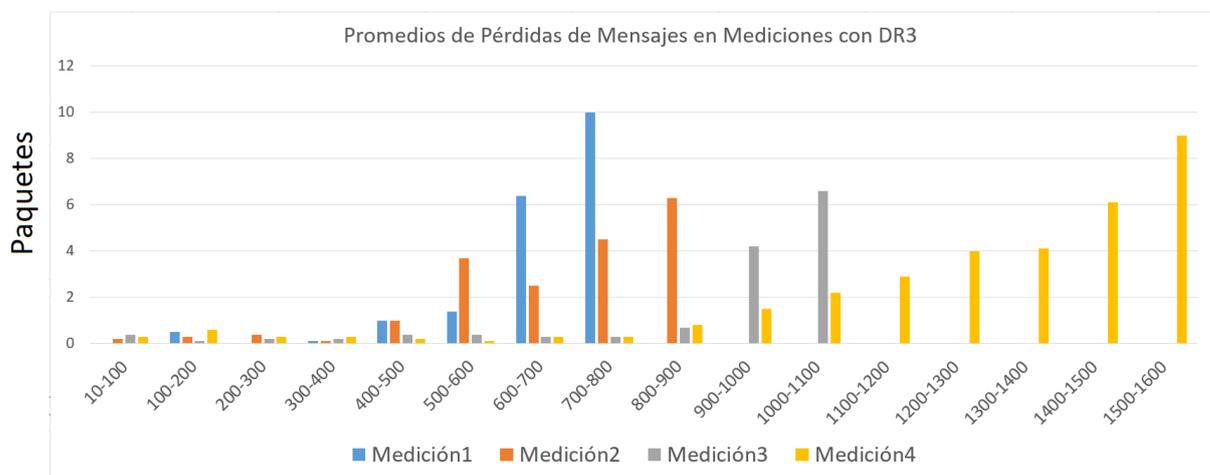


Figura 5.18: Promedios de Pérdidas de Paquetes con DR3 - Todos los Ambientes



5.7. Conclusiones

El ajuste de un modelo de pérdidas de trayectoria para LoRa con LoRaWAN en un ambiente específico, como es el forestal, permite caracterizar la propagación en el mismo.

Las pruebas previas que se realizaron con el kit de evaluación permitieron definir aspectos como, que la desviación estándar del número de paquetes no resulta significativa si el mismo se aumenta. En base a estas pruebas, se definió el índice de potencia a utilizar en las mediciones además de comprobar que no existe selectividad de canal en las frecuencias utilizadas por LoRaWAN.

Con respecto a la propagación en ambas orillas de un mismo río, se comprobó que la correlación que se presenta, aún en un ambiente difícil como el urbano, es alta. Los test de Kruskal-Wallis y Dunn realizados para comparar las distribuciones de los ambientes muestreados concluyen que no existe relación estadística entre los ambientes Rural y Semiurbano, reforzando la necesidad de caracterizar a los mismos de manera separada. No se pudo verificar la independencia entre los ambientes urbano y rural, esto se puede deber a una posible relación entre la alta densidad de vegetación y las edificaciones. Estos test estadísticos no son usualmente aplicados con este tipo de datos por lo que los resultados deben ser verificados y validados en un estudio futuro.

Utilizando los valores de RSSI y SNR, se calcularon las pérdidas de trayectoria y se ajustaron para las cuatro mediciones con las tasas de datos utilizadas. Si se comparan las mediciones con diferente DR, se observa que presentan valores muy similares de RSSI y SNR, con la diferencia de que DR0 presenta un mayor alcance. Se recomienda en lo posible utilizar DR3, ya que al tener menor tiempo aire, se tiene un menor consumo energético.

Los ajustes muestran diferentes valores de desviación estándar que pueden ser revisados en las tablas comparativas 5.5 y 5.6. Se observa una clara tendencia a disminuir en ambientes rurales o semiurbanos. Esto se debe a que la desviación estándar de las muestras son mayores en la medición 1 y 2 por la gran cantidad de obstáculos que existen en la urbe.

Por último, se concluye que la tasa de pérdida de paquetes es un buen parámetro para definir el desempeño de la transmisión en determinado punto, sin embargo se debe notar de las Figuras 5.17 y 5.18 que las pérdidas tienden a variar rápidamente.



Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones



En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo realizado así como la interpretación de los resultados, las limitaciones que se encontraron en el proceso, y finalmente, se proponen maneras de ampliar la investigación a futuro.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



6.1. Conclusiones

En este estudio se ha demostrado que el ambiente en donde se desarrolla la red **LoRaWAN**, así como la topografía, influyen en el alcance y en el porcentaje de paquetes recibidos correctamente.

Las mediciones previas realizadas, ayudaron a definir aspectos de la transmisión como el índice de potencia que da los mejores valores de **RSSI**, sin embargo, se debe tomar en cuenta que al haberse utilizado el mismo, la vida útil de los dispositivos puede verse reducida. Otro aspecto fue desviación estándar de **RSSI** que no varía de manera significativa al aumentar la cantidad de mensajes a enviar. Por último, se observó, con respecto a la frecuencia de transmisión, que el canal no es selectivo, por lo que **LoRaWAN**, puede ser utilizado en los ambientes seleccionados.

En cuanto a las mediciones de **RSSI**, se observa una clara tendencia a decaer con la distancia de manera logarítmica, lo que confirmaría la hipótesis planteada en el marco teórico. Los resultados obtenidos indican que el ajuste de un modelo de pérdidas de trayectoria tiene menor desviación estándar, en ambientes semiurbanos o rurales. Esto se traduce en una mayor fiabilidad del modelo en los mismos.

De los cálculos de correlación, realizados en un ambiente urbano, detallado en la Sección 4.4.1, se concluye que existe una fuerte relación entre las dos orillas de un río. De las pruebas estadísticas, se concluye que no se puede caracterizar con sólo una ecuación los diferentes ambientes. Se observa también que en la mayoría de las mediciones, el ruido no es un factor importante en el decaimiento de la señal, en los primeros 300 metros. Esto indicaría que si se desarrolla una red con este o menor alcance, el nivel de ruido es despreciable.

6.2. Recomendaciones

Existen diferentes variables que pueden ser mejoradas en estudios posteriores y que no fueron tomadas en cuenta en este por ser un primer estudio exploratorio de **LoRaWAN**. A continuación se presentan las principales:

- Una de las aspiraciones de esta tecnología es el gran alcance que provee, sin embargo, al haber utilizado en este estudio una metodología que se enfocaba hacia la caracterización de la señal a través de diferentes ambientes forestales, no se obtuvieron alcances mayores a 1600 metros.
- En algunos de los puntos que se tomaron, por problemas del terreno, no se pudo cumplir con la metodología propuesta, lo que causó que existan mejoramiento o disminución repentina de **RSSI**, visible en las gráficas del Anexo A.



- Al tomarse puntos en un intervalo relativamente pequeño de diez metros, se compensó de alguna manera el limitado número de mensajes enviados (diez), sin embargo, este se podría ampliar al doble para disminuir la desviación estándar y mejorar la fiabilidad de las muestras.
- La cantidad de mensajes recibidos correctamente no es una medida fiable de la cobertura ya que tiende a variar rápidamente con las condiciones del entorno.
- Los equipos presentan tasas de datos definidas por [LoRaWAN](#), sin embargo, no están implementados todos, por lo que en este estudio sólo se pudieron probar dos, que de manera básica, varían el [SF](#).

6.3. Trabajos Futuros

En esta sección, se explica cómo se podrían aplicar los resultados obtenidos y cómo estos pueden ser mejorados o ampliados con futuras investigaciones.

- Como se mencionó en las conclusiones, la topografía es un parámetro importante. Uno de los aspectos en que se puede trabajar a futuro es la variación de la altura de la antena receptora. Esto ayudaría a determinar con que altura se consiguen los mejores resultados.
- La potencia de transmisión es un factor clave al analizar la cobertura. En este estudio solo se utilizó la mayor, sin embargo se propone en un estudio futuro probar al menos tres potencias ya que el uso continuo de la máxima puede afectar a la vida útil de los dispositivos.
- Aunque ya existen trabajos en los que se varían los parámetros de [LoRa](#), estos aún no se realizan sobre ambientes forestales. Un futuro estudio podría no utilizar [LoRaWAN](#) y probar si se dan mejoras al hacerlo.
- La escalabilidad de una red [LoRaWAN](#), aunque requeriría cierta cantidad de nodos, es un parámetro que no ha sido medido bajo condiciones forestales y que presenta una alternativa de estudio interesante que podría ser enfocada desde un punto de vista de red.
- Otra de las ventajas de [LoRa](#) es el bajo consumo energético. Se puede realizar un estudio futuro de consumo utilizando los [DR](#) planteados por [LoRaWAN](#) para determinar las diferencias de consumo energético.
- Aunque los parámetros de red dependen de los equipos y las capacidades de la misma, se puede realizar un estudio de retardos y variaciones de retardos de mensajes desde que son enviados por el nodo hasta que son recibidos por el servidor.

A large, faint, stylized logo of the Universidad de Cuenca, consisting of a light blue circle with a red and white abstract shape inside.

Anexos

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Apéndice A

Configuración de Dispositivos

A.1. Instalación y configuración del servidor y Gateway LoRaWAN

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

En este punto se detalla la configuración sugerida por Microchip para un primer acercamiento al kit de desarrollo de [LoRaWAN](#). Para este procedimiento, se utilizó la Guía de Usuario de la Tecnología [LoRa](#) [9]. Un sistema [LoRa](#) puede ser implementado de muchas maneras, sin embargo, el kit de Evaluación utilizado puede ser configurado como se observa en la [Figura A.1](#).

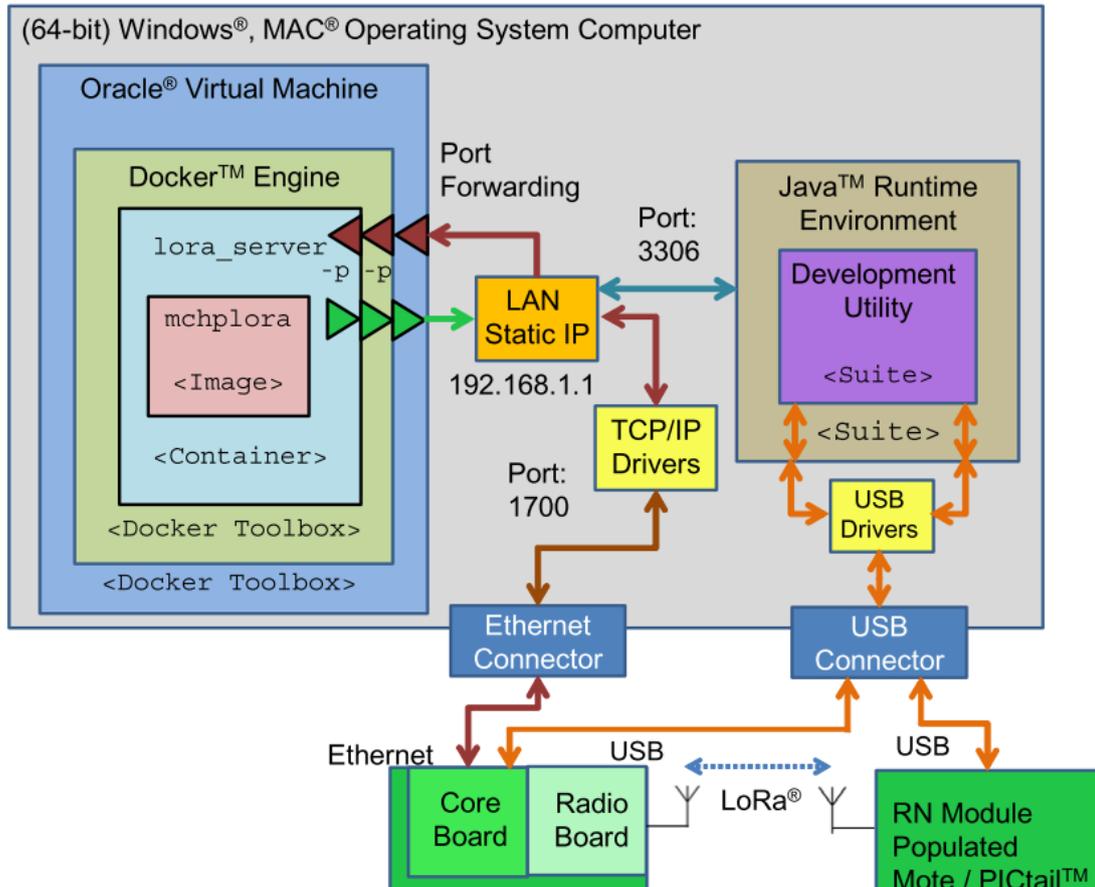


Figura A.1: Esquema de configuración del kit LoRa [9]

A.1.1. Instalación

La suite de desarrollo de tecnología LoRa tiene todos los componentes necesarios para configurar el sistema LoRa. Incluye la utilidad de desarrollo, la cual ha sido desarrollada para ayudar al usuario a evaluar, desarrollar e implementar LoRa con el kit de evaluación.

El objetivo de esta suite es la de proveer un único paquete que haga que la introducción del usuario a una red LoRaWAN fácil.

El contenido de la suite de desarrollo es el siguiente:

- La utilidad de Desarrollo

- Servidor Docker y la base de datos de evaluación
- Java Runtime Environment

Para iniciar la instalación, los paquetes necesarios deben ser descargados de la siguiente página web:

<http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=dv164140-2>

Una vez descargada la suite de desarrollo de **LoRa**, se procede a instalar. Por defecto el directorio de instalación es **Microchip/LoRaSuite**. Figura A.2.



Figura A.2: Instalación de la suite de desarrollo de **LoRa**

Se deben elegir todos los componentes y de esta manera se completa la instalación. Uno de los componentes elegidos es Java Runtime, este se instalará durante la instalación de los demás componentes.

A.1.2. Preparación del Sistema

Para preparar al sistema se deben hacer los siguientes pasos:

Abrir VirtualBox

VirtualBox corre Docker Engine, en el cual se encuentra almacenado el servidor [LoRaWAN](#) y la base de datos. En Windows y MAC OS, Docker corre de manera virtual usando VirtualBox y de manera nativa en sistemas Linux de 64 bits. Para Windows y MAC también es necesario configurar el reenvío de puertos que se realizará en la siguiente sección. Figura [A.3](#).

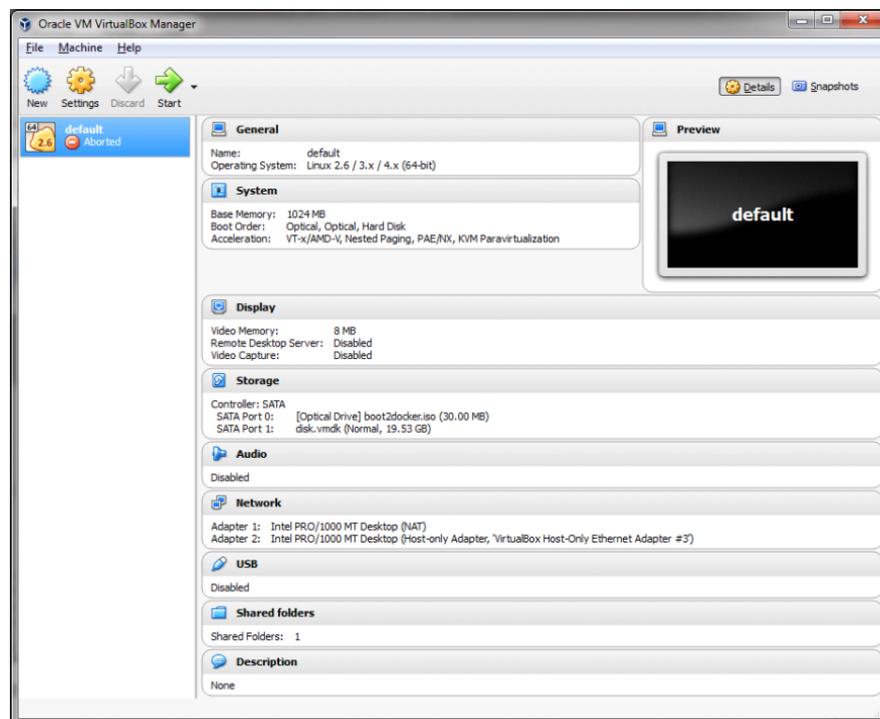


Figura A.3: Virtualización de Docker en Windows

Agregar Reglas de Reenvío de Puertos en VirtualBox

En VirtualBox se busca la opción de configuración, luego red, y clic en avanzado. En Reenvío de Puertos, se agregan las reglas de la Figura [A.4](#).

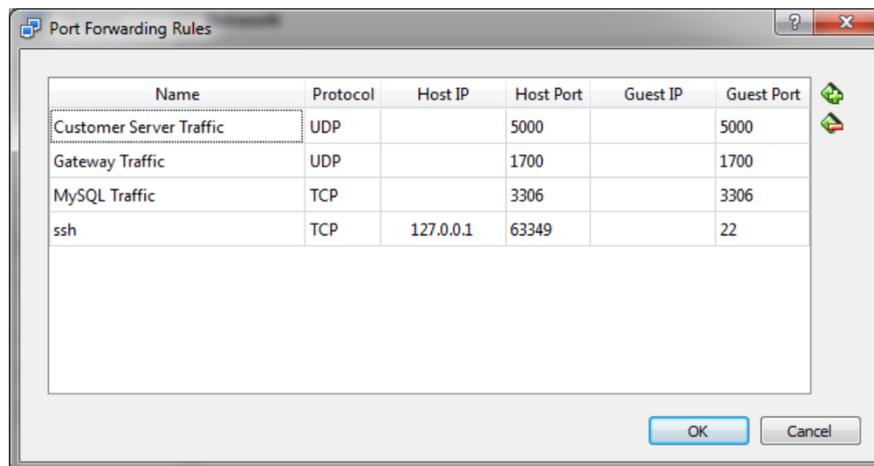


Figura A.4: Reglas de Reenvío de Puertos

Asignación de IP estática

Este paso configura al puerto Ethernet del computador con una IP fija de tal manera que coincida con la dirección del servidor que tiene configurada el *Gateway*.

La configuración se la realiza en el adaptador Ethernet y en IPv4. Quedaría como en la Figura A.5.

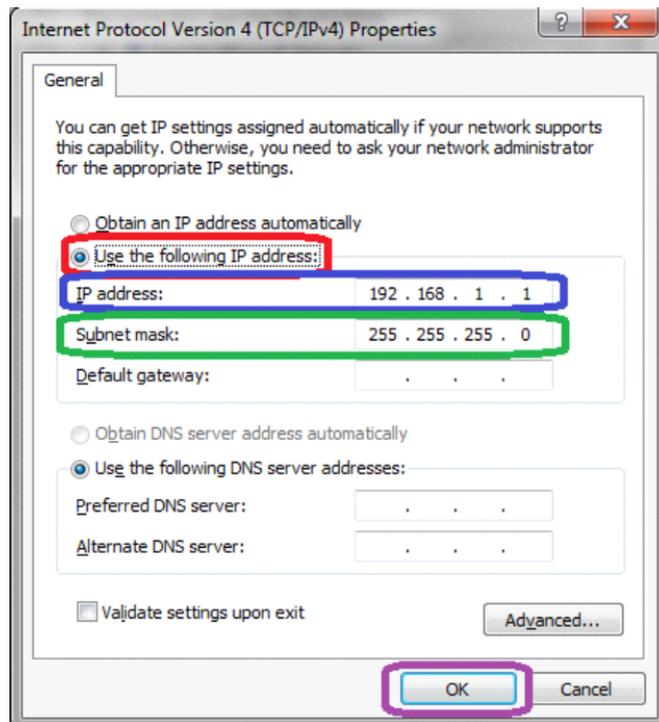


Figura A.5: Configuración de IP estática en adaptador de red Ethernet

A.1.3. Configuración del Servidor

Como se dijo anteriormente, el servidor se encuentra virtualizado y es manejado a través de VirtualBox, sin embargo, primero es necesario instalarlo. Una vez instalado, para correr el servidor, no es necesario abrir VirtualBox. Solo abrir el terminal de Docker y correr el Servidor [LoRaWAN](#).

Abrir el Terminal Docker

El Terminal Docker sirve para enviar comandos a Docker que a su vez corre el Servidor y Base de datos de evaluación.

Para correrlo, se da doble click sobre su icono que se encuentra en la carpeta Docker. Se abrirá una ventana como se observa en la Figura [A.6](#).

Una vez que el contenedor ha sido creado, el servidor puede iniciar con este comando y continuará activo aún si VirtualBox o el Terminal Docker están cerrados.

A.1.4. Configuración de Red

Conectar los dispositivos LoRa

Con el contenedor de LoRa creado e iniciado, conectar las tarjetas de evaluación de LoRa a los puertos USB del computador. A continuación, abrir el software de Utilidad de Desarrollo. La interfaz se presenta en la Figura A.7.

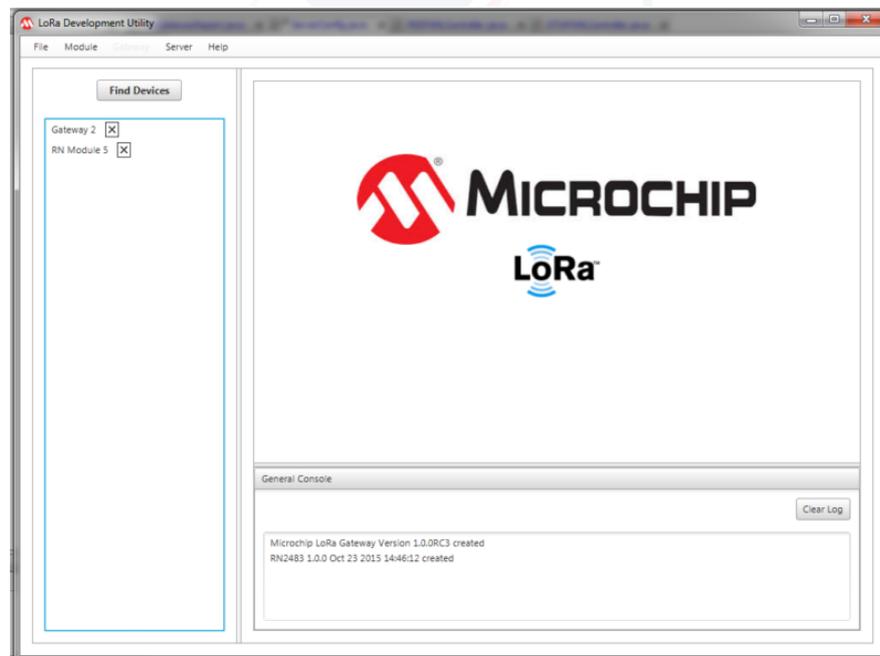


Figura A.7: Software de Utilidades de LoRa Microchip

Configuración del Gateway

El Gateway ya viene configurado de fábrica sin embargo se deben confirmar los parámetros del mismo. En la Figura A.8, se muestra como deben estar configurados.

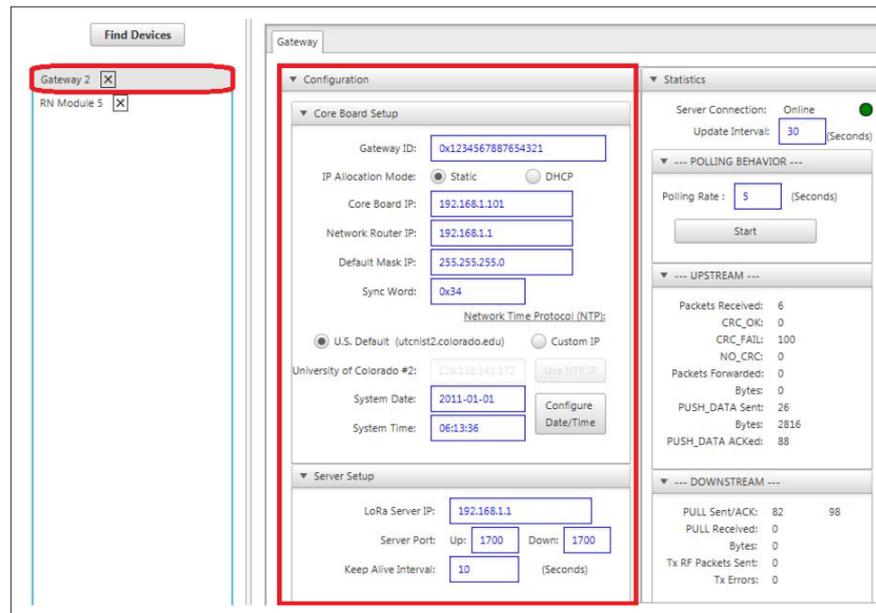


Figura A.8: Software de Utilidades de LoRa Microchip - Gateway

En este punto, si se siguieron los pasos anteriores, al igual que en la imagen anterior, se debería observar un indicador verde y el enunciado online en la esquina de configuración del Gateway y en el panel LCD del mismo.

Hay veces en que el Gateway tarda unos segundos en pasar a online. Hay veces en que es necesario desconectar y reconectar el Gateway al puerto USB del computador

Configuración para Personalización Auto-Creada

Con esta configuración, se puede hacer uso inmediato del servidor de evaluación. Esta configuración hace uso de ABP utilizando direcciones preconfiguradas. Para hacer uso de esto se debe acceder a la pestaña LoRaWAN en el módulo RN y dar click en la opción de Configuración para Personalización Auto-Creada, como se observa en la Figura A.9.

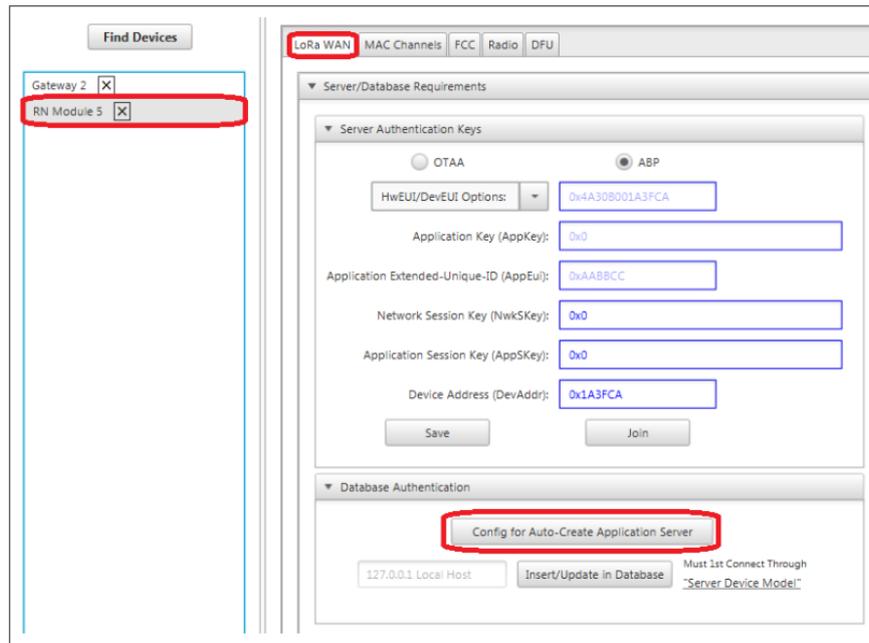


Figura A.9: Configuración para Personalización Auto-Creada

Agregar el Servidor a la lista de Dispositivos y conexión con MySQL

En la pestaña Server, se elige Add. De esta manera se agrega un servidor a la interfaz. Este servidor será el que recibirá los paquetes enviados por el módulo RN o mota. Antes de poder hacerlo, debe conectarse a la base de datos. Para la conexión con MySQL, se abre el servidor y se da click en Connect to IP. Figura A.10.

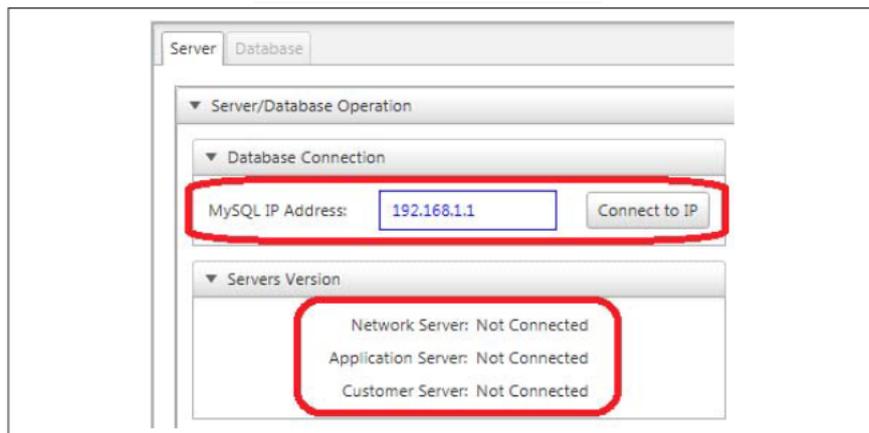


Figura A.10: Conexión con el servidor MySQL

A.1.5. Configuración Adicional para 915 MHz

Configurar el Módulo RN para 8 Canales

Dado que el *Gateway* del kit solo admite ocho canales, se debe configurar al módulo RN para que transmita en los mismos.

Para hacerlo, se da click en la pestaña de Canales MAC, se deshabilitan los canales y se da click en habilitar 8 canales. Esto asegura la compatibilidad entre los dos dispositivos ya que el módulo RN admite por defecto hasta 63 canales. Figura A.11.

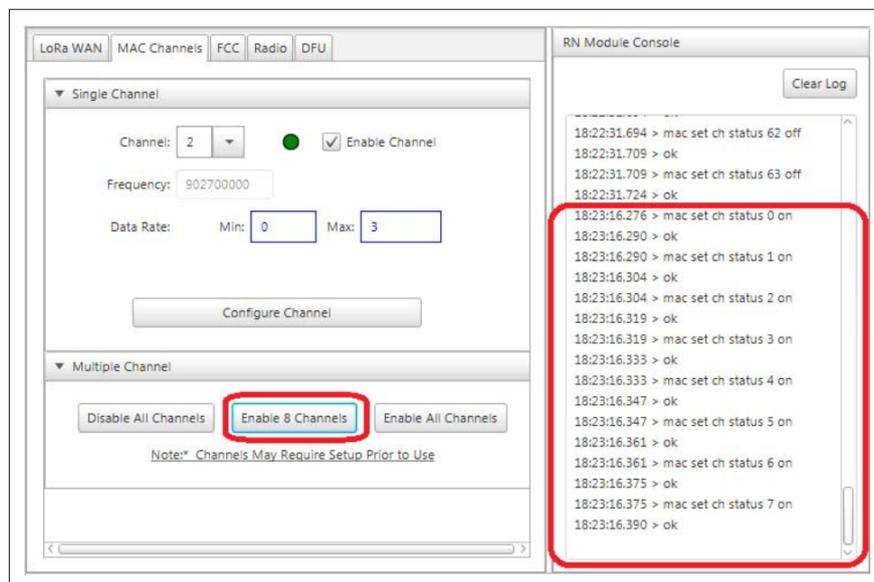


Figura A.11: Habilidad de ocho canales en el módulo RN

Enviar un Mensaje de prueba *Uplink* no confirmado

El objetivo de este punto es visualizar un mensaje transmitido por el módulo RN en el *Gateway*.

En la pestaña [LoRaWAN](#), existe la ventana de comunicación. Se pone un payload en hexadecimal, un puerto del 1 al 223 y se da click en transmitir, como se observa en la Figura A.12.



Figura A.12: Envío de un mensaje Uplink desde el módulo RN

Cambiar la región del Gateway

El *Gateway* asume por defecto que trabaja con 868 MHz (Región 4), por lo que es necesario configurarlo para 915 MHz (Región 0).

En la pestaña Database del Servidor, se selecciona la opción de unidades *Gateway* y se da click en Cambiar Región hasta que quede en Región 0. Figura A.13.

Gateway ID	Time	Latitude	Longitude	Altitude	Up Pckts Rx	Good Up Pckts Rx	Up Pckts Fw	Up Pckts Ack Ratio	Down Pckts Rx	Pckts Tx	Last Up Pckts ID	Region
0x1234567890123456789	2011-01-01 07:46:33.0			70	24	24	1	0	0	0	0	4
0x1234567890123456789	2011-01-01 06:18:05.0			68	0	0	0	0.720588	0	0	0	0

Figura A.13: Cambio de Región del Gateway

De esta manera, cuando el *Gateway* reciba un paquete válido, el mismo se verá en la pestaña de Base de datos.

A.2. Configuración del Nodo

Como se dijo en la descripción de equipos, el Nodo o Mota, permite su control mediante comandos ASCII. Estos comandos son enviados desde el Raspberry Pi y fueron programados en Python.

Para automatizar y acelerar el proceso de envío de paquetes, se implementó un botón físico que permite el envío de los 10 paquetes con DR0 y enseguida los otros 10 con DR3. Durante el proceso de envío, se mantiene encendido un diodo LED, que sirve como indicador de que el transmisor debe mantenerse lo más estable posible.

A continuación, se describen los programas implementados en el Raspberry Pi:



Programa de Inicio

Se activa al encendido del Raspberry Pi y permite el sensado continuo del pulsante de envío. A continuación el código:

```
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(18, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)

while True:
    input_state = GPIO.input(18)
    if input_state == False:
        os.system('/home/pi/lm.py')
    time.sleep(0.5)
        os.system('/home/pi/lm2.py')
    time.sleep(0.5)
```

Una vez que se detecta que se pulsó el botón de envío, se corren *lm.py* y *lm2.py* que como se explicará a continuación envían los paquetes con DR0 y DR3 respectivamente.

Envío de Mensajes

lm.py y *lm2.py* configuran el puerto USB para el envío de los comandos, el pin para el encendido del diodo LED, configura las diferentes claves de [LoRaWAN](#), activa mediante [ABP](#), configura el [DR](#) y envía paquetes numerados del uno al diez.

A continuación el código utilizado:

```
LedPin = 11    # pin11

BAUD_RATE = 57600

class LoRaSerial(object):
    def __init__(self, _serial_port):
        '''
            configures serial connection
        '''
        self._ser = serial.Serial(_serial_port, BAUD_RATE)

        # timeout block read
        self._ser.timeout = 8
```



```
# disable software flow control
self._ser.xonxoff = False

# disable hardware (RTS/CTS) flow control
self._ser.rtscts = False

# disable hardware (DSR/DTR) flow control
self._ser.dsrdrv = False

# timeout for write
self._ser.writeTimeout = 0

#print "Resetting LoRa Tranceiver..."
self.write_command('sys reset',False)
#print "Configuring Tranceiver..."
#Mac Configuration
self.write_command('mac set devaddr 001AD314')
self.write_command('mac set appskey 3C8F262739BFE3B7BC0826991AD0504D')
self.write_command('mac set nwkskey 2B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C')
self.write_command('mac set adr off')
self.write_command('mac set sync 34')
self.write_command('mac set pwridx 5')
self.write_command('mac set dr 0')
self.write_command('mac save')

# Configure sub-bands
for ch in range(0,63):
    self.write_command('mac set ch status %d %s'%(ch,
        'on' if ch in range(0,7) else 'off'))

# join the network
#print "Attempting to Join Network..."
self.write_command('mac join abp')
response = self.read()
if response == 'accepted':
    print "LoRa Tranceiver Configured. Joined (ABP)"
else:
    print "ERROR: mac join returned unexpected response: ", response
```



```
def read(self):
    '''
        reads serial input
    '''
    return self._ser.readline().strip()

def write(self, str):
    '''
        writes out string to serial connection, returns response
    '''
    self._ser.write(str + '\r\n')
    return self.read()

def write_command(self, config_str, check_resp=True):
    '''
        writes out a command
    '''
    #print "Command: '%s'"%config_str
    response = self.write(config_str)
    if check_resp and response != 'ok':
        print "Command: '%s'"%config_str
        print "Response: '%s'"%response

def send_message(self, data):
    '''
        sends a message to gateway
    '''
    # print "Sending message... "
    # send packet (returns 'ok' immediately)
    self.write_command('mac tx uncnf 5 %s'%data)
    # wait for success message
    response = self.read()
    if response == 'mac_tx_ok':
        print "Message sent successfully!"
    else:
        print "ERROR: mac tx command returned unexpected response: ", response
```



```
def receive_message(self):
    '''
        waits for a message
    '''
    pass

if __name__ == "__main__":

    port = '/dev/ttyACM0'
    packets = 10
    #Configure indicator LED
    GPIO.setmode(GPIO.BOARD)      # Numbers GPIOs by physical location
    GPIO.setup(LedPin, GPIO.OUT)  # Set LedPin's mode is output
    #Configure Module
    loramote = LoRaSerial(port)
    #Send Data
    GPIO.output(LedPin, GPIO.HIGH)
    for i in range(1,packets+1):
        loramote.send_message(i)
        time.sleep(1)
    GPIO.output(LedPin, GPIO.LOW)
    GPIO.cleanup()
```

lm2.py es exactamente el mismo programa con la diferencia que en lugar de DR0, se usa DR3.



Apéndice B

Descriptado y Almacenamiento



Este apéndice, se presentan las herramientas utilizadas para convertir los archivos .txt capturados con Wireshark en archivos .csv decodificados y con estadísticas de transmisión.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



B.1. Desencriptación de Paquetes - LoRaWAN

El siguiente código, está basado en el decodificador de paquetes [LoRaWAN \[46\]](#). Está escrito en Javascript y provee una manera rápida de desencriptar la carga útil de los paquetes, usando Node.js y npm.

Para la correcta desencriptación, se requiere de la clave de sesión de aplicación y de red que pueden ser encontradas en el la interfaz Microchip del *gateway*.

```
#!/usr/bin/env node

"use strict";

/**
 * LoRa Decrypt Code
 * Ucuencia
 */
var lora_packet = require('../lib/index.js');
var cmdLineArgs = process.argv;

//Start
var inputData = new Buffer(cmdLineArgs[2], 'base64');
var packet = lora_packet.fromWire(inputData);
var AppSKey_hex = "3c8f262739bfe3b7bc0826991ad0504d";
var NwkSkey_hex = "2b7e151628aed2a6abf7158809cf4f3c";
var decrypted = lora_packet.decrypt(packet,
new Buffer(AppSKey_hex, 'hex'), new Buffer(NwkSkey_hex, 'hex'));
//Output
console.log (decrypted)
```

Para usarlo, desde la consola se corre directamente el nombre del archivo que se encuentra ubicado en el directorio: `C:\Users\pavil\AppData\Roaming\npm\node_modules\lora-packet\bin`, seguido de la carga útil en formato HEX. Por ejemplo:

```
lora-decrypt QBTTGgAAAwAFoM4Z08E=
```



B.2. Desencriptado y Almacenaje

El código que se presenta a continuación, fue desarrollado en python y su objetivo es el de ordenar, desencriptar, almacenar y generar un archivo total de cada medición. Abre los archivos .txt capturados en las mediciones, los ordena, los desencripta utilizando el código del Apéndice B.1, separa DR0 y DR3, finalmente almacena cada transmisión en archivos independientes .csv.

Al terminar presenta el **PER**, las medias de **RSSI**, **SNR**, además de desviaciones estándar de cada transmisión en un archivo .csv.

```
#Este Script abre los archivos .txt que contienen las
#capturas y crea archivos .csv con los paquetes de DR0 y DR3
#Al final, genera un archivo Total
#Creado por: Pablo E. Avila C
import csv
import subprocess
import statistics
#Directorios de las mediciones y de los resultados
path = 'D:\\Users\\pavil\\MEGA\\LoRaTesis\\Data\\Capturas\\Medicion4'
pathr = 'D:\\Users\\pavil\\MEGA\\LoRaTesis\\Data\\Capturas\\Medicion4\\Conversiones'
npackets = 10
ncaptures = 152
RSSIAVEA = [0]*ncaptures
RSSIAVEB = [0]*ncaptures
SNRAVEA = [0]*ncaptures
SNRAVEB = [0]*ncaptures
DIST = [0]*ncaptures
PERSA = [0]*ncaptures
PERSB = [0]*ncaptures
STDDEVRSSIA = [0]*ncaptures
STDDEVRSSIB = [0]*ncaptures
STDDEVS NRA = [0]*ncaptures
STDDEVS NR B = [0]*ncaptures

for file in range(1,ncaptures+1):
    #Name of file
    nfile= str(file)
    data = open(path+'\\'+nfile+'.txt', 'r').read()
```



```
dataDic = {}
dataDicA = {}
dataDicB = {}
#Index of values
tmstp=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('tmst')]
chanp=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('chan')]
rfchp=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('rfch')]
freqp=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('freq')]
modup=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('modu')]
datrp=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('datr')]
codrp=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('codr')]
lsnrp=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('lsnr')]
rssip=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('rssi')]
sizep=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('size')]
datap=[pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].startswith('data')]
#Packet Number
n = int(len(tmstp)/2)
#Extract data
dataDic[0] = 'TMST', 'CHAN', 'RFCH', 'FREQ', 'MODU', 'DATR', 'CODR', 'LSNR', 'RSSI', 'SIZE', 'DATA'
dataDicA[0] = 'TMST', 'CHAN', 'RFCH', 'FREQ', 'MODU', 'DATR', 'CODR', 'LSNR', 'RSSI', 'SIZE', 'DATA'
dataDicB[0] = 'TMST', 'CHAN', 'RFCH', 'FREQ', 'MODU', 'DATR', 'CODR', 'LSNR', 'RSSI', 'SIZE', 'DATA'
for index in range(0, n):
    DATA = data[datap[index]+7:datap[index]+36]
    DATAB = DATA[0:DATA.index('')]
    DATAC = subprocess.check_output('lora-decrypt ' + DATAB, shell=True).decode('utf-8')
    DATAD = DATAC[8:DATAC.index('>')].replace(" ", "")
    dataDic[index+1] = int(data[tmstp[index]+6:chanp[index]-2]),
    int(data[chanp[index]+6:rfchp[index]-2]),
    ,int(data[rfchp[index]+6:freqp[index]-2]),
    float(data[freqp[index]+6:freqp[index]+16]),
    str(data[modup[index]+7:datrp[index]-3]),
    str(data[datrp[index]+7:codrp[index]-3]),
    str(data[codrp[index]+7:lsnrp[index]-3]),
    float(data[lsnrp[index]+6:rssip[index]-2]),
    int(data[rssip[index]+6:sizep[index]-2]),
    int(data[sizep[index]+6:datap[index]-2]),
    int(DATAD)

#Separo DR0 and DR3
```



```
i=1
j=1
for index in range(0,n):
    line = dataDic[index+1]
    if line[5] == "SF10BW125":
        dataDicA[i]=line
        i+=1
    else:
        dataDicB[j]=line
        j+=1
#No de Datos Recibidos
npacketsrecA = len(dataDicA)-1
npacketsrecB = len(dataDicB)-1

#Extraer RSSI en vectores
RSSIA = [0]*npacketsrecA
RSSIB = [0]*npacketsrecB

for index in range(1,npacketsrecA+1):
    line = dataDicA[index]
    RSSIA[index-1]= line[8]

for index in range(1,npacketsrecB+1):
    line = dataDicB[index]
    RSSIB[index-1]= line[8]
#Extraer SNR en vectores
SNRA = [0]*npacketsrecA
SNRB = [0]*npacketsrecB

for index in range(1,npacketsrecA+1):
    line = dataDicA[index]
    SNRA[index-1]= line[7]

for index in range(1,npacketsrecB+1):
    line = dataDicB[index]
    SNRB[index-1]= line[7]

DIST[file - 1] = file * 10
```



```
#Vector de distancias
```

```
if len(dataDicA) > 1: #Para evitar archivos sin paquetes.

    RSSIAVEA[file-1] = statistics.mean(RSSIA)
    SNRAVEA[file-1] = statistics.mean(SNRA)
    PERSA[file-1] = (npackets-npacketsrecA)/(npackets)
    if len(dataDicA) > 2: #STANDARDDEV necesita al menos dos valores
        STDDEVRSSIA[file-1] = statistics.stdev(RSSIA)
        STDDEVSNRA[file-1] = statistics.stdev(SNRA)
    # Guardo datos en archivo .csv
    w = csv.writer(open(pathr+'\\'+nfile+"A"+" .csv", "w", newline=''))
    for key, val in dataDicA.items():
        w.writerow(val)

if len(dataDicB) > 1: #Para evitar archivos sin paquetes.
    RSSIAVEB[file-1] = statistics.mean(RSSIB)
    SNRAVEB[file-1] = statistics.mean(SNRB)
    PERSB[file-1] = (npackets-npacketsrecB)/(npackets)
    if len(dataDicB) > 2: #STANDARDDEV needs at least two values
        STDDEVRSSIB[file-1] = statistics.stdev(RSSIB)
        STDDEVSNRB[file-1] = statistics.stdev(SNRB)
    # Guardo datos en el archivo .csv
    w = csv.writer(open(pathr+'\\'+nfile+"B"+" .csv", "w", newline=''))
    for key, val in dataDicB.items():
        w.writerow(val)

headers = ['Distancia(m)', 'RSSI_DRO(dBm)', 'SNR_DRO', 'STDEVRSSI_DRO',
           'STDEVSNR_DRO', 'PER_DRO', 'RSSI_DR3(dBm)', 'SNR_DR3', 'STDEVRSSI_DR3',
           'STDEVSNR_DR3', 'PER_DR3']
rows = zip(DIST, RSSIAVEA, SNRAVEA, STDDEVRSSIA, STDDEVSNRA, PERSA, RSSIAVEB,
           SNRAVEB, STDDEVRSSIB, STDDEVSNRB, PERSB)
w = csv.writer(open(pathr+'\\'+ 'RESULTADOS'+ ' .csv', "w", newline=''))
w.writerow(headers)
for row in rows:
    w.writerow(row)
print('Decodificacion Terminada!')
```



En los documentos adjuntos del archivo pdf, se encuentran los códigos presentados en esta Sección.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Apéndice C

Mediciones de RSSI y SNR



Este apéndice se encuentra dividido en dos partes. En la primera parte [C.1](#), se presentan las gráficas resultantes del [RSSI](#) pertenecientes a las cuatro mediciones realizadas. Por otro lado, en la sección [C.2](#), se presentan los resultados de [SNR](#) de las mediciones.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

C.1. Mediciones de RSSI

Se realizaron cuatro mediciones en las que se transmitieron 10 paquetes por cada tasa de datos. En cada medición se realizaron transmisiones cada 10 metros. La Medición 1 y 2 corresponden al ambiente urbano, la tercera al semiurbano y la cuarta al rural. A continuación se presentan las medias de cada transmisión con sus intervalos de confianza calculados utilizando la desviación estándar y la distribución t-student.

RSSI con DR0 en Medición 1

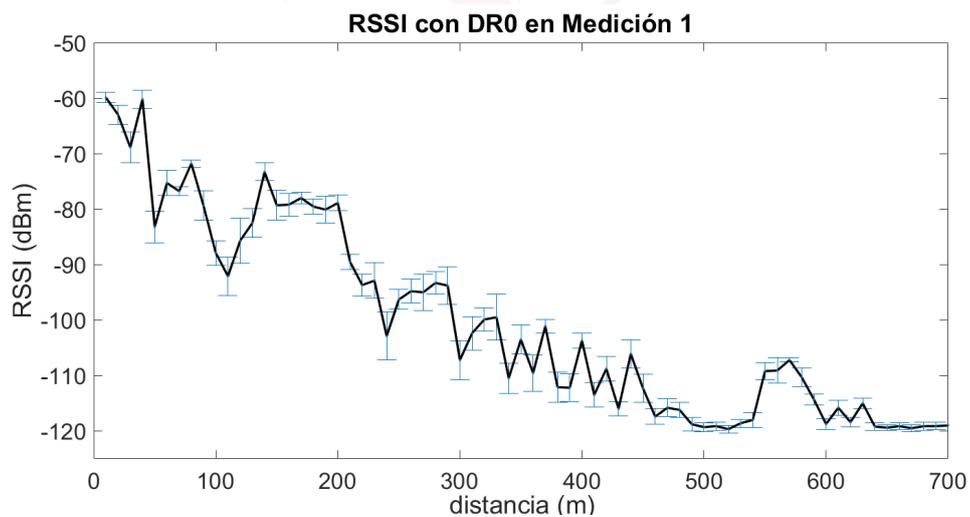


Figura C.1: Medición de RSSI del Ambiente 1 con DR0 - Río Tomebamba

RSSI con DR3 en Medición 1

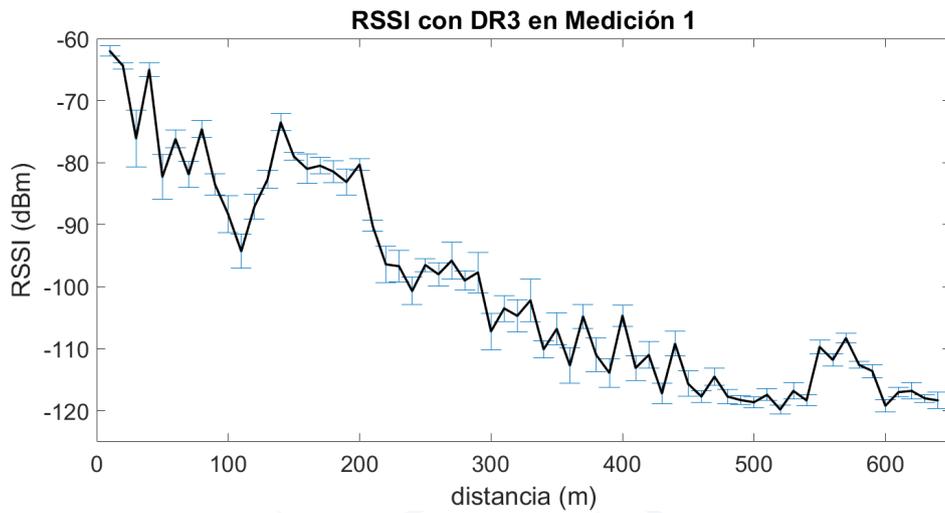


Figura C.2: Medición de RSSI del Ambiente 1 con DR3 - Río Tomebamba

RSSI con DR0 en Medición 2

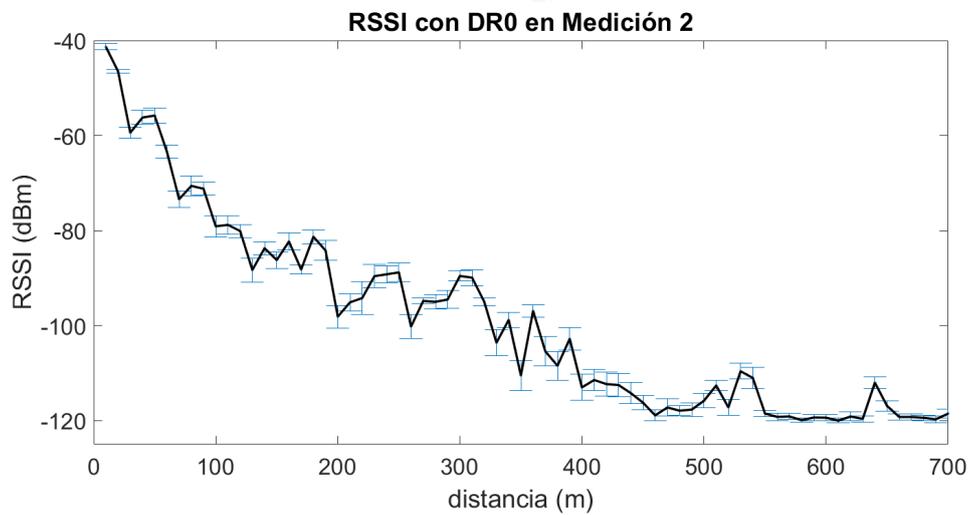


Figura C.3: Medición de RSSI del Ambiente 1, orilla 2 con DR0 - Río Tomebamba

RSSI con DR3 en Medición 2

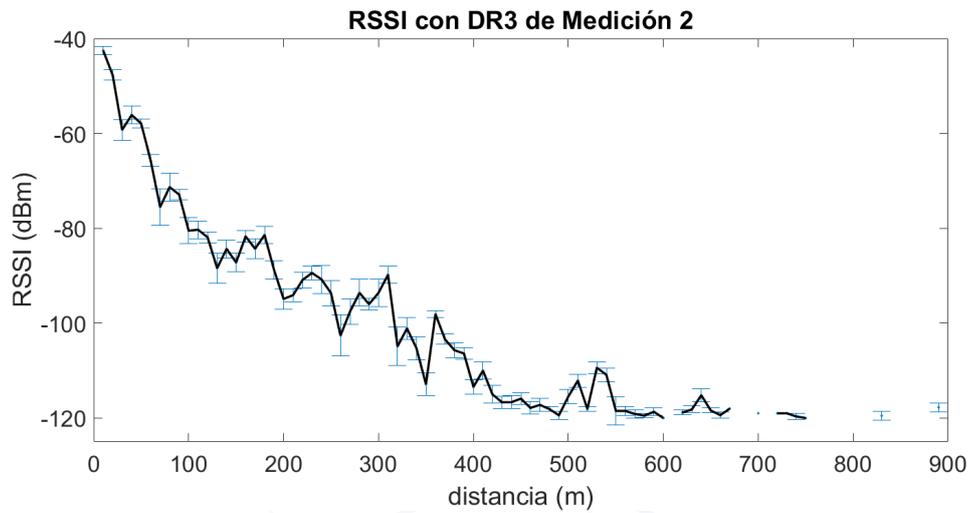


Figura C.4: Medición de RSSI del Ambiente 1, orilla 2 con DR3 - Río Tomebamba

RSSI con DR0 en Medición 3

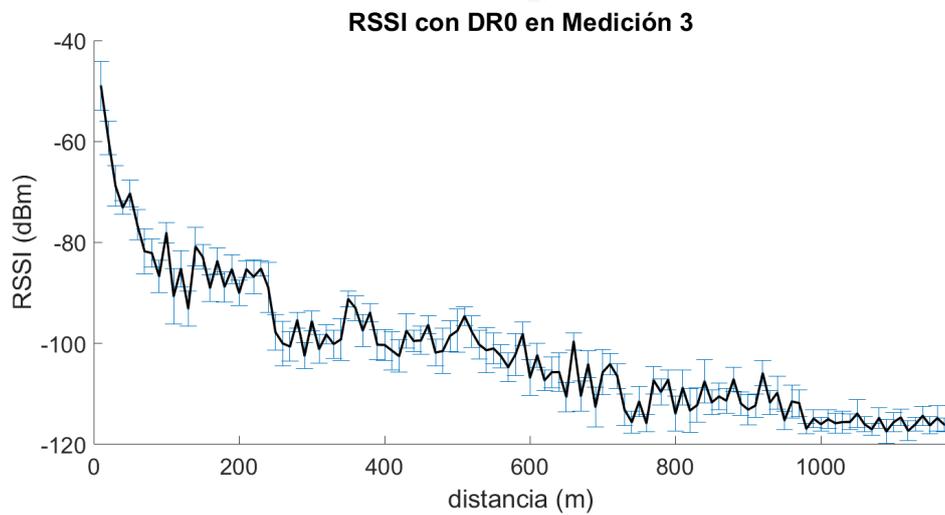


Figura C.5: Medición de RSSI del Ambiente 2 con DR0 - Río Machángara

RSSI con DR3 en Medición 3

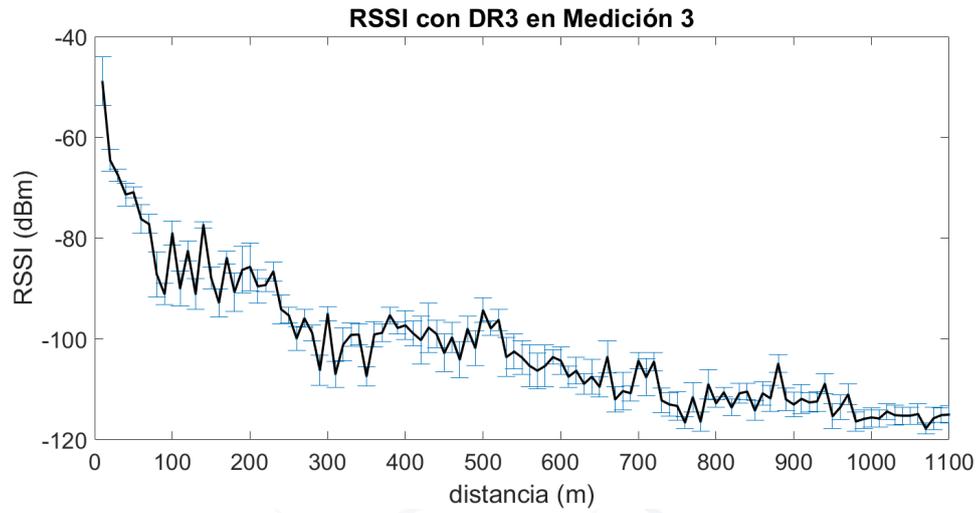


Figura C.6: Medición de RSSI del Ambiente 2 con DR3 - Río Machángara

RSSI con DR0 en Medición 4

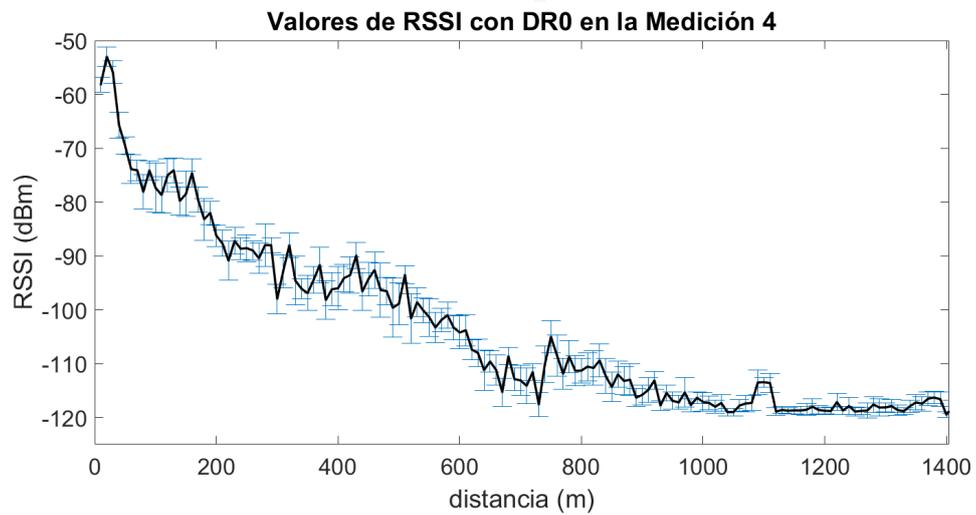


Figura C.7: Medición de RSSI del Ambiente 3 con DR0 - Río Yanuncay

RSSI con DR3 en Medición 4

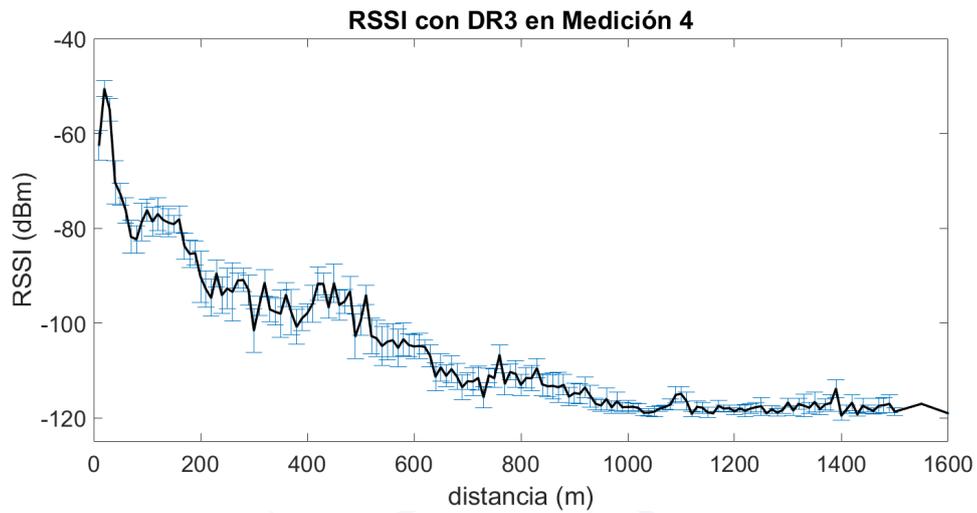


Figura C.8: Medición de RSSI del Ambiente 3 con DR3 - Río Yanuncay

C.2. Mediciones de SNR

En cada transmisión, a más de recibir el **RSSI**, también se recibió el **SNR** que fue almacenado y utilizado para el cálculo de las pérdidas de trayectoria y realizar las gráficas que se muestran a continuación:

SNR con DR0 en Medición 1

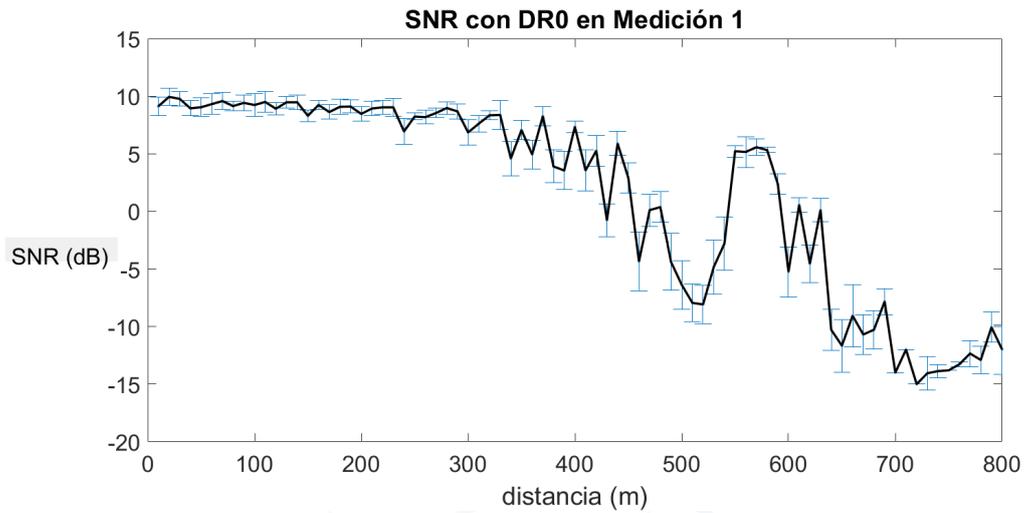


Figura C.9: Medición de SNR del Ambiente 1 con DR0 - Río Tomebamba

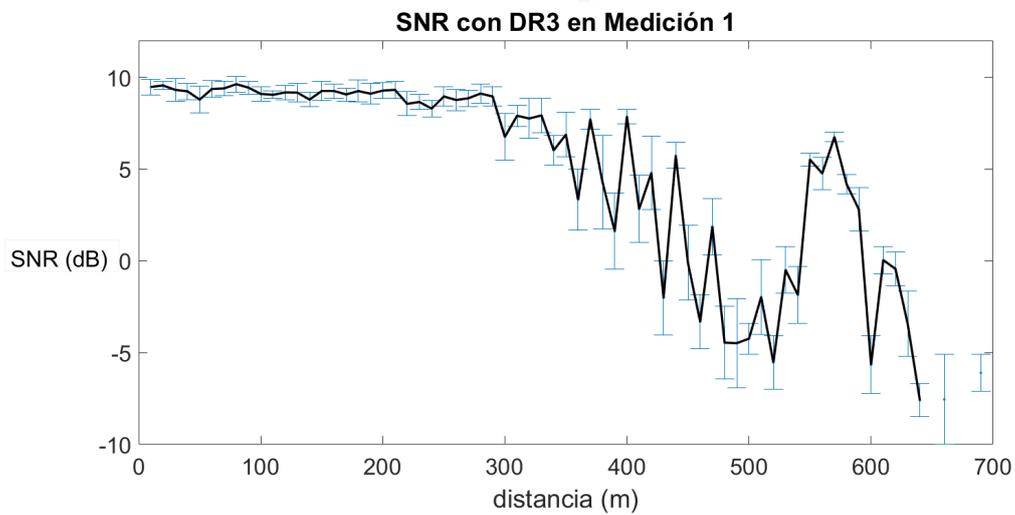
SNR con DR3 en Medición 1

Figura C.10: Medición de SNR del Ambiente 1 con DR3 - Río Tomebamba

SNR con DR0 en Medición 2

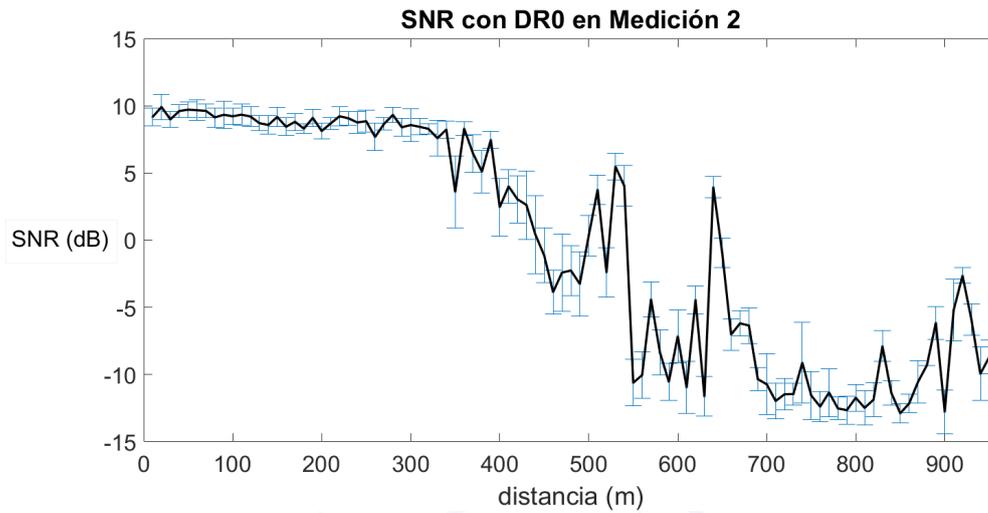


Figura C.11: Medición de SNR del Ambiente 1, orilla 2 con DR0 - Río Tomebamba

SNR con DR3 en Medición 2

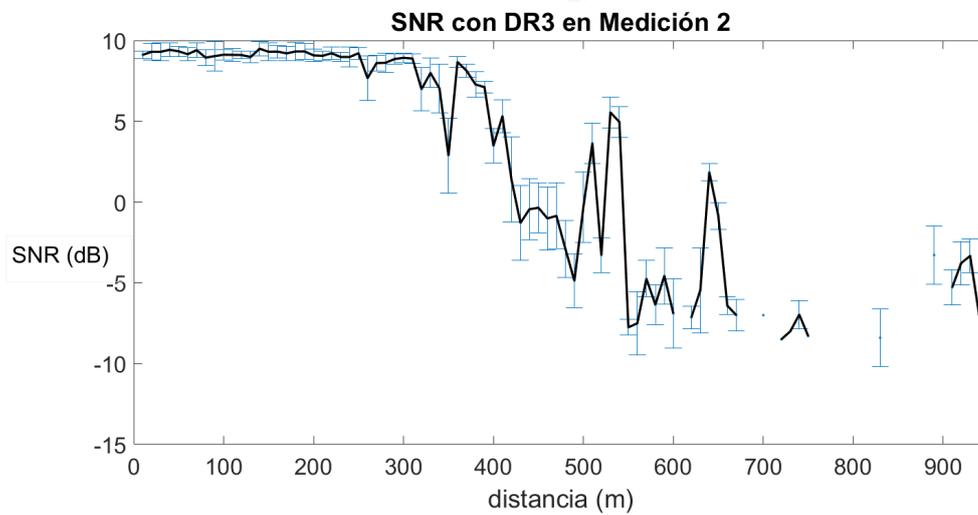


Figura C.12: Medición de SNR del Ambiente 1, orilla 2 con DR3 - Río Tomebamba

SNR con DR0 en Medición 3

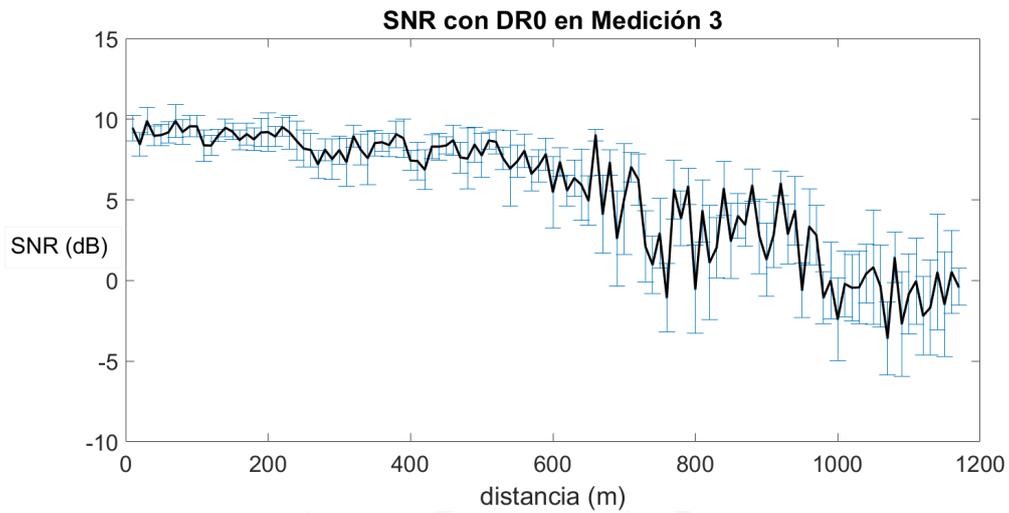


Figura C.13: Medición de SNR del Ambiente 2 con DR0 - Río Machángara

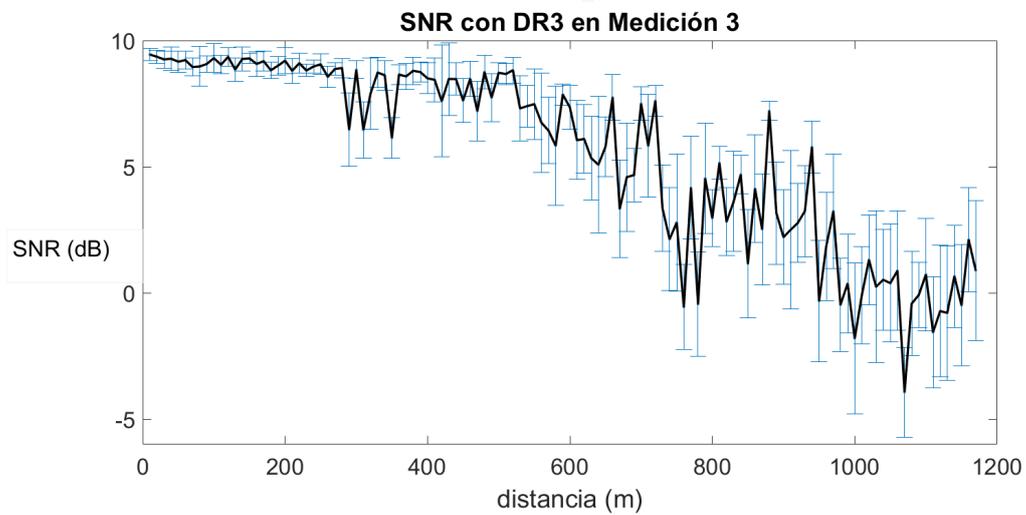
SNR con DR3 en Medición 3

Figura C.14: Medición de SNR del Ambiente 2 con DR3 - Río Machángara

SNR con DR0 en Medición 4

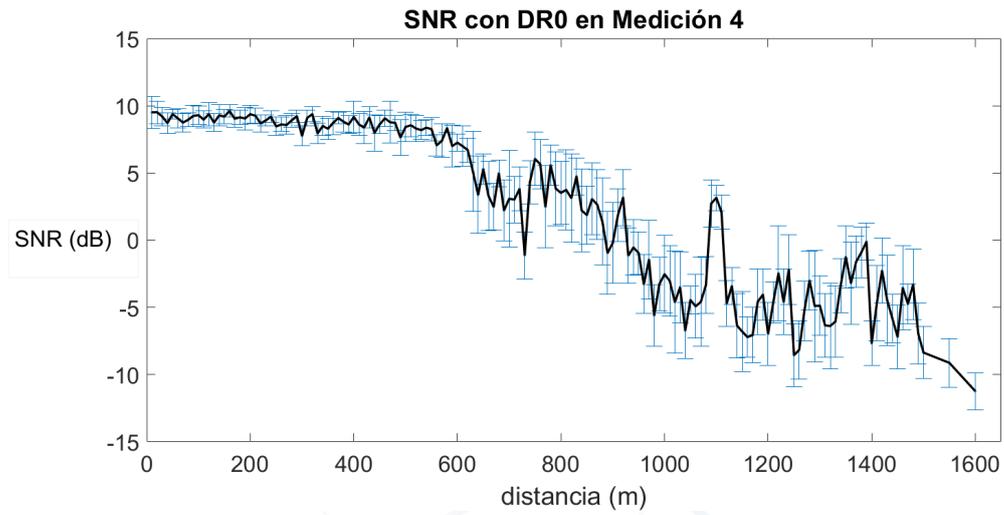


Figura C.15: Medición de SNR del Ambiente 3 con DR0 - Río Yanuncay

SNR con DR3 en Medición 4

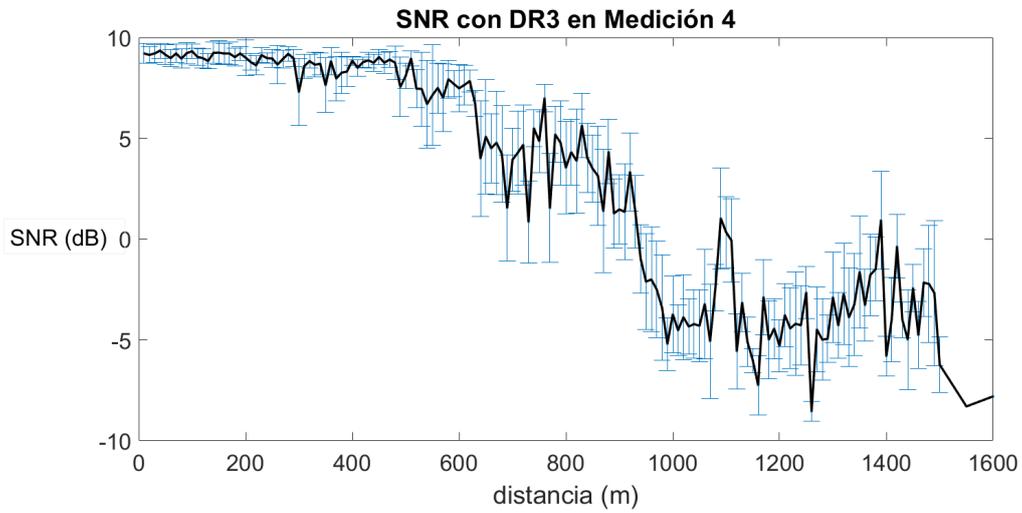


Figura C.16: Medición de SNR del Ambiente 3 con DR3 - Río Yanuncay



Bibliografía

- [1] Semtech, “LoRa Modulation Basics,” num. May, pp. 1–26, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>
- [2] M. Knight, “Decoding LoRa : Realizing a Modern LPWAN with SDR,” *Proceedings of the 6th GNU Radio Conference*, 2016.
- [3] L. Vangelista, A. Zanella, y M. Zorzi, “Long-range IoT technologies: The dawn of LoRa™,” *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, vol. 159, num. Fabulous, pp. 51–58, 2015.
- [4] N. S. Sornin, M. S. Luis, T. I. Eirich, T. I. Kramp, y O. A. Hersent, “LoRaWAN™ Specification,” Semtech, Tech. Rep., 2015.
- [5] Microchip Technology Inc., “LoRa(R) Technology Evaluation Kit - 900 - dv164140-2.” [En línea]. Disponible: <http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=dv164140-2>
- [6] Microchip, “LoRa Technology Gateway User’s Guide,” Microchip, Tech. Rep., 2016.
- [7] Microchip Technology Inc., “LoRa® Mote User’s Guide,” Microchip, Tech. Rep., 2016.
- [8] Rpi Foundation, “Raspberry Pi 3 Model B - Raspberry Pi.” [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [9] Microchip, “LoRa Technology Evaluation Suite User’s Guide,” Microchip, Tech. Rep., 2016.
- [10] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, y W. Townsley, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,” *Sensors*, vol. 16, num. 9, p. 1466, 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>
- [11] M. T. Lazarescu, “Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring for IoT applications,” *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 3, num. 1, pp. 45–54, 2013.



- [12] F. Astudillo y A. Vázquez, “Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba,” pp. 1–10, 2016.
- [13] G. Chamorro, “Guía de hidrometría de aguas superficiales,” *SENAMHI-Lima Perú*, 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.senamhi.gob.pe/pdf/aprendiendohidrometria.pdf>
- [14] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, y T. Hänninen, “Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology,” *European Wireless 2016*, pp. 119–124, 2016.
- [15] K. Mikhaylov, “On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology,” in *ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on*, 2016, pp. 55–59.
- [16] R. S. Sinha, Y. Wei, y S.-H. Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT,” *ICT Express*, vol. 3, num. 1, pp. 14–21, 2017. [En línea]. Disponible: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405959517300061>
- [17] O. Georgiou y U. Raza, “Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, num. 2, pp. 162–165, 2017.
- [18] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, y N. Strachan, “Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks,” *Proceedings of IEEE Sensors*, vol. 0, pp. 5–7, 2017.
- [19] J. Petäjäjärvi y K. Mikhaylov, “Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring,” (*ISMICT*), *2016 10th . . .*, 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7498898/>
- [20] M. Aref y A. Sikora, “Free space range measurements with Semtech LoRa technology,” *2014 2nd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS-SWS 2014*, num. September, pp. 19–23, 2014.
- [21] M. Haghghi, Z. Qin, D. Carboni, U. Adeel, F. Shi, y J. A. McCann, “Game theoretic and auction-based algorithms towards opportunistic communications in LPWA LoRa networks,” *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016*, pp. 735–740, 2017.
- [22] L. Gregora, L. Vojtech, y M. Neruda, “Indoor Signal Propagation of LoRa Technology,” *2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, pp. 13–16, 2016.
- [23] J. So, D. Kim, H. Kim, H. Lee, y S. Park, “LoRaCloud: LoRa platform on OpenStack,” *IEEE NETSOFT 2016 - 2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops: Software-Defined Infrastructure for Networks, Clouds, IoT and Services*, pp. 431–434, 2016.



- [24] Iswandi, H. T. Nastiti, I. E. Praditya, y I. W. Mustika, "Evaluation of XBee-Pro transmission range for Wireless Sensor Network's node under forested environments based on Received Signal Strength Indicator (RSSI)," *Proceedings - 2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer, ICST 2016*, pp. 56–60, 2017.
- [25] V. Harvanova y T. Krajcovic, "Implementing ZigBee network in forest regions - Considerations, modeling and evaluations," *2011 International Conference on Applied Electronics*, pp. 1–4, 2011.
- [26] A. Palaios, K. N. Singh, y M. Petri, "Propagation Models for Users Crossing Forest Areas in Central European Forest Environments," *IEEE Waveforms and Signal Processing Propagation*, pp. 14–19, 2016.
- [27] I. F. Akyildiz y M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*, 2010.
- [28] R. Soltani, B. Bash, D. Goekel, S. Guha, y D. Towsley, "Covert single-hop communication in a wireless network with distributed artificial noise generation," in *2014 52nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*. IEEE, sep 2014, pp. 1078–1085. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7028575/>
- [29] Wireless Personal Area Network (WPAN) Working Group, "IEEE 802.15.4 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks." [En línea]. Disponible: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4-2015.html>
- [30] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, y A. Gotta, "A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards," *Computer communications*, 2007.
- [31] I. Bluetooth SIG, "Bluetooth Core Specification 5.0." [En línea]. Disponible: <http://www.mouser.com/pdfdocs/bluetooth-5-faq.pdf>
- [32] E. Khorov, A. Lyakhov, A. Krotov, y A. Guschin, "A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities," *Computer Communications*, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366414002989>
- [33] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, y M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, num. 5, pp. 60–67, oct 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7721743/>
- [34] J. Bardyn, T. Melly, y O. Seller, "IoT: The era of LPWAN is starting now," *European Solid-State*, 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7598235/>
- [35] M. Bor y U. Roedig, "LoRa Transmission Parameter Selection," *Proceedings of the 13th IEEE International*, 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.research.lancs.ac.uk/portal/services/downloadRegister/164374357/lora{ }tps{ }r1342.pdf>



- [36] M. Bor, J. Vidler, y U. Roedig, “LoRa for the Internet of Things,” *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, pp. 361–366, 2016.
- [37] P. Neumann, J. Montavont, y T. Noël, “Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study,” *Wireless and Mobile*, 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7763213/>
- [38] A. Bose y C. Foh, “A practical path loss model for indoor WiFi positioning enhancement,” *8 Signal Processing, 2007 6th International ...*, 2007. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4449717/>
- [39] S. M. Chung, K. T. Kim, J. Song, y H. Y. Youn, “Enhancing node connectivity by utilizing RSSI for ZigBee-based WSN,” *2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence, ICTC 2016*, pp. 555–560, 2016.
- [40] J. Zheng, C. Wu, H. Chu, y Y. Xu, “An improved RSSI measurement in wireless sensor networks,” *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 876–880, 2011. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.162>
- [41] T. Rama Rao, D. Balachander, A. Nanda Kiran, y S. Oscar, “RF propagation measurements in forest & plantation environments for Wireless Sensor Networks,” *International Conference on Recent Trends in Information Technology, ICRTIT 2012*, pp. 308–313, 2012.
- [42] D. H. Kim y J. Y. Lim, “Using Wi-Fi and LoRa,” *2016 Ieee*, pp. 1–3, 2016.
- [43] T. Petrić, M. Goessens, L. Nuaymi, L. Toutain, y A. Pelov, “Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN,” *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, pp. 1–7, 2016.
- [44] W. Lee, “Estimate of local average power of a mobile radio signal,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1985. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1623289/>
- [45] L. Alliance, “LoRaWAN™ 1.0.2 Regional Parameters,” Microchip, Tech. Rep., 2017.
- [46] Anthonykirby, “LoRaWAN packet decoder.” [En línea]. Disponible: <https://lorawan-packet-decoder-0ta6puiniaut.runkit.sh/?data=QBTTGgCAAAFTmIoiUo6uQ{%}3D{%}3D>
- [47] W. Mendenhall, R. Beaver, y B. Beaver, “Introducción a la probabilidad y estadística,” *International Thomson Editores*, p. 780, 2010. [En línea]. Disponible: <http://investigadores.cide.edu/aparicio/data/refs/Mendenhall{ }Prob{ }Estadistica{ }13.pdf>
- [48] A. L. Webster, *Estadística Aplicada a los Negocios*, McGraw-Hill, Ed. Bogotá: McGraw-Hill, 2000.



- [49] Microchip, “RN2903 Datasheet,” Microchip, Tech. Rep., 2017.
- [50] T. Helmenstine, “Calculate Percent Error.” [En línea]. Disponible: <https://sciencenotes.org/calculate-percent-error/>



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867