



# 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 Radio (**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

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Resumen</b>                             | <b>III</b>   |
| <b>Abstract</b>                            | <b>v</b>     |
| <b>Índice general</b>                      | <b>vii</b>   |
| <b>Índice de figuras</b>                   | <b>xiii</b>  |
| <b>Índice de tablas</b>                    | <b>xvii</b>  |
| <b>Dedicatoria</b>                         | <b>xxii</b>  |
| <b>Agradecimientos</b>                     | <b>xxiii</b> |
| <b>Abreviaciones y acrónimos</b>           | <b>xxiv</b>  |
| <b>1. Introducción</b>                     | <b>2</b>     |
| 1.1. Identificación del Problema . . . . . | 3            |
| 1.2. Justificación . . . . .               | 3            |
| 1.3. Alcance . . . . .                     | 4            |
| 1.4. Objetivos . . . . .                   | 5            |
| Pablo Avila Campos                         | vii          |



|  |           |
|--|-----------|
| 1.4.1. Objetivo General . . . . .  | 5         |
| 1.4.2. Objetivos específicos . . . . .   | 5         |
| <b>2. Marco Teórico</b>  | <b>6</b>  |
| 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 ( <a href="#">LPWAN</a> ) . . . . . | 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 ( <a href="#">DR</a> ) y Potencia de Transmisión . . . . .    | 19        |
| 2.6. Modelo de Pérdidas de Trayectoria . . . . .                                   | 20        |
| 2.7. Conclusiones . . . . .  | 21        |
| <b>3. Estado del Arte de LoRa y LoRaWAN</b>  | <b>23</b> |



|  |           |
|--|-----------|
| 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        |
| <b>4. Metodología</b>                                    | <b>29</b> |
| 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 - Rio Machángara . . . . . | 35        |
| 4.4.3. Ambiente 3: Rural - Rio 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. Desencriptado 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        |
| <b>5. Resultados: Análisis de Mediciones y Ajuste del Modelo Empírico basado en RSSI y SNR</b> | <b>44</b> |
| 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         |
| <b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>                                  | <b>63</b>  |
| 6.1. Conclusiones . . . . .   | 64         |
| 6.2. Recomendaciones . . . . .  | 64         |
| 6.3. Trabajos Futuros . . . . .   | 65         |
| <b>A. Configuración de Dispositivos</b>                                   | <b>68</b>  |
| 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>B. Descriptado y Almacenamiento</b>                                    | <b>84</b>  |
| B.1. Descriptación de Paquetes - LoRaWAN . . . . .                        | 85         |
| B.2. Descriptado y Almacenaje . . . . .                                   | 86         |
| <b>C. Mediciones de RSSI y SNR</b>  | <b>91</b>  |
| C.1. Mediciones de RSSI . . . . .   | 92         |
| C.2. Mediciones de SNR . . . . .  | 96         |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>101</b> |





# Índice de figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1. | Proceso de ensanchamiento [1]  | 10 |
| 2.2. | Extracto del Espectrograma de un chirp ( $SF=8$ , $BW=125\text{kHz}$ ) [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 <i>Uplink</i> [4]                                     | 16 |
| 2.7. | Estructura Física de <i>Downlink</i> [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 <i>Gateway</i> [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 RSSI obtenidos para las diferentes frecuencias . . . . .            | 46 |
| 5.2. Medición de RSSI en Ambiente 1 con DR0 . . . . .                               | 48 |
| 5.3. Medición de SNR en Ambiente 1 con DR0 . . . . .                                | 48 |
| 5.4. Análisis de Correlación de RSSI con DR0 - Ambiente 1 . . . . .                 | 50 |
| 5.5. Análisis de Correlación de RSSI 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 - <i>Gateway</i> . . . . .         | 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. Envio 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

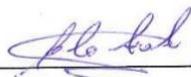
|  |    |
|--|----|
| 2.1. Descripción de campos del mensaje MAC . . . . .                                   | 17 |
| 2.2. Direcciones Almacenadas en el Dispositivo Final . . . . .                         | 18 |
| 2.3. Tabla de tasas de Datos (DR) [4] . . . . .  | 19 |
| 2.4. Tabla de potencias de Transmisión [4] . . . . .                                   | 20 |
| <br>4.1. Tasas de Datos Permitidas . . . . .   | 39 |
| <br>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. Comprarración 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

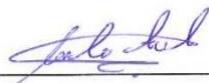
## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

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 black ink, appearing to read "D.F." followed by a surname.

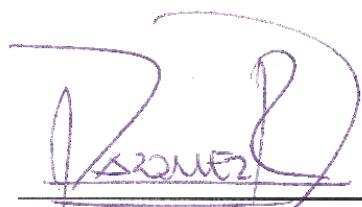
---

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.



\_\_\_\_\_  
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 mas 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 limnográficos <sup>1</sup>. 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

<sup>1</sup>Medidores 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 delinejar 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 inalábricamente 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 dia, 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.

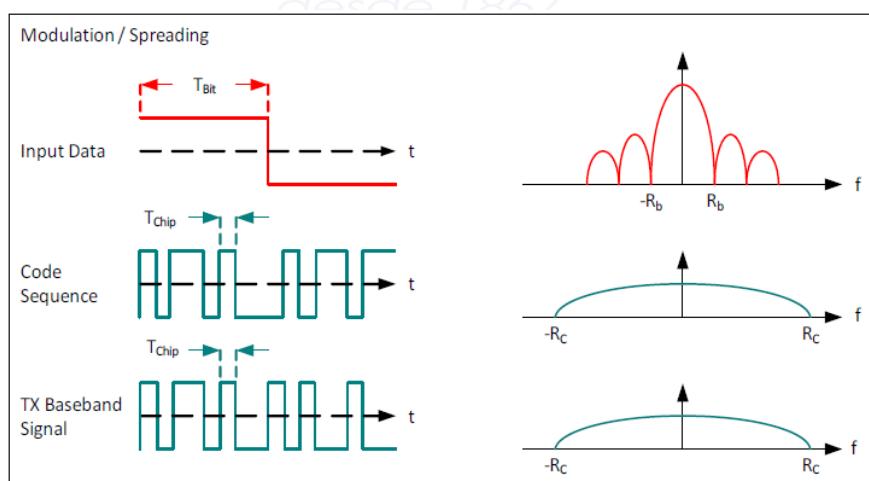


Figura 2.1: Proceso de ensanchamiento [1]



### 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,  $R_b$

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

Donde:

$$\text{Código de tasa} = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.2)$$

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)

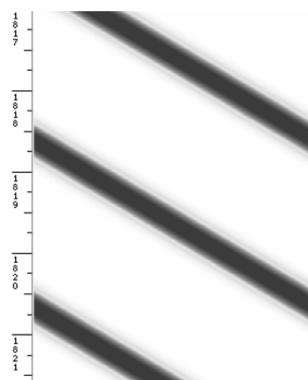


Figura 2.2: Extracto del Espectrograma de un chirp ( $SF=8$ ,  $BW=125\text{kHz}$ ) [2]



### 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 Ensanchamiento (**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 Ensanchamiento (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 más 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 multirayectoria, 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 Alliance<sup>1</sup> 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**.

---

<sup>1</sup><https://www.lora-alliance.org/>

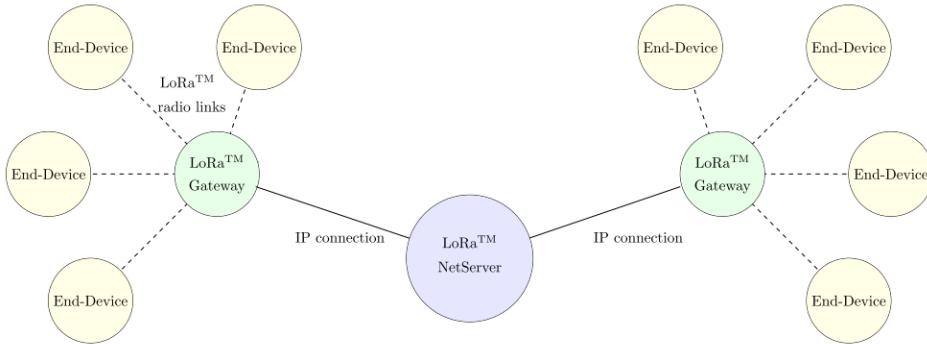


Figura 2.3: Arquitectura del sistema LoRaWAN [3]

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 subbanda 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.

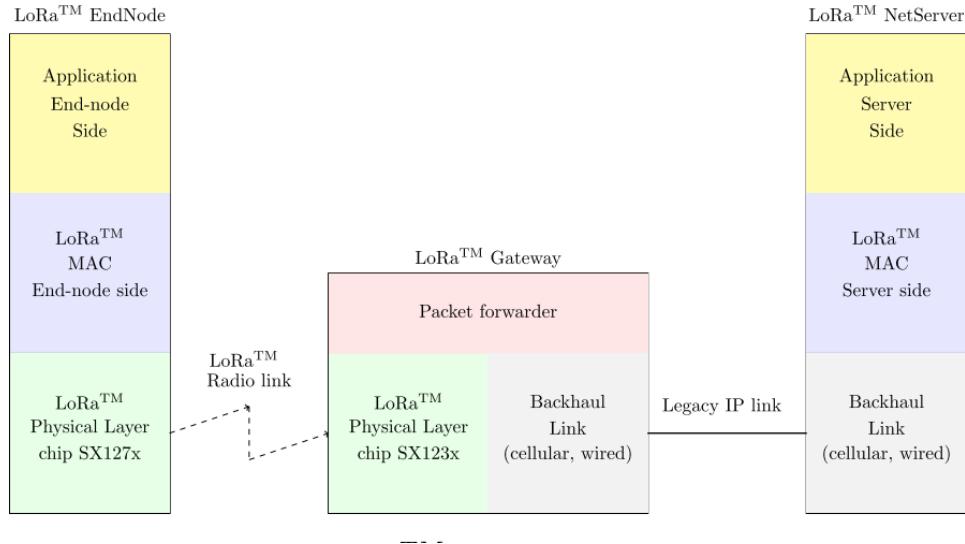


Figura 2.4: Arquitectura del protocolo LoRaWAN [3]



### 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.

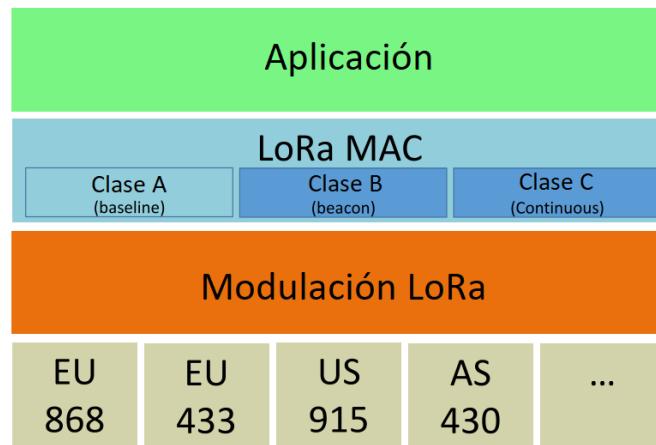


Figura 2.5: Clases LoRaWAN

- **Clase A:** Los dispositivo 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:*

|          |      |          |            |     |
|----------|------|----------|------------|-----|
| Preamble | PHDR | PHDR_CRC | PHYPayload | CRC |
|----------|------|----------|------------|-----|

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:*

|          |      |          |            |
|----------|------|----------|------------|
| Preamble | PHDR | PHDR_CRC | PHYPayload |
|----------|------|----------|------------|

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.

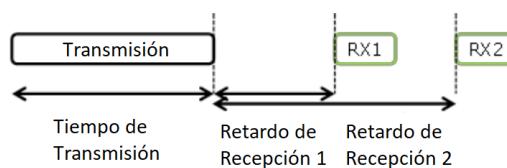


Figura 2.8: Temporización de Recepción[4]



### 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.

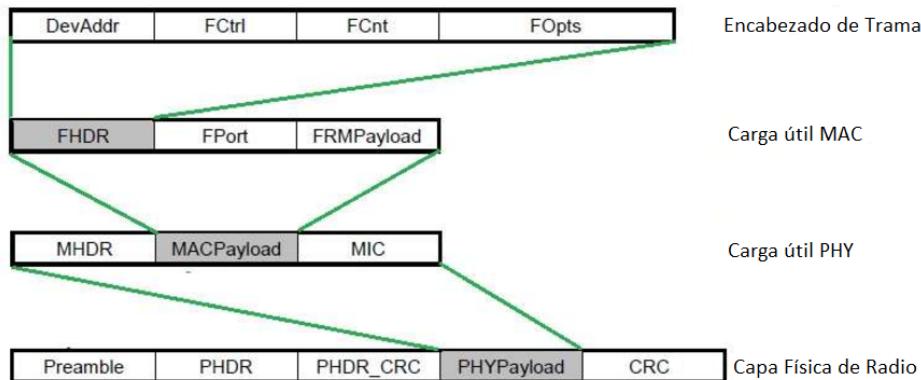


Figura 2.9: Formato de Mensaje LoRa[4]

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 <b>MAC</b> , un octeto de longitud                   |
| <b>MAC</b> Payload        | Datos de la capa superior                                       |
| <b>MIC</b>                | 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 <b>MAC</b> , 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 <a href="#">MIC</a> .                                  |
| AppSKey | Se usa para encriptar y desencriptar la carga útil del campo de carga útil en mensajes <a href="#">MAC</a> .                   |
|         | 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 ( <b>DR</b> ) | 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**.

*desde 1867*

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 desde 1867

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  $d_0$ .  $X_\theta$  es una variable aleatoria con distribución normal con desviación estándar  $\theta$

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  $X_\theta$  representa la característica estocástica de la señal debido a ruido y desvanecimiento multirayectoria. 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  $\theta$ .

### 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.

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

## 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.





## 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 períodos 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, ésto 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

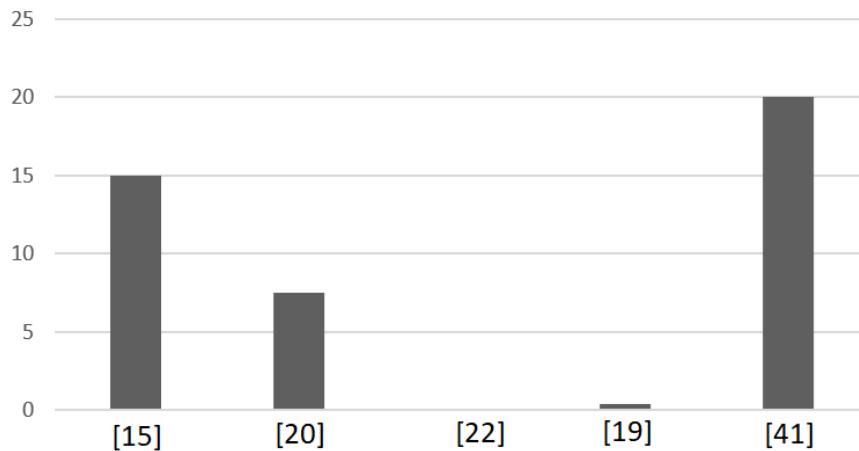


Figura 3.1: Comparación de coberturas

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 un 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 decrece 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

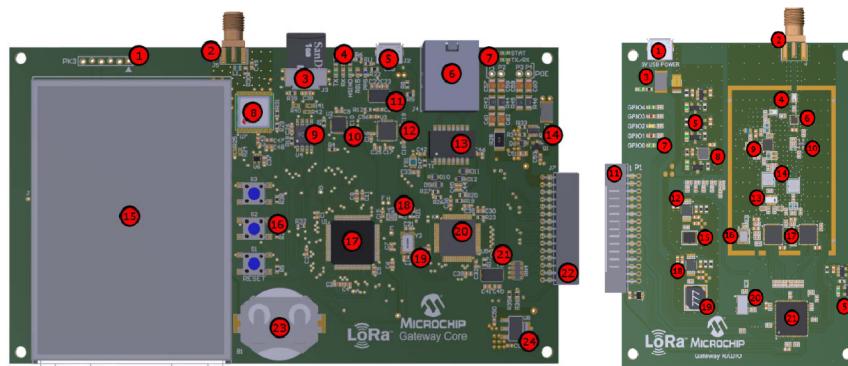


Figura 4.1: Kit de Evaluación de LoRa - 900 [5]

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 y 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]

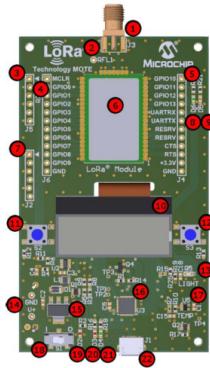


Figura 4.3: Mota LoRa [7]

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 *DE CUENCA* *desde 1867*

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 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]

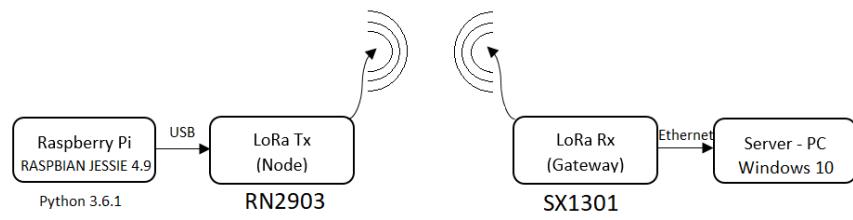


Figura 4.5: Disposición Física de Dispositivos

### 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 linea 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

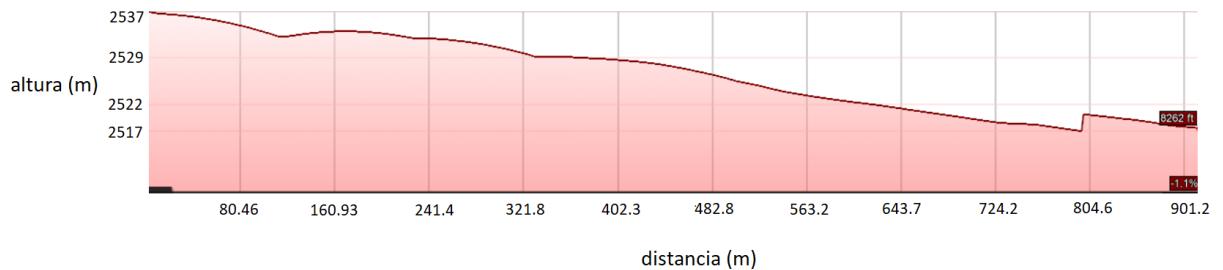


Figura 4.7: Ambiente 1 - Esquema de Elevación

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 espaciamientos 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 - Rio 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: