

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

**Diseño de un Sistema de Monitoreo de Fuentes Hídricas basado en Tecnología LoRa para el sitio Tres Lagunas del cantón Saraguro**

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

**Autores:**

Andrés Amauta Gonzales Zapata

Luis Eduardo González Armijos

**Director:**

Santiago Renán González Martínez

ORCID: 0000-0001-6604-889X

**Codirector:**

Víctor Alonso Cartuche Paqui

ORCID: 0000-0001-5317-6497

**Cuenca, Ecuador**

2023-03-21

## Resumen

Los efectos del cambio climático y las intervenciones antrópicas constituyen los factores más relevantes que están poniendo en riesgo el estado de conservación natural de las lagunas de alta montaña (páramo); en este contexto, estos cuerpos de agua son ecosistemas muy frágiles y vulnerables, condicionados a variaciones fisicoquímicas que influyen sobre las condiciones biológicas y ecológicas. En este sentido, el presente trabajo de titulación presenta el diseño de un sistema de monitorización de fuentes de agua basado en la tecnología LoRa para el ecosistema de páramo Tres Lagunas (Ecuador). La solución se ha implementado utilizando principalmente un microcontrolador ATmega1284P, un transceptor SX1278 y sensores hidrológicos, incorporados en una placa de circuito impreso (PCB). Los datos se transmiten desde el lugar de estudio al servidor The Things Network (TTN) y se envían mediante el protocolo MQTT a la plataforma Node-RED. Por otro lado, se ha desarrollado una interfaz gráfica que permite analizar los datos históricos de temperatura, oxígeno disuelto (OD), potencial de oxidación-reducción (ORP) y potencial de hidrógeno (pH). Además, se han realizado pruebas de consumo energético y experimentos de capa física empleando LoRa con el prototipo. Los resultados revelan un funcionamiento adecuado del prototipo e indican que puede ser instalado en campo por un periodo de 8 días alimentado por un PowerBank. En particular, en cuanto al Spreading Factor (SF), se ha observado que SF9 y SF10 presentan en promedio tasas de recepción de paquetes superiores al 97% a distancias de aproximadamente 1 km. En relación a SF7 y SF8, fueron descartados para este tipo de escenarios debido a la tasa de pérdida de paquetes superior al 10%. El principal aporte de este trabajo es la propuesta de un prototipo portátil, de bajo costo y de código abierto, enfocado a la transmisión de datos fisicoquímicos obtenidos en lagunas de los páramos andinos a través de tecnologías IoT para la administración, gestión y control de los recursos hídricos.

*Palabras clave:* páramo, LoRa, TTN, MQTT, OD, ORP, pH, IoT

**Abstract**

Climate change's effects and anthropic interventions are the most relevant factors that put the natural conservation of high mountain lagoons (moorland) at risk. In this context, these bodies of water are very fragile and vulnerable ecosystems, conditioned by physicochemical variations that influence biological and ecological conditions. In this sense, the following project presents the design of a water source monitoring system based on LoRa technology for the Tres Lagunas moorland ecosystem (Ecuador). The solution has been implemented by using mainly an ATmega1284P microcontroller, an SX1278 transceiver and hydrological sensors, embedded on a printed circuit board (PCB). Data is transmitted from the study site to The Things Network (TTN) server and sent via the MQTT protocol to the Node-RED platform. On the other hand, a graphic interface has been developed that allows analyzing the historical data of temperature, dissolved oxygen (DO), oxidation-reduction potential (ORP) and hydrogen potential (pH). In addition, energy consumption tests and physical layer experiments have been carried out using LoRa with the prototype. The results reveal an adequate functioning of the prototype, and indicate that it can be installed in field for a period of 8 days powered by a PowerBank. In particular, as for the Spreading Factor (SF), it has been observed that SF9 and SF10 present on average packet reception rates higher than 97% at distances of approximately 1 km. In relation to SF7 and SF8, they were discarded for this type of settings due to the packet loss rate greater than 10%. The main contribution of this work is the proposal of a portable, low-cost and open source prototype that focuses on the transmission of physicochemical data obtained in Andean moorland lagoons through IoT technologies for the administration, management and control of the water resources.

*Keywords:* moorland, LoRa, TTN, MQTT, OD, ORP, pH, IoT

## Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>14</b>
1.1. Definición del problema y justificación .....	14
1.2. Alcance de la propuesta .....	15
1.3. Objetivos .....	15
1.3.1. Objetivos específicos .....	15
1.3.2. Objetivos específicos .....	16
1.4. Contribuciones .....	16
<b>2. Marco teórico</b>	<b>17</b>
2.1. Estaciones meteorológicas e hidrológicas .....	17
2.2. Tecnología LoRa/LoRaWAN .....	17
2.2.1. Spreading Factor (SF) .....	18
2.2.2. Coding Rate (CR) .....	18
2.2.3. LoRa .....	19
2.2.4. LoRaWAN .....	20
2.2.5. Modos de acceso – Red LoRaWAN .....	21
2.2.5.1. Activation by Personalization (ABP) .....	21
2.2.5.2. Over-the-Air activation (OTAA) .....	21
2.3. Protocolo MQTT .....	22
2.3.1. Arquitectura MQTT Publish/Subscribe .....	22
2.4. Wireshark y formato de encapsulación LoRaTap .....	23
2.5. Node-RED .....	23
2.6. iPerf .....	23
<b>3. Estado del arte</b>	<b>25</b>
3.1. Dispositivos de adquisición de datos ambientales .....	25
3.2. Tecnología LoRa para monitoreo ambiental .....	26
3.3. Parámetros de transmisión con LoRa .....	27
<b>4. Arquitectura de monitorización</b>	<b>29</b>
4.1. Metodología .....	29
4.2. Desarrollo hardware .....	30
4.2.1. Diseño y construcción de la placa de circuito impreso .....	30
4.2.1.1. Diagrama esquemático .....	30
4.2.1.2. Características del PCB .....	31
4.2.2. Descripción de los equipos .....	31
4.2.2.1. Microcontrolador ATmega1284P .....	31
4.2.2.2. Transceptor LoRa RA-02 .....	32
4.2.2.3. Reloj en tiempo real DS3231 .....	32
4.2.3. Adquisición de datos .....	33
4.2.3.1. Temperatura .....	33
4.2.3.2. Potencial de hidrógeno (pH) .....	33
4.2.3.3. Potencial de Oxidación-Reducción (ORP) .....	33
4.2.3.4. Oxígeno Disuelto (DO) .....	34
4.2.4. Nivel de corriente .....	34
4.2.5. Gestión y control de energía .....	35
4.2.6. Descripción del Gateway .....	36
4.3. Desarrollo software .....	36

4.3.1. Captura del tráfico LoRa y presentación en Wireshark .....	36
4.3.1.1. Explicación del código que genera las combinaciones .....	37
4.3.2. Descripción software del nodo .....	37
4.3.3. Estructura de la trama .....	38
4.3.4. Sistema de monitoreo Node-RED .....	39
4.3.5. Descripción del software del gateway .....	41
4.4. Área de estudio .....	41
4.4.1. Escenario y ubicación del nodo-Gateway .....	42
4.5. LoRa en diferentes estudios .....	45
4.5.1. Entorno rural .....	45
4.5.2. Alto páramo .....	46
<b>5. Resultados</b>	<b>47</b>
5.1. Análisis de los datos LoRa en diferentes escenarios .....	47
5.2. Zona rural .....	47
5.2.1. Punto 1 - Zona rural .....	47
5.2.2. Punto 2 - Zona rural .....	48
5.2.3. Punto 3 - Zona rural .....	49
5.2.4. Punto 4 - Zona rural .....	50
5.2.5. Packet Reception Rate (PRR) .....	52
5.2.5.1. PRR General .....	53
5.2.6. Throughput/Bit Rate .....	53
5.2.6.1. Bit Rate general por SF .....	55
5.2.6.2. Bit Rate general por CR .....	56
5.2.7. Cobertura y RSSI .....	56
5.2.7.1. RSSI general por SF .....	57
5.2.7.2. RSSI general por CR .....	57
5.2.8. Delay .....	58
5.2.8.1. Delay general por SF .....	59
5.2.8.2. Delay general por CR .....	59
5.2.9. Jitter .....	59
5.2.9.1. Jitter general por SF .....	59
5.3. Zona alto páramo .....	62
5.3.1. Gateway - Zona alto páramo .....	62
5.3.2. Punto 1 - Zona alto páramo .....	62
5.3.3. Punto 2 - Zona alto páramo .....	64
5.3.4. Packet Reception Rate (PRR) .....	65
5.3.4.1. PRR general .....	65
5.3.5. Throughput/Bit Rate .....	66
5.3.5.1. Bit Rate general por SF y CR .....	67
5.3.6. Cobertura y RSSI .....	68
5.3.6.1. RSSI general por SF .....	68
5.3.6.2. RSSI general por CR .....	69
5.3.7. Delay .....	69
5.3.7.1. Delay general por SF .....	69
5.3.7.2. Delay general por CR .....	70
5.4. Pruebas de consumo energético .....	71
5.4.1. Parámetros de configuración .....	71
5.4.2. Análisis corriente requerida .....	71
5.4.2.1. Transmisión LoRa SF9 .....	72

5.4.2.2. Transmisión LoRa SF10 .....	73
5.4.3. Suministro energético .....	74
5.5. Contrastación con estación comercial .....	75
5.5.1. Verificación de medidas .....	75
5.5.2. Comparación de datos .....	76
5.5.2.1. Temperatura .....	76
5.5.2.2. Potencial de hidrógeno .....	77
5.5.2.3. Oxígeno Disuelto .....	78
5.6. Datos recolectados .....	79
5.7. Detalle de costos .....	82
5.8. Conclusiones .....	83
<b>6. Conclusiones</b>	<b>84</b>
6.1. Conclusiones .....	84
6.2. Recomendaciones .....	84
6.3. Trabajos futuros .....	85
<b>Bibliografía</b>	<b>86</b>
<b>A. Resultados individuales de los experimentos LoRa.</b>	<b>91</b>
A.1. Introducción .....	91
A.2. Zona Rural .....	91
A.2.1. PRR .....	91
A.2.1.1. PRR SF7 .....	91
A.2.1.2. PRR SF8 .....	92
A.2.1.3. PRR SF9 .....	92
A.2.1.4. PRR SF10 .....	93
A.2.1.5. PRR SF11 .....	93
A.2.1.6. PRR SF12 .....	94
A.2.2. Throughput/Bit Rate .....	94
A.2.2.1. Bit Rate SF7 .....	94
A.2.2.2. Bit Rate SF8 .....	95
A.2.2.3. Bit Rate SF9 .....	95
A.2.2.4. Bit Rate SF10 .....	96
A.2.2.5. Bit Rate SF11 .....	96
A.2.2.6. Bit Rate SF12 .....	97
A.2.3. RSSI .....	97
A.2.3.1. RSSI SF7 .....	97
A.2.3.2. RSSI SF8 .....	98
A.2.3.3. RSSI SF9 .....	98
A.2.3.4. RSSI SF10 .....	99
A.2.3.5. RSSI SF11 .....	99
A.2.3.6. RSSI SF12 .....	100
A.2.4. Delay .....	100
A.2.4.1. Delay SF9 .....	100
A.2.4.2. Delay SF10 .....	101
A.2.4.3. Delay SF11 .....	102
A.2.4.4. Delay SF12 .....	102
A.2.5. Jitter .....	103
A.2.5.1. Jitter SF9 .....	103

A.2.5.2. Jitter SF10 .....	103
A.2.5.3. Jitter SF11 .....	104
A.2.5.4. Jitter SF12 .....	105
A.3. Zona Alto Páramo .....	105
A.3.1. PRR .....	105
A.2.1.1. PRR SF7 .....	105
A.2.1.2. PRR SF8 .....	106
A.2.1.3. PRR SF9 .....	106
A.2.1.4. PRR SF10 .....	107
A.2.1.5. PRR SF11 .....	107
A.2.1.6. PRR SF12 .....	108
A.3.2. Bit Rate .....	108
A.2.2.1. Bit Rate SF7 .....	108
A.2.2.2. Bit Rate SF8 .....	109
A.2.2.3. Bit Rate SF9 .....	109
A.2.2.4. Bit Rate SF10 .....	110
A.2.2.5. Bit Rate SF11 .....	110
A.2.2.6. Bit Rate SF12 .....	111
A.3.3. RSSI .....	111
A.2.3.1. RSSI SF7 .....	111
A.2.3.2. RSSI SF8 .....	112
A.2.3.3. RSSI SF9 .....	112
A.2.3.4. RSSI SF10 .....	113
A.2.3.5. RSSI SF11 .....	113
A.2.3.6. RSSI SF12 .....	114
A.3.4. Delay .....	114
A.2.4.1. Delay SF9 .....	114
A.2.4.2. Delay SF10 .....	115
A.2.4.3. Delay SF11 .....	115
A.2.4.4. Delay SF12 .....	116
<b>B. Diseño del esquemático.</b>	<b>117</b>
B.1. Introducción .....	117
B.2. Esquemático .....	117

## Índice de figuras

1.1.1	Ubicación de la zona de estudio [1] .....	14
2.2.1	Pila de Tecnología LoRaWAN [2] .....	18
2.2.2	Ejemplo de CR para 8 bits transmitidos en SF8 [3] .....	19
2.2.3	Sistema DSSS [2] .....	19
2.2.4	Señal de LoRa Chirp Spread Spectrum [2] .....	20
2.2.5	Arquitectura LoRaWAN [4] .....	21
2.3.1	Arquitectura MQTT Publish/Subscribe [5] .....	22
2.4.1	Paquete LoRa en Wireshark .....	23
2.6.1	Diagrama secuencial de la herramienta iPerf .....	24
4.1.1	Diagrama funcional de sistema .....	29
4.2.1	Diagrama de bloques del prototipo .....	31
4.2.2	Vista superior PCB .....	31
4.2.3	MCU ATmega1284P [6] .....	32
4.2.4	Módulo LoRa RA-02 [7] .....	32
4.2.5	RTC DS3231 [8] .....	32
4.2.6	Sensor de temperatura DS18B20 [9] .....	33
4.2.7	Sensor del potencial de hidrógeno [10] .....	33
4.2.8	Sensor del potencial de óxido-reducción [10] .....	34
4.2.9	Sensor de oxígeno disuelto [10] .....	34
4.2.10	Sensor de corriente INA219 .....	35
4.2.11	Diseño del prototipo y sus componentes .....	35
4.2.12	Equipo Wi-Fi LoRa 32 (V2.1) .....	36
4.3.1	Diagrama de flujo del programa de la estación .....	38
4.3.2	Estructura de la trama de datos .....	38
4.3.3	Esquema del sistema de monitoreo en Node-RED .....	39
4.3.4	Configuración suscriptor MQTT en Node-RED .....	39
4.3.5	Configuración para almacenamiento de datos con SQLite .....	40
4.3.6	Presentación de datos en la interfaz web .....	40
4.4.1	Ubicación del sistema de humedales Tres Lagunas al sur del Ecuador .....	41
4.4.2	Ubicación del GW en el sistema de humedales Tres Lagunas .....	42
4.4.3	Ubicación del GW visto en Google Earth .....	42
4.4.4	Mapa de cobertura de la operadora Tuenti/Movistar en Tres Lagunas .....	43
4.4.5	Mapa de cobertura de la operadora Claro en Tres Lagunas .....	43
4.4.6	Mapa de cobertura de la operadora CNT en Tres Lagunas .....	44
4.4.7	Ánálisis del bit rate de uplink para las operadoras Movistar y CNT .....	44
4.4.8	Posibles lagunas del sistema permanente .....	45
4.5.1	Ubicación del GW y distribución del nodo en el entorno rural .....	46
5.2.1	GW en el primer punto de la zona rural .....	48
5.2.2	Perfil de elevación del primer punto de la zona rural .....	48
5.2.3	GW en el segundo punto de la zona rural .....	49
5.2.4	Perfil de elevación del segundo punto de la zona rural .....	49
5.2.5	GW en el tercer punto de la zona rural .....	50
5.2.6	Perfil de elevación del tercer punto de la zona rural .....	50
5.2.7	GW en el cuarto punto de la zona rural .....	51
5.2.8	Perfil de elevación del cuarto punto de la zona rural .....	51
5.2.9	Adeuada ubicación y colocación del GW en la zona rural .....	52
5.2.10	PRR general obtenido en la zona rural .....	53

5.2.11	Bit Rate en Tx para cada SF en la zona rural .....	54
5.2.12	Bit Rate en Tx para cada CR en la zona rural .....	54
5.2.13	Bit Rate obtenido en Rx por cada SF en la zona rural .....	55
5.2.14	Bit Rate obtenido en Rx por cada CR en la zona rural .....	56
5.2.15	RSSI general obtenido para diferentes valores de SF en la zona rural .....	57
5.2.16	RSSI general obtenido para diferentes valores de CR en la zona rural .....	58
5.2.17	Delay general obtenido para diferentes valores de SF en la zona rural .....	59
5.2.18	Delay general obtenido para diferentes valores de CR en la zona rural .....	60
5.2.19	Jitter general obtenido para diferentes valores de SF en la zona rural .....	60
5.2.20	Delay promedio en comparación con el jitter promedio por SF en la zona rural .....	62
5.3.1	Ubicación del GW en el páramo .....	63
5.3.2	Nodo en el primer punto del páramo .....	63
5.3.3	Perfil de elevación del primer punto del páramo .....	64
5.3.4	Nodo en el segundo punto del páramo .....	64
5.3.5	Perfil de elevación del segundo punto del páramo .....	65
5.3.6	PRR general obtenido en el páramo .....	66
5.3.7	Bit Rate en Tx para cada SF en el páramo .....	66
5.3.8	Bit Rate en Tx para cada CR en el páramo .....	67
5.3.9	Bit Rate general para cada SF obtenido en el páramo .....	67
5.3.10	Bit Rate general para cada CR obtenido en el páramo .....	68
5.3.11	RSSI general obtenido para diferentes valores de SF en el páramo .....	68
5.3.12	RSSI general obtenido para diferentes valores de CR en el páramo .....	69
5.3.13	Delay general obtenido para diferentes valores de SF en el páramo .....	70
5.3.14	Delay general obtenido para diferentes valores de CR en el páramo .....	70
5.4.1	Corriente general requerida por el prototipo .....	72
5.4.2	Corriente consumida durante las etapas de funcionamiento usando SF9 .....	72
5.4.3	Corriente demandada durante la etapa de transmisión LoRa usando SF9 .....	73
5.4.4	Corriente consumida durante las etapas de funcionamiento usando SF10 .....	73
5.4.5	Corriente demandada durante la etapa de transmisión LoRa usando SF10 .....	74
5.4.6	Energía requerida por el prototipo .....	74
5.5.1	Equipo de referencia Multi 3630 IDS y prototipo .....	75
5.5.2	Experimentos realizados con los dos equipos .....	75
5.5.3	Datos de temperatura entre el equipo de referencia y el prototipo .....	76
5.5.4	Datos del potencial de hidrógeno entre el equipo de referencia y el prototipo .....	77
5.5.5	Datos de oxígeno disuelto entre el equipo de referencia y el prototipo .....	78
5.6.1	Datos capturados con el prototipo en el sitio de estudio .....	80
5.6.2	Instalación del prototipo en el sitio de estudio .....	81
A.2.1	PRR obtenido con Spreading Factor 7 en la zona rural .....	91
A.2.2	PRR obtenido con Spreading Factor 8 en la zona rural .....	92
A.2.3	Payload parcialmente distorsionado en la zona rural .....	92
A.2.4	PRR obtenido con Spreading Factor 9 en la zona rural .....	93
A.2.5	PRR obtenido con Spreading Factor 10 en la zona rural .....	93
A.2.6	PRR obtenido con Spreading Factor 11 en la zona rural .....	94
A.2.7	PRR obtenido con Spreading Factor 12 en la zona rural .....	94
A.2.8	Bit Rate obtenido con Spreading Factor 7 en la zona rural .....	95
A.2.9	Bit Rate obtenido con Spreading Factor 8 en la zona rural .....	95
A.2.10	Bit Rate obtenido con Spreading Factor 9 en la zona rural .....	96
A.2.11	Bit Rate obtenido con Spreading Factor 10 en la zona rural .....	96

A.2.12 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 11 en la zona rural .....	97
A.2.13 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 12 en la zona rural .....	97
A.2.14 RSSI obtenido para SF7 en la zona rural .....	98
A.2.15 RSSI obtenido para SF8 en la zona rural .....	98
A.2.16 RSSI obtenido para SF9 en la zona rural .....	99
A.2.17 RSSI obtenido para SF10 en la zona rural .....	99
A.2.18 RSSI obtenido para SF11 en la zona rural .....	100
A.2.19 RSSI obtenido para SF12 en la zona rural .....	100
A.2.20 Delay obtenido para SF9 en la zona rural .....	101
A.2.21 Delay obtenido para SF10 en la zona rural .....	101
A.2.22 Delay obtenido para SF11 en la zona rural .....	102
A.2.23 Delay obtenido para SF12 en la zona rural .....	102
A.2.24 Jitter obtenido para SF9 en la zona rural .....	103
A.2.25 Jitter obtenido para SF10 en la zona rural .....	104
A.2.26 Jitter obtenido para SF11 en la zona rural .....	104
A.2.27 Jitter obtenido para SF12 en la zona rural .....	105
A.3.1 PRR obtenido con Spreading Factor 7 en el páramo .....	106
A.3.2 PRR obtenido con Spreading Factor 8 en el páramo .....	106
A.3.3 PRR obtenido con Spreading Factor 9 en el páramo .....	107
A.3.4 PRR obtenido con Spreading Factor 10 en el páramo .....	107
A.3.5 PRR obtenido con Spreading Factor 11 en el páramo .....	108
A.3.6 PRR obtenido con Spreading Factor 12 en el páramo .....	108
A.3.7 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 7 en el páramo .....	109
A.3.8 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 8 en el páramo .....	109
A.3.9 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 9 en el páramo .....	110
A.3.10 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 10 en el páramo .....	110
A.3.11 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 11 en el páramo .....	111
A.3.12 Bit Rate obtenido con Spreading Factor 12 en el páramo .....	111
A.3.13 RSSI obtenido para SF7 en el páramo .....	112
A.3.14 RSSI obtenido para SF8 en el páramo .....	112
A.3.15 RSSI obtenido para SF9 en el páramo .....	113
A.3.16 RSSI obtenido para SF10 en el páramo .....	113
A.3.17 RSSI obtenido para SF11 en el páramo .....	114
A.3.18 RSSI obtenido para SF12 en el páramo .....	114
A.3.19 Delay obtenido para SF9 en la zona páramo .....	115
A.3.20 Delay obtenido para SF9 en la zona páramo .....	115
A.3.21 Delay obtenido para SF9 en la zona páramo .....	116
A.3.22 Delay obtenido para SF9 en la zona páramo .....	116
B.2.1 Diseño parte central .....	117
B.2.2 Diseño puertos de entrada para sensores .....	118
B.2.3 Diseño puertos SPI, I2C y alimentación .....	119

**Índice de tablas**

2.2.1 Relación entre SF y sensibilidad .....	18
5.2.1 Tiempos generados por el RTC en Tx y Rx .....	61
5.2.2 Tiempos generados por el RTC en Tx y Rx con un retardo de 500 ms .....	61
5.2.3 Tiempos generados por el RTC en Tx y Rx, con un retardo de 900 ms .....	61
5.4.1 Parámetros de transmisión LoRaWAN .....	71
5.4.2 Elementos hardware de la estación .....	71
5.5.1 Error relativo promedio del sensor de temperatura .....	77
5.5.2 Error relativo promedio del sensor de potencial de hidrógeno .....	78
5.5.3 Error relativo promedio del sensor de oxígeno disuelto .....	79
5.6.1 Resumen de los datos medidos con el prototipo .....	81
5.6.2 Resumen de los datos medidos en el estudio de referencia .....	82
5.7.1 Costos generales del prototipo .....	82

## **Agradecimientos**

Expreso mis más sinceros agradecimientos a la Universidad de Cuenca por haberme dado la oportunidad y todas las herramientas necesarias para ser un profesional de la ingeniería. A mis padres María y Manuel junto a mis hermanos Lourdes, Elizabeth, Manuel, Luis y Dennis que me han acompañado incondicionalmente durante toda mi vida para alcanzar este nuevo logro. Al Ing. Santiago González por su tiempo y entrega incondicional a los estudiantes y a todos mis amigos, compañeros y profesores que han sido parte de esta enriquecedora experiencia.

**Andrés Amauta Gonzales Zapata**

## Agradecimientos

A mis queridos padres, Norma y Efraín, quienes con su amor, sacrificio y apoyo incondicional me han acompañado en cada paso de este largo camino, brindándome la fortaleza y la confianza para alcanzar mis sueños. Por haberme enseñado el valor de la perseverancia, la importancia de la educación y la búsqueda incansable del conocimiento. A ustedes, mi eterna gratitud y amor.

A mi hermano Diego, por ser mi consejero y amigo en esta travesía. Tu apoyo y compañía en los momentos difíciles me han ayudado a mantenerme firme y a seguir adelante. Gracias por ser parte de esta historia.

Al Ing. Santiago González, mi director de tesis, quien, con su paciencia, conocimientos y sabiduría, me ha guiado en la elaboración de este trabajo. Agradezco su compromiso y su pasión por la enseñanza, lo cual ha dejado una huella imborrable en mi formación académica y personal.

A la Universidad de Cuenca, por brindarme la oportunidad de crecer y desarrollarme en el ámbito académico y profesional. A todos los profesores y compañeros que han sido parte de mi proceso educativo, mi más sincero agradecimiento.

Esta tesis es el resultado del esfuerzo y la dedicación de cada uno de ustedes, y con orgullo la dedico a todos aquellos que han sido parte fundamental en mi vida y en la realización de este sueño.

**Luis Eduardo González Armijos**

## Capítulo 1

### Introducción

#### 1.1. Definición del problema y justificación

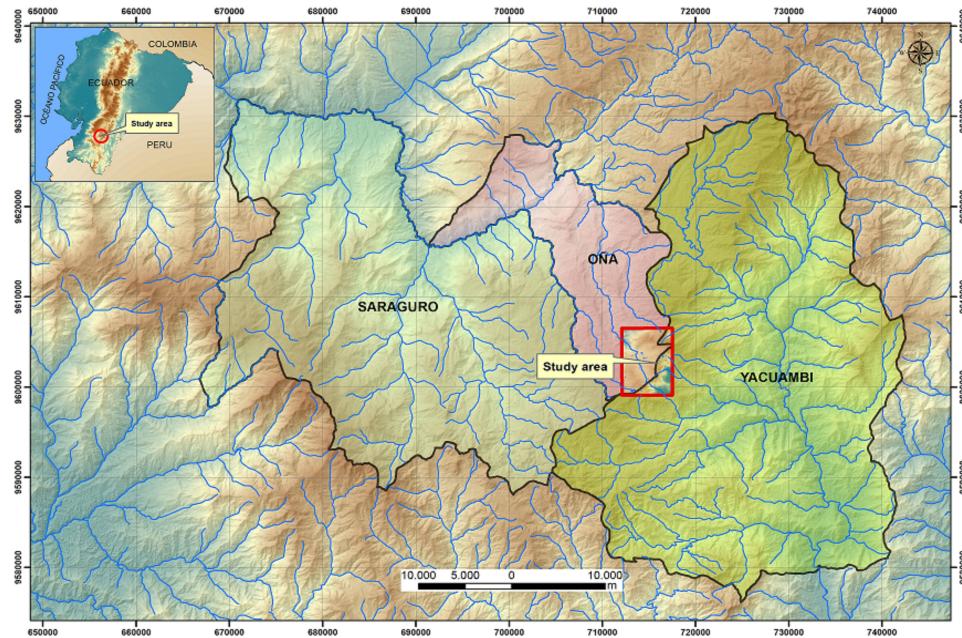


Figura 1.1.1: Ubicación de la zona de estudio [1].

Los recursos hídricos son vulnerables ante el cambio climático debido a varios factores, por ejemplo, el aumento de temperatura puede contribuir a la evaporación en las lagunas, reducción del hábitat y alteraciones en la calidad del agua [11]. En tal contexto, en [12] se realiza una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos. El área de estudio consistió en los páramos y humedales de los cantones de Nabón, Oña, Saraguro y Yacuambi, específicamente los sectores de Tres Lagunas y del río Shincata (ver Figura 1.1.1). Cabe indicar que a pesar de la existencia de 2 estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), una en Oña (M421) y la otra en San Lucas (M32), debido a la ubicación de estas estaciones no se puede determinar con exactitud las condiciones climáticas del área de estudio y por tanto la comprensión de estos ecosistemas acuáticos es casi nula. En particular, las estaciones sólo cubren las vertientes del sistema hídrico del Pacífico y Amazónico de la zona de estudio. Los datos recogidos de dichas estaciones, posiblemente presenten discrepancias con las condiciones reales del sitio, debido a los aportes de las lluvias, neblina y

llovizna.

En relación a Tres Lagunas, este sitio contribuye a la subsistencia de las poblaciones cercanas debido a su gran valor ecológico, económico, social y cultural. La principal contribución es el suministro de agua para el consumo doméstico y el riego de cultivos. Además, tiene gran importancia cultural para los 3 cantones porque se considera un lugar mágico, vinculado con las tradiciones religiosas ancestrales y la manifestación de poder y energía de la madre tierra [13]. Actualmente, este complejo de humedales se ve amenazado por varios factores, por ejemplo, la vía que conecta a Saraguro y Yacuambi cruza por esta zona y representa un gran riesgo para la conservación y protección de este sector. En tal sentido, resulta indispensable conocer el estado de las lagunas con el objetivo de prevenir un déficit de los recursos hídricos, mejorar la calidad del agua y mitigar el efecto que pueda causar la contaminación de factores humanos como la circulación de vehículos, basura y residuos de turistas, entre otros.

Tres lagunas no dispone de un sistema que permita monitorear el estado del clima y del agua, las estaciones más cercanas se encuentran a varios kilómetros. Factores como la distancia, condiciones climáticas adversas, limitaciones en la cobertura de la red móvil y el acceso a Internet han impedido que se implemente algún tipo de estación meteorológica en las lagunas de interés. Por consiguiente, el despliegue de estaciones de monitorización en el sector, representa una contribución para determinar el estado actual y las vulnerabilidades a las que se encuentran expuestas los ecosistemas acuáticos del sitio y brindar datos que permitan tomar decisiones a los entes correspondientes para proteger y conservar los recursos naturales.

En este contexto, este trabajo se enfoca en una solución tecnológica que permita monitorear el sitio Tres Lagunas, a través de un dispositivo de adquisición y transmisión de datos, desde el sitio de estudio hacia Internet.

## 1.2. Alcance de la propuesta

Para el desarrollo del presente proyecto se propone construir un nodo que incorpore la tecnología LoRa (Long Range (LoRa)) integrado principalmente por un microcontrolador (Microcontroller Unit (MCU)) ATmega1284P de bajo consumo energético compatible con Arduino. De esta forma, es posible emplear librerías como *Low-Power* [14] para aprovechar al máximo las cualidades del procesador. Además, se emplea un transceptor Thinker Ra-02 constituido por el chip de radio frecuencia SX1278, ideal para comunicaciones de espectro ensanchado de ultra larga distancia [15]. Finalmente, el nodo incorpora sensores hídricos para capturar datos de temperatura, oxígeno disuelto (Dissolved Oxygen (DO)), potencial de hidrógeno (Potential of Hydrogen (pH)) y potencial de óxido-reducción (Oxidation-Reduction Potential (ORP)). Todos los elementos serán integrados en una placa de circuito impreso (Printed Circuit Board (PCB)). El nodo será alimentado a través de un *PowerBank* de 10000 mAh. Por otra parte, el nodo se comunicará con un GW (Gateway (GW)) Heltec WiFi Kit 32 mediante la tecnología LoRa. El GW utiliza el protocolo LoRaWAN (Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)) para comunicarse con el servidor alojado en TTN (The Things Network (TTN)). En relación a su ubicación, el GW estará ubicado en una zona estratégica del sitio de estudio con el objetivo de proporcionar cobertura a la mayor cantidad de lagunas y bofedales, dicho GW establece una conexión directa con el nodo, ubicado adecuadamente en la laguna de mayor interés. Los datos alojados en el servidor TTN son transferidos mediante el protocolo MQTT (Message Queueing Telemetry Transport (MQTT)) a la plataforma Node-RED. Además, se implementa una API (*Application Programming Interface (API)*) que proporciona los datos históricos a una interfaz gráfica desarrollada con JavaScript mediante la librería *open source* APEXCHARTS.JS.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de monitoreo de fuentes hídricas basado en tecnología LoRa y Redes de sensores WSN (Wireless Sensor Network (WSN)) LPWAN (Low Power Wide Area Network (LPWAN)) para el ecosistema de páramos Tres Lagunas.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Diseñar e implementar un prototipo cuyo objetivo es adquirir los parámetros ambientales capturados por sensores y transmitirlos hacia el módulo LoRa.
- Desarrollar un sistema de monitoreo de parámetros ambientales en la plataforma Node-RED, utilizando el protocolo de comunicación MQTT.
- Analizar las métricas de red y rendimiento energético mediante experimentos reales basados en las necesidades de cada estación.
- Aportar desde el punto de vista tecnológico para la adquisición de parámetros ambientales en zonas de fuentes hídricas con aplicación de monitorización para la gestión estratégica de recursos naturales.

## **1.4. Contribuciones**

Las principales contribuciones del presente trabajo de tesis son:

- Software para la captura de paquetes LoRa y encapsulamiento en formato pcap.
- Análisis de cobertura y parámetros LoRa en entornos rurales y alto andinos.
- Sistema de monitoreo de variables hidrológicas con conexión a la plataforma TTN.
- Prototipo para la adquisición y transmisión de variables fisicoquímicas en ecosistemas de páramos.

## **Capítulo 2**

---

### **Marco teórico**

---

En este capítulo se presenta los conceptos principales relacionados con el trabajo de titulación, tales como LoRa, LoRaWAN, estaciones meteorológicas, Spreading Factor (SF), Coding Rate (CR) modos de acceso, protocolo MQTT, formato de encapsulación LoRaTap, Node-RED, iPerf, entre otros. Se realiza una explicación detallada del funcionamiento tanto de la capa física como de la capa de acceso al medio de la tecnología de comunicación, además de los diferentes modos de autenticación y sus características. Los aspectos fundamentales relacionados con SF y CR se abordan en esta sección. También se explica la configuración y operación de las principales tecnologías utilizadas tanto para la implementación, como para los experimentos realizados.

### **2.1. Estaciones meteorológicas e hidrológicas**

Según la World Meteorological Organization (WMO) se puede definir a una estación meteorológica como una instalación que cuenta con una serie de instrumentos para la recolección y registro de variables ya sean estas, climáticas, sinópticas o marinas [16]. Los datos recolectados se utilizan principalmente para llevar a cabo predicciones a partir de la elaboración de modelos numéricos.

Generalmente la estructura de una estación está compuesta por una consola y un grupo de sensores. La ubicación de la consola depende de las características del proyecto. Tradicionalmente, la consola solía estar ubicada en la misma estructura que aloja a los sensores, pero gracias a los cambios tecnológicos, los sistemas actuales permiten que la comunicación entre la consola y los sensores se efectúe a través de enlaces de radiofrecuencia, lo que simplifica la conectividad con un ordenador. De esta manera se puede construir un servidor web que almacene los datos y posteriormente acceder a la información meteorológica a través de Internet [17]. En este contexto, una estación hidrometeorológica combina el monitoreo de factores climáticos con datos de los recursos hídricos superficiales o subterráneos.

### **2.2. Tecnología LoRa/LoRaWAN**

LoRa es una técnica de modulación de radiofrecuencia de espectro ensanchado, abreviatura de *Long Range*, patentada por Semtech [18] que corresponde a la capa física, como se observa en la Figura 2.2.1. En cambio, LoRaWAN es un estándar de la capa de control de acceso al medio (Media Access Control (MAC)) de red amplia y baja potencia (LPWAN) gestionado por Lora Alliance [19].

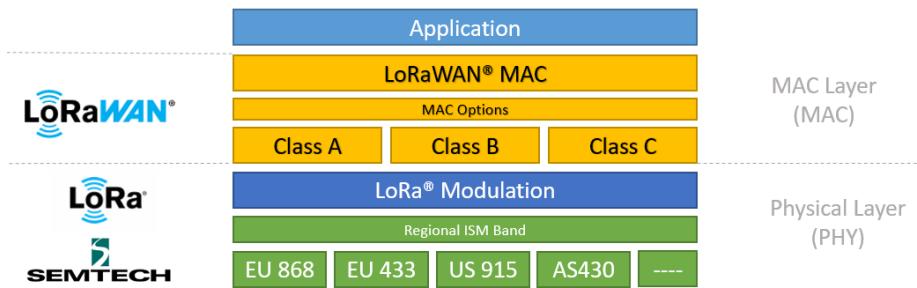


Figura 2.2.1: Pila de Tecnología LoRaWAN [2].

### 2.2.1. Spreading Factor (SF)

A nivel físico, uno de los parámetros más importantes que afectan el rendimiento es el factor de dispersión (SF), que es la relación entre el ancho de banda de la señal y la tasa de símbolos. El ancho de banda fijo aumenta el tiempo en aire (tiempo que se tarda en enviar un paquete, Time on Air (ToA)) y hace que el receptor sea más sensible. Para LoRa en particular, el tiempo en aire se duplica por cada unidad de SF adicional, y la sensibilidad del receptor se reduce en aproximadamente 3 dBm como se observa en la Tabla 2.2.1 [20].

Tabla 2.2.1: Relación entre SF y sensibilidad.

SF	Tasa de bits (kb/s)	Sensibilidad (dBm)
12	0.293	-137
11	0.537	-134,5
10	0.976	-132
9	1.757	-129
8	3.125	-126
7	5.468	-123

Dadas las diferentes velocidades de datos resultantes de las diferentes combinaciones de SF y ancho de banda, es posible utilizar la adaptación dinámica de la velocidad de datos (Adaptive Data Rate (ADR)). Esto significa que los nodos LoRa más alejados del GW necesitarán un SF superior, lo que resultará en tasas de datos más bajas, más ToA y menos interferencia de señal. Los nodos LoRa más cercanos al GW pueden usar SF más bajos y mejorar las velocidades de datos con un ToA más bajo, lo que reduce el consumo de energía (ver Tabla 2.2.1). Estas funciones permiten crear redes en estrella o estrella múltiples fáciles de administrar [20].

### 2.2.2. Coding Rate (CR)

La tasa de codificación o CR es la relación entre datos no redundantes y todos los datos. En LoRa puede seleccionarse entre 4 opciones: 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8. Este valor especifica que 4 bits de datos se codifican con 5, 6, 7 u 8 bits de transmisión (ver Figura 2.2.2). Cuanto menor sea el CR (más bajo 4/8), más bits de redundancia y mayor ToA, por lo que el paquete tarda más en transmitirse. Esto representa una ventaja porque cada símbolo se vuelve más grande en el tiempo, lo que permite al receptor demodular paquetes con menor potencia de recepción (mejor sensibilidad del receptor). Sin embargo, una tasa de bits lenta produce mayor consumo de batería, porque mientras más tiempo permanezca el sistema en estado de transmisión, mayor es el consumo de batería [21].

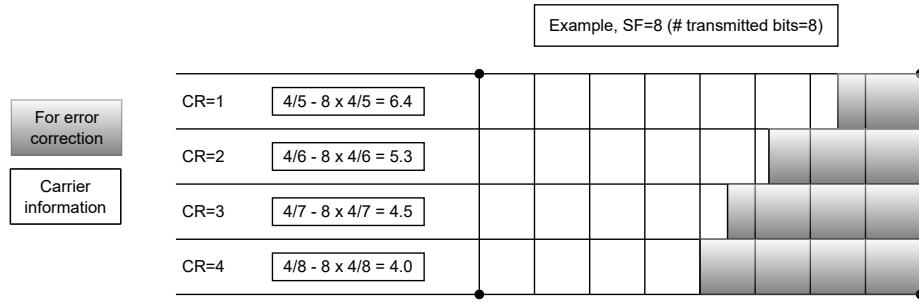


Figura 2.2.2: Ejemplo de CR para 8 bits transmitidos en SF8 [3].

### 2.2.3. LoRa

LoRa es una tecnología inalámbrica que corresponde a la capa física en el modelo de referencia Open Systems Interconnection (OSI), apropiada para conexiones de largas distancias donde se requiere un bajo consumo energético [18]. Trabaja en las bandas Industrial, Scientific and Medical (ISM) de uso libre y según las regulaciones de cada región se utiliza 433, 868 o 915 MHz [22]. LoRa se basa en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), que corresponde a un tipo de modulación de espectro ensanchado. En un sistema Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), la fase de la portadora varía con la secuencia del código, como se muestra en la Figura 2.2.3. El código de propagación (o secuencia de chips) crea una señal con un ancho de banda que excede el ancho de banda de la señal original. En términos de Radio Frecuencia (RF), los chips corresponden a los bits de la secuencia de código. Cuando la señal transmitida llega al receptor, se multiplica por una copia del código de propagación del transmisor, generando una réplica de la señal de datos original [23].

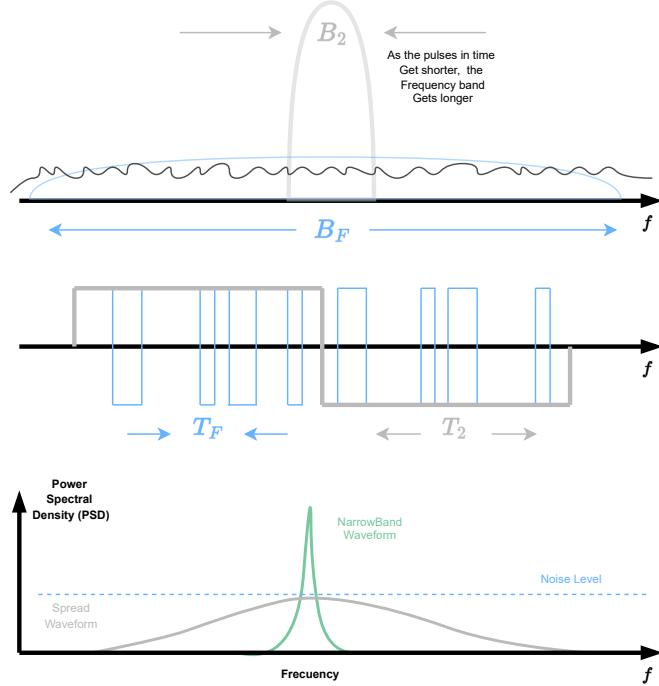


Figura 2.2.3: Sistema DSSS [2].

LoRa tiene una mayor ganancia de procesamiento (Processing gain (Gp)) que la modulación por desplazamiento de frecuencia (Frequency Shift Keying (FSK)), lo que permite reducir el nivel de potencia de

salida del transmisor manteniendo la misma velocidad de datos de la señal.  $G_P$  es la que permite que el receptor recupere la señal de datos original incluso si el canal tiene un SNR (Signal-to-noise ratio (SNR)) en dB y su fórmula se puede observar en (2.1), donde  $R_C$  es igual al *chip rate* (Chips/segundo) y  $R_b$  el *bit rate* (bits/segundo).

$$G_P = 10 * \log_{10} \left( \frac{R_C}{R_b} \right) \quad (2.1)$$

Una de las desventajas del sistema DSSS es que requiere un reloj muy preciso y costoso. La tecnología LoRa CSS proporciona una alternativa confiable y de bajo costo que no requiere un reloj de alta precisión. En la modulación LoRa, el espectro ensanchado de la señal se obtiene generando una señal chirp cuya frecuencia cambia constantemente [23], como se muestra en la Figura 2.2.4.

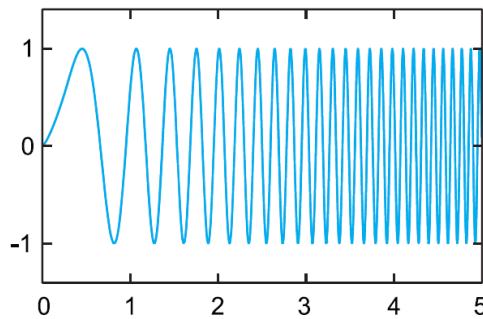


Figura 2.2.4: Señal de LoRa Chirp Spread Spectrum [2].

La tasa de bits en LoRa, que varía entre 300 bps y 37.5 kbps [24], está dada por (2.2).

$$R_b = SF \cdot \frac{\frac{4}{4+CR}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \cdot 1000 \quad (2.2)$$

Donde SF es el factor de propagación, CR es la tasa de codificación y el Bandwidth (BW) es el ancho de banda en kHz. Es evidente en (2.2) que al aumentar el SF, disminuye la velocidad de datos [25]. Mientras más alto sea el SF, mayor es el ToA, el consumo de energía y el alcance de la comunicación. El BW puede ser 125 o 500 kHz (para canales de subida), y 500 kHz (para canales de bajada) [26].

## 2.2.4. LoRaWAN

LoRaWAN corresponde a la capa MAC en el modelo de referencia OSI y se encarga del control del acceso al medio que hace posible la comunicación entre diversos nodos y puertas de enlace (GWs) [25]. La topología de LoRaWAN es tipo estrella y está compuesta por cuatro elementos principales: nodos finales, GWs, servidor de red y servidor de aplicación, como se presenta en la Figura 2.2.5. Los nodos o dispositivos finales se conectan de forma inalámbrica con la red LoRaWAN a través del GW, el cual a su vez se conecta con dichos nodos mediante la modulación RF LoRa. Normalmente se refiere como nodo al dispositivo completo, incluido los sensores. Los sensores típicos de aplicaciones LoRa requieren enviar eventualmente datos con una baja tasa de bits. En cambio, el GW es el encargado de recibir la información de los dispositivos finales a través de enlaces RF y posteriormente reenviar al Servidor de red LoRaWAN (LNS). El GW está asociado con el nodo, pero esta asociación no es fija, es decir; un mismo nodo puede comunicarse con todos los GWs de la red, lo que representa una ventaja, porque la distribución de los GWs puede ser controlada completamente con el objetivo de disminuir la tasa de error. El LNS controla la red y sus parámetros para adaptar el sistema a las condiciones, al mismo tiempo establece conexiones seguras con Advanced Encryption Standard (AES) de 128 bits desde el nodo hasta la aplicación de los usuarios finales garantizando la integridad de cada mensaje. Además, el LNS no puede leer los datos de la aplicación. Finalmente, los datos de las aplicaciones se manejan, administran e interpretan de forma

segura a través de los servidores de aplicación. Estos servidores también generan las cargas útiles de la capa de aplicación de *downlink* a los nodos [23].

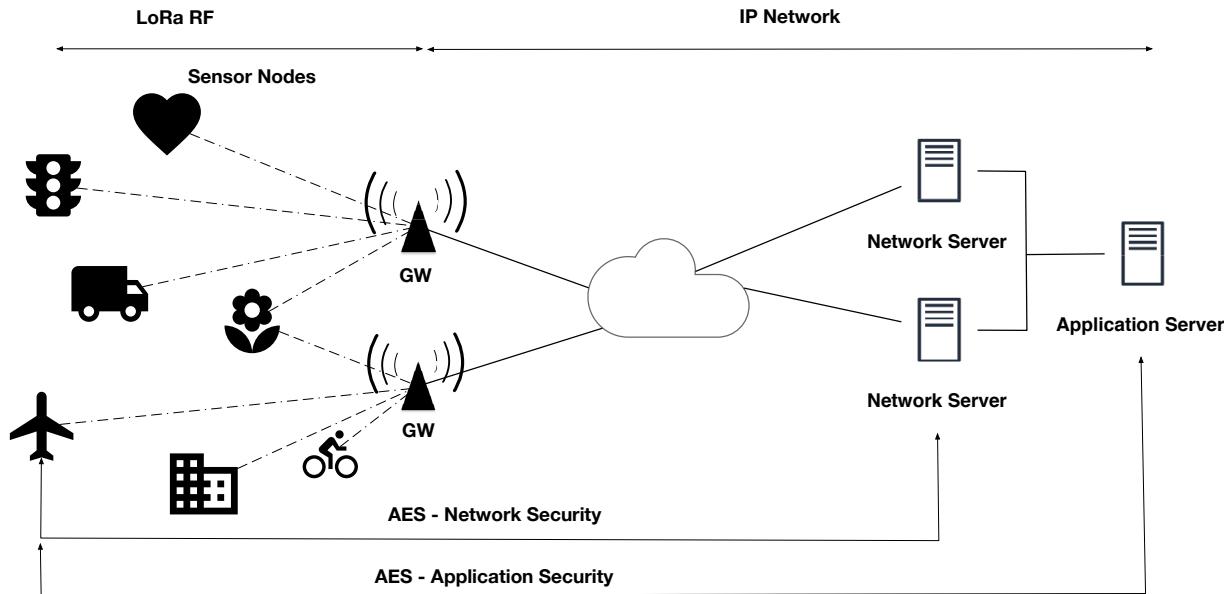


Figura 2.2.5: Arquitectura LoRaWAN [4].

## 2.2.5. Modos de acceso - Red LoRaWAN

Hay dos formas para hacer que un dispositivo final forme parte de una red LoRaWAN. El modo Activation by Personalization (ABP) y el modo Over-the-Air activation (OTAA).

### 2.2.5.1. Activation by Personalization (ABP).

ABP es el modo más simple y tiene los siguientes parámetros:

- 1. DevAddr: Dirección del nodo, es conocido por el nodo final y el servidor.
- 2. NwkSkey: Clave de sesión de red, clave de cifrado entre el nodo final y la red. Utilizado para validar mensajes.
- 3. AppSKey: Clave de cifrado entre el nodo final y la aplicación de red. Se utiliza para cifrar y descifrar la carga útil. Asegurando que solo el usuario conozca el contenido del mensaje.

El nodo final envía datos al GW y verifica que los datos coincidan con la sesión. Si es correcto, los datos son procesados.

### 2.2.5.2. Over-the-Air activation (OTAA).

OTAA es más complejo y tiene los siguientes parámetros:

- 1. DevEui: Identificador de fábrica único para cada dispositivo (*end-device identifier unique*, identificador).
- 2. AppEUI: Una identificación de aplicación única de 64 bits para clasificar los dispositivos por aplicación.
- 3. AppKey: Clave AES de 128 bits. Se comparte entre el nodo terminal y la red. Se utiliza para determinar la clave de sesión.

Cuando el terminal solicita acceso a la red con sus datos de configuración, se abre una ventana de recepción. Después de recibir la solicitud, el GW la envía al servidor de red para verificar que el estado de alta y la clave del nodo final sean correctos. De esta forma se crea una sesión temporal que se envía al terminal a través del GW y de esta forma se puede comenzar a enviar datos a la red [20].

## 2.3. Protocolo MQTT

MQTT es un protocolo de mensajería basado en el patrón de publicación/suscripción abierto, simple y liviano, ideal para entornos con restricciones donde las redes son costosas o los recursos de memoria limitados en los dispositivos. Se implementa sobre TCP-IP (Transmission Control Protocol (TCP)-Internet Protocol (IP)) o sobre otros protocolos de red que proporcionan conexiones ordenadas, sin pérdidas y bidireccionales. Tiene tres cualidades de Quality of Service (QoS) con respecto a la transmisión de los mensajes: se entrega como máximo una vez, al menos una vez o exactamente una vez, por tanto, se garantiza que el mensaje llegue a su destino [27].

### 2.3.1. Arquitectura MQTT Publish/Subscribe

La arquitectura de MQTT se conoce como cliente/servidor y su topología es en estrella, donde el nodo central funciona como servidor y puede gestionar hasta 10.000 clientes. El modelo MQTT está compuesto por 4 elementos principales: clientes, servidores (*brokers*), suscripciones y *topics*.

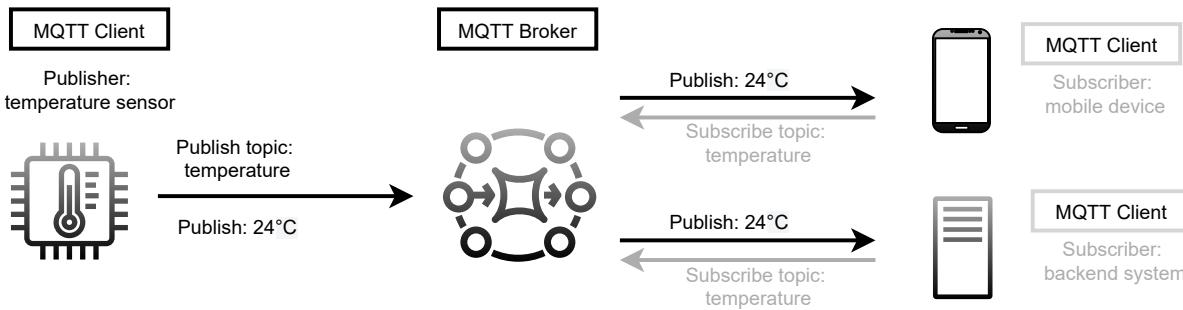


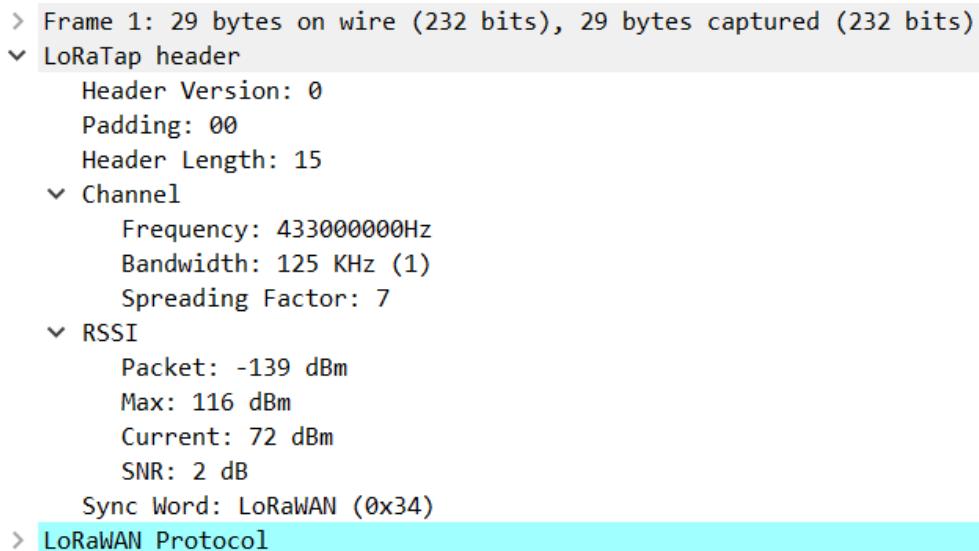
Figura 2.3.1: Arquitectura MQTT Publish/Subscribe [5].

En la Figura 2.3.1 se presenta la arquitectura de MQTT, y a continuación se explica las funciones de sus principales componentes.

- **MQTT cliente.** El cliente puede ser publicador (*publisher*) y/o suscriptor (*subscriber*). Un cliente suscrito a un tema puede publicar o recibir mensajes.
- **Servidor MQTT (*broker*).** Los servidores se encargan de distribuir la información a los clientes sobre los *topics*, basados en sus suscripciones. Además, gestionan los *topics*, es decir, reciben las suscripciones de los clientes sobre los *topics*.
- **Topics.** Los *topics* (o temas) son las colas de mensajes donde los clientes publican y/o se suscriben. Gracias a los *topics*, los clientes pueden intercambiar datos a través de identificadores definidos (temperatura, humedad, etc).
- **Suscripción.** Se refiere a la unión entre un cliente y un tema. El cliente puede intercambiar mensajes con un tema, solo si está suscrito en dicho tema. Las suscripciones son de tipo temporales o duraderas [28].

## 2.4. Wireshark y formato de encapsulación LoRaTap

LoRaTap es el formato de encapsulación que se utiliza para almacenar el tráfico LoRa en archivos pcap, su código fuente puede obtenerse en el siguiente vínculo: [LoRaTap encapsulation](#). El disector para LoRaTap está integrado en Wireshark y se puede encontrar más detalles en el siguiente enlace: [packet-loratap.c](#). Disector se define como un decodificador que le permite a Wireshark comprender cierto protocolo. El tráfico se identifica mediante la *sync word*, una vez que se encuentra tráfico correspondiente a la *sync word*, es posible interpretar la carga útil a través del disector [29]. En el caso de LoRaTap, las tramas LoRa se identifican mediante la *sync word* 0x34, correspondiente a LoRaWAN. En la Figura 2.4.1 se presenta un paquete LoRa capturado en Wireshark, donde se puede observar los detalles del *header* de LoRaTap, por ejemplo, información del canal, del Received Signal Strength Indicator (RSSI), la *sync word*, entre otros.



```
> Frame 1: 29 bytes on wire (232 bits), 29 bytes captured (232 bits)
  ▼ LoRaTap header
    Header Version: 0
    Padding: 00
    Header Length: 15
  ▼ Channel
    Frequency: 4330000000Hz
    Bandwidth: 125 KHz (1)
    Spreading Factor: 7
  ▼ RSSI
    Packet: -139 dBm
    Max: 116 dBm
    Current: 72 dBm
    SNR: 2 dB
  Sync Word: LoRaWAN (0x34)
> LoRaWAN Protocol
```

Figura 2.4.1: Paquete LoRa en Wireshark.

## 2.5. Node-RED

Node-RED es una herramienta visual basada en programación de flujo que permite conectar nodos mediante un navegador web. Esta herramienta consta de nodos que representan funciones básicas como botones o muy complejas, como *brokers* y clientes de MQTT. Node-RED, se basa en las capacidades de código de JavaScript, tales como generar, procesar o alterar los mensajes recibidos en el lado del servidor y realizar funciones más complejas, además de la funcionalidad proporcionada por el módulo. Esto se debe a que Node-RED se basa en Node.js, y Node.js está basado en JavaScript [30] [31].

Una de las características clave de Node-RED es la capacidad de crear flujos muy complejos, por lo que este tipo de herramientas son muy útiles para adquirir, modificar, adaptar y almacenar datos de dispositivos Internet of things (IoT). Además, con Node-RED se puede crear servicios *backend*, es decir; en el servidor, sin necesidad de herramientas especializadas [31].

## 2.6. iPerf

iPerf3 es una herramienta desarrollada por Energy Sciences Network (ESnet)/Lawrence Berkeley National Laboratory, que permite al usuario configurar la conexión entre el servidor y el cliente para medir el ancho de banda máximo alcanzable en las redes IP. Admite la configuración de varios parámetros relacionados con la temporización, los búferes y los protocolos (TCP, User Datagram Protocol (UDP), Stream Control

Transmission Protocol (SCTP) con Internet Protocol version 4 (IPv4) e Internet Protocol version 6 (IPv6)). Para cada ejecución, informa el ancho de banda, las pérdidas, el *delay*, el *jitter* y otros parámetros [32]. Una prueba de conexión entre el cliente y el servidor implica varios pasos durante la comunicación. El proceso se presenta en la Figura 2.6.1.

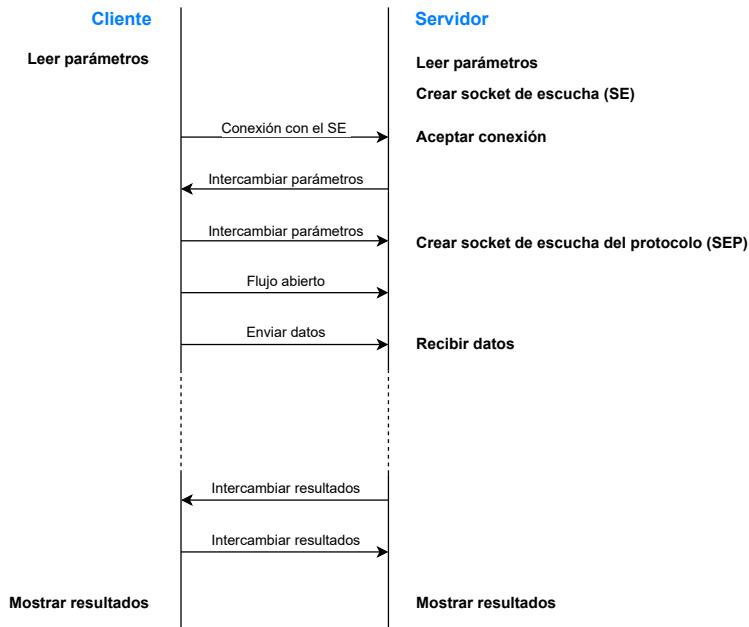


Figura 2.6.1: Diagrama secuencial de la herramienta iPerf.

El proceso se detalla a continuación:

1. El usuario puede configurar el servidor mediante iPerf3 con cualquier parámetro que desee establecer conforme a la documentación, como el puerto que el servidor utilizará para escuchar a los clientes, el ancho de banda y el intervalo de tiempo, entre los más comunes. Luego el servidor crea un *socket* para escuchar a los clientes entrantes, y para enviar y recibir mensajes de control durante la prueba.
2. Del mismo modo que en el servidor, el usuario puede configurar un cliente con los parámetros que requiera llamando a iPerf3. El cliente crea un *socket* que se conectará al *socket* de escucha del servidor, en caso que el servidor esté libre, se acepta la conexión con el cliente.
3. Con el canal de control establecido entre el servidor y el cliente, ellos intercambian parámetros a través de este canal. El servidor se encargará de crear un *socket* de escucha para el protocolo de transporte. El usuario debe especificar el protocolo de transporte, si no lo hace, iPerf3 utiliza el protocolo de transporte predeterminado TCP.
4. Tras el intercambio de parámetros, el cliente intenta establecer que flujos se utilizarán durante la prueba, conectándose al *socket* del protocolo de escucha del servidor.
5. La prueba comienza cuando el servidor acepta todos los flujos especificados por el usuario. El cliente puede enviar datos y el servidor recibir, o viceversa.
6. Tras la finalización de la prueba, el cliente y el servidor pueden intercambiar y ver los resultados [33].

## Capítulo 3

---

### Estado del arte

---

En el presente capítulo se revisan trabajos recientes, disponibles y aplicados en relación con la temática del trabajo de titulación. Primero, se exploran diferentes dispositivos enfocados en la adquisición de datos ambientales durante períodos de tiempo prolongados, enfocándose en el rendimiento energético de los prototipos y el *hardware* utilizado para la captura de variables. En este contexto, es importante analizar tecnologías de comunicación que permitan la transmisión de información captada por sensores y posean propiedades que permitan adaptarse a diferentes escenarios. Por las condiciones del sitio de estudio, el proceso de monitoreo utilizará un sistema de comunicación inalámbrico de bajo consumo, donde una tecnología a destacar es LoRa. Por consiguiente, se realiza un análisis acerca de las características, propiedades y funcionalidades que han sido aprovechadas en otros trabajos. Finalmente, se examina con más detalle cómo los escenarios de estudio intervienen durante la etapa de transmisión inalámbrica, utilizando la tecnología LoRa.

### 3.1. Dispositivos de adquisición de datos ambientales

La medición de variables ambientales mediante el uso de sensores de bajo costo ha mostrado un gran potencial para el monitoreo de datos meteorológicos [34]. Por ejemplo, en [35] y [36], se realiza una comparación de estaciones comerciales versus dispositivos que emplean sensores de bajo costo. Los resultados de los estudios destacan una precisión adecuada de los sensores y la calidad de la información obtenida. En este contexto, los algoritmos de aprendizaje han permitido mejorar la calidad de los datos, por ejemplo, el estudio desarrollado en [37], donde comparan técnicas de *machine learning*, empleando sensores de referencia y de bajo costo. Los resultados indican que los algoritmos no lineales como el *Random Forest* brindan mejores predicciones a partir de datos de referencia que cubren el rango completo de las variables.

En relación al registro de parámetros del agua, estos dispositivos de recolección de datos requieren equipos especiales denominados sondas y, a menudo, son muy costosos [38]. Por consiguiente, es fundamental desarrollar prototipos de recopilación de datos ambientales que ofrezcan mayor accesibilidad para su uso y no se limiten a un fabricante. En este sentido, un prototipo se indica en [39], donde los sensores de bajo costo son del fabricante Atlas Scientific. El funcionamiento del dispositivo se probó en campo durante 45 días junto a un equipo comercial. Los resultados muestran una alta correlación de los datos medidos en ambos equipos, verificando la precisión del prototipo frente a un equipo tradicional, por otra parte, recomiendan mejorar el consumo energético para mediciones por largos períodos de tiempo.

En cuanto a implementación, los dispositivos de registro de datos ambientales se realizan mediante equipos tales como microcontroladores, donde la información medida por los sensores es preprocesada y almacenada internamente sobre la estación también conocida como nodo [40]. Por tanto, el nodo resulta ser la parte más crítica del sistema [41]. Cuando los nodos se usan en lugares remotos el suministro de energía viene dado por baterías, en este contexto existen varios trabajos que han logrado incrementar el tiempo de duración de las baterías por varios años [42][43]. Dicho incremento es posible mediante microcontroladores (MCU) de bajo consumo energético, por ejemplo, dispositivos de la familia Atmel y sus modelos P (*Pico-Power*), los cuales ofrecen opciones avanzadas de ahorro de energía. Generalmente, el

bajo consumo se logra usando diversas técnicas como apagar componentes internos, no usar el Analog-to-Digital Converter (ADC), cambiar a diferentes modos de operación, no usar puertos de entrada o salida, entre otros.

Algunos desafíos adicionales de implementación se relacionan con un muestreo apropiado considerando, por ejemplo, la resolución del ADC. Otro aspecto a destacar es la confiabilidad de los equipos, los mismos que están sometidos a distintas condiciones ambientales por un tiempo prolongado [44].

### 3.2. Tecnología LoRa para monitoreo ambiental

El monitoreo de los ecosistemas hídricos es muy costoso en términos de recursos cuando estos sitios están ubicados en lugares remotos y se debe acceder manualmente para la adquisición de datos [45]. Una solución es utilizar tecnologías de comunicación inalámbrica, que pueden determinarse según el lugar de trabajo, la condición física, la disponibilidad de comunicación y las fuentes de energía [46]. En este contexto, una tecnología de transmisión adecuada sería LoRa/LoRaWAN. Su principal ventaja es la capacidad de largo alcance. LoRa/LoRaWAN define un protocolo de comunicación y arquitectura que admite comunicación bidireccional de bajo costo, móvil y segura, además está optimizado para un bajo consumo de energía y diseñado para escalar fácilmente [20]. Esta tecnología es cada vez más utilizada en diferentes aplicaciones y se adapta a diversos escenarios. Por ejemplo, en [47] se destaca la importancia de las ventajas de LoRa en cuanto a la cobertura y rendimiento energético, lo cual facilita su adaptación a sitios poco caracterizados, como los de alta montaña y glaciares, permitiendo abrir nuevos campos de investigación de estas zonas.

En relación al uso de LoRa en los entornos urbanos en [48], utilizan la tecnología LoRa para la comunicación continua de datos sobre la calidad del agua desde estaciones remotas, alcanzando distancias de hasta 4 km, además indican que esta tecnología es adecuada para zonas donde no existe cobertura de la red móvil, por ejemplo, zonas forestales y de montaña. Esta característica también se menciona en [49], donde se desarrolló una red de monitoreo llamada WaterNet en Ciudad del Cabo, que determina un índice de calidad del agua a partir de datos medidos *in situ*. Los datos se recopilaron en tiempo real utilizando tecnologías de largo alcance y bajo consumo (LPWAN) basadas en LoRa.

Por otra parte, para sitios remotos donde no hay acceso a la red eléctrica, el recurso energético de las baterías resulta crucial para su funcionamiento, como se discute en [50], estudio donde se realiza un monitoreo de aguas subterráneas, donde los nodos registran las variables y los transmiten a un GW LoRa, en este estudio logran 8 días de independencia energética, transmitiendo dos veces al día. En relación a la capacidad de la red, los autores recomiendan utilizar un GW con una cantidad de canales mayor para dar soporte a más nodos. Otros métodos aumentan los recursos energéticos de los nodos mediante una combinación de fuentes energéticas, por ejemplo, solar e hidroeléctrica, como se presenta en [51], que proporciona hasta 432 horas de autonomía a sus nodos.

En relación a la implementación, un enfoque es adaptar la etapa de transmisión a registradores comerciales, un ejemplo se indica en [52], estudio donde construyeron un sistema de monitoreo de datos ambientales incorporando la tecnología de transmisión LoRa, los nodos están formados por sensores y equipos comerciales para el registro de datos. Su objetivo fue adaptar todos los sensores y registradores a un solo dispositivo que pueda recibir la información empleando diferentes protocolos y realizar la transmisión de los datos mediante LoRa. Los resultados muestran la factibilidad de agregar nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica para la transmisión de variables en equipos tradicionales. Otro enfoque es diseñar prototipos para variables específicas y realizar su transmisión usando LoRa, como el trabajo desarrollado en [53], su estudio tuvo como objetivo diseñar un nodo para registrar datos de un sensor pluviométrico y transmitirlos a un GW LoRaWAN. En su diseño verifican la factibilidad de emplear módulos LoRa de bajo costo que ya incorporan la etapa de RF, disminuyendo el tiempo de desarrollo y pruebas del prototipo.

En cuanto a Ecuador, se han desarrollado prototipos de estaciones para registrar el nivel de agua y lluvia utilizando tecnologías basadas en LoRa/LoRaWAN, donde las principales fuentes de energía son el uso de paneles solares, como se reporta en [54] [55]. Para estas estaciones, una autonomía de más de 30 días ha sido demostrada en [56], donde las estaciones fueron instaladas en los páramos andinos y a pesar de las condiciones ambientales hostiles de estos sitios, los resultados obtenidos motivan el uso de LoRa/LoRaWAN como arquitectura de red.

### 3.3. Parámetros de transmisión con LoRa

El factor de mayor consumo energético en los nodos LoRa viene dado por la etapa de transmisión. En [57] indican que es esencial la selección de parámetros de transmisión adecuados, caso contrario la vida útil del nodo es más corta. En este sentido, el aumento de potencia para la transmisión de paquetes afecta drásticamente el consumo energético como se reporta en [58], donde su estudio se enfoca solo en el resto de parámetros para mejorar la comunicación, también mencionan necesario una evaluación en relación a los parámetros ambientales para mejorar el comportamiento de la red. En este contexto, el uso de SF bajos permitiría mejorar el rendimiento energético. Un estudio realizado en [59] recomienda usar valores de SF bajos (alta tasa de datos) y una potencia de transmisión alta únicamente para los nodos que se encuentran lejos del GW.

Otro enfoque se describe en [60], donde se evalúan diferentes longitudes de *payload* y los parámetros de capa física para reducir el ToA, los autores recomiendan dejar el BW fijo y solo enfocarse en el SF y CR, por otra parte, indican que es necesario disminuir el *payload*. En este sentido, en [61] señalan la importancia de reducir la cantidad de bits a transmitir, concluyen que se puede enviar únicamente las diferencias entre valores consecutivos, cuando no existe un cambio significativo en las variables. En este contexto, se propone un protocolo de compresión de datos en [62], el estudio se realiza con variables del clima. El protocolo desarrollado aprovecha el cambio lento de este tipo de variables para comprimir los datos. Para la verificación de su protocolo usan los módulos LoPy en la banda 915 MHz con LoRa, los resultados indican una disminución del *payload* significativo frente al protocolo CayenneLPP, permitiendo reducir los tiempos de transmisión y por tanto optimizando el consumo de las baterías.

En lo que respecta a escenarios de montaña, en [63], se presenta una evaluación de parámetros LoRa, los autores muestran que la potencia de transmisión de radio no es un parámetro dominante que afecte a la red, en cambio el BW, el SF y el CR juegan un papel más relevante, además indican que las altas temperaturas degradan la cobertura en la red de forma similar a las tecnologías Narrowband (NB), e indican la necesidad de adaptar la comunicación LoRa en función a variables ambientales como viento, lluvia, etc, durante períodos prolongados. En estos escenarios de montaña, se han alcanzado coberturas de 3 km como se reporta en [64], donde evalúan la tecnología LoRa usando tres tasas de datos en la banda de 433 MHz, con una potencia de transmisión de 20 dBm, destacando que la línea de vista es un factor relevante para esta tecnología de transmisión. Cuando los nodos no poseen línea de vista, el rango de cobertura disminuye significativamente, en [65] realizan un estudio para determinar el comportamiento de LoRa en cultivos ubicados en sitios de montaña andinos a 2910 m.s.n.m empleando nodos basados en ESP32. Los resultados indican que SF9 alcanza el mejor *throughput* con un Packet Data Rate (PDR) superior al 76 %, trabajando en la banda de 915 MHz, en cuanto a su cobertura, alcanzó los 875 m.

Por otra parte, el análisis de LoRa en entornos de ríos se presenta en [66] donde evalúan diferentes parámetros de comunicación a fin de construir un sistema contra inundaciones. Su estudio se enfoca en el análisis de LoRa en términos de RSSI, SNR y consumo energético, además evalúan la altura de las antenas en relación a la zona de Fresnel y su efecto en la cobertura. Sus resultados señalan que el alcance máximo para su escenario se logra con una altura del GW a 4 m y los nodos a 2 m, también señalan la importancia de la altura seleccionada en sitios cercanos a ríos, para lograr la mejor cobertura en aplicaciones de alerta temprana. Otras evaluaciones se enfocan únicamente en el SF, como en [67] donde evalúan escenarios cercanos a ríos en la parte urbana, semi-urbana y rural para determinar la cobertura máxima a partir de modelos de propagación. La altura para el GW y el nodo fue de 2 m y el único parámetro que cambia es el SF, desde 7 a 10. Los resultados evidencian una cobertura máxima de 1.6 km usando SF10 y 1.5 km con SF7, en relación al RSSI, su comportamiento es similar para SF7 y SF10. En este sentido, escenarios de mayor dificultad para LoRa se analizan en [68], su estudio se centra en ambientes de bosques densos para determinar el comportamiento de LoRa en la banda de 433 MHz y 868 MHz, con una potencia de transmisión de 10.4 dBm y en este caso se emplean como parámetros el SF, CR y la longitud del *payload*. Mediante las pruebas realizadas, determinan que el PDR empeora al aumentar el *payload*. En relación a la cobertura, indican un rango máximo de 860 m usando SF12, además la banda de 433 MHz mostró mejor comportamiento en todas las pruebas realizadas. Por otra parte, al trabajar en la banda de 915 MHz con LoRa, su cobertura disminuye, por ejemplo, en [69] realizan un estudio para evaluar el PDR, RSSI y SNR de LoRa en zonas de bosques, suburbanas y urbanas,

usando nodos basados en Arduino. Los resultados indican una cobertura máxima de 250 m en bosques densos cuando los nodos son estáticos, por otra parte, al incrementar la velocidad de los nodos existe mayor variabilidad en la calidad del enlace de comunicación, los autores concluyen que la estabilidad de la señal LoRa depende en gran medida del entorno y es más estable en zonas suburbanas que en zonas urbanas.

En este contexto, se observa que el uso de LoRa para transmisión de datos ambientales es totalmente viable, y permite una adaptación a diferentes entornos gracias a su variedad de propiedades que pueden ser configuradas de acuerdo a los requerimientos de la aplicación. En esta tesis se plantea el desarrollo de un prototipo para adquisición de variables fisicoquímicas en lagunas de los páramos alto andinos al sur del Ecuador empleando la tecnología de transmisión LoRa. Con tal objetivo se lleva a cabo una caracterización de la tecnología LoRa en dichos escenarios. Por otra parte, para la medición de las variables se usan sensores de bajo costo y los datos obtenidos se comparan con equipos comerciales.

## Capítulo 4

### Arquitectura de monitorización

En esta sección se explican las diferentes etapas que conforman el desarrollo del sistema de monitoreo usando la tecnología de comunicación de bajo consumo LoRa. Estas etapas dan lugar a una arquitectura de funcionamiento a diferentes niveles, cada una de ellas enfocadas en permitir el transporte de los datos recolectados en campo, desde su captura por sensores hasta ser presentada al usuario final. En este sentido, se utilizan diferentes tecnologías para la implementación del *hardware* y *software* que será necesario para el funcionamiento óptimo de la red. En relación al sistema de transmisión, se escogieron varios puntos para determinar el comportamiento de la red en zonas rurales y de páramo.

#### 4.1. Metodología

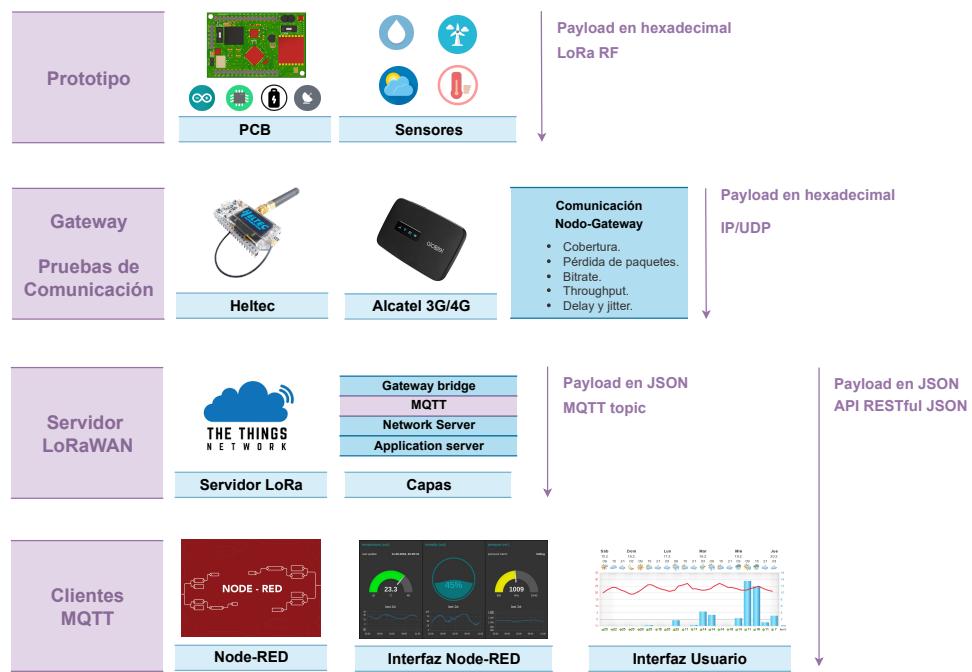


Figura 4.1.1: Diagrama funcional de sistema.

Para el desarrollo del trabajo, en la Figura 4.1.1 se propone una metodología que comprende cuatro etapas esquematizadas, donde se presenta un diagrama funcional que resume la metodología a emplear para el desarrollo del trabajo de titulación. En primer lugar, se realiza la implementación del nodo prototípico, para ello se analizaron diseños *open source* enfocados en monitoreo ambiental, con la finalidad de

implementar una configuración adecuada para los componentes del prototipo [53][70]. El diseño está integrado principalmente por un MCU, un transceptor y sensores enfocados en variables fisicoquímicas del agua. Para comprender mejor el desempeño del prototipo, se evalúan los recursos de *hardware*, *software* y energéticos, durante la captura de los datos ambientales. Además, se recolectan datos correspondientes a variables comunes en sondas multiparamétricas como: pH, ORP, DO y temperatura. Tanto el dispositivo como el módulo LoRa están integrados en una PCB. En cuanto a los sensores, están ubicados en el nodo dependiendo de su función. Por otra parte, considerando que será expuesto a la intemperie, su construcción tolera distintas condiciones ambientales como frío o calor extremo, lluvia, humedad, entre otros. En tal sentido, se adoptó la normativa IP65 que brinda un alto grado de protección en la armadura [71].

Posteriormente, en la segunda etapa se realiza la implementación del dispositivo GW, para el cual se emplea la tecnología LoRa de Heltec, específicamente el modelo ESP32 Wi-Fi LoRa 32 (V2.1). Con el propósito de evaluar el comportamiento de la red, se realizó un conjunto de experimentos entre el nodo y el GW (ver Sección 4.3), que involucran parámetros como: cobertura, pérdida de paquetes, *bit rate*, *throughput*, *delay*, *jitter* y consumo energético. Dichos parámetros de red fueron evaluados en una zona rural y en el alto páramo, a fin de caracterizar el comportamiento general de la arquitectura y posteriormente definir la mejor configuración para establecer el suministro de energía de la estación y estabilidad en la comunicación.

En la tercera fase, se configura un servidor LoRa, para lo cual se empleó la plataforma TTN, que ofrece componentes para redes LoRaWAN. En cuanto a la captura de datos en Node-RED, correspondiente a la cuarta etapa, se utilizó el protocolo MQTT con el propósito de comunicarse con TTN [72], estos datos se presentan al administrador a través de una interfaz gráfica en conjunto con una aplicación web cliente.

## 4.2. Desarrollo del hardware

El *hardware* desarrollado consiste en un dispositivo de adquisición de datos ambientales que se elaboró utilizando una unidad de procesamiento adecuada para estos escenarios como el ATmega1284P, la unidad de transmisión está formada por un módulo LoRa en la frecuencia de 433 MHz, además se incorpora un módulo Real Time Clock (RTC) DS3231 y un sensor de corriente. Mediante el diseño de una PCB se integraron todos los componentes del dispositivo y diferentes sensores para medir variables fisicoquímicas en las lagunas del sitio de estudio.

### 4.2.1. Diseño y construcción de la placa de circuito impreso

A continuación, se describe el proceso desarrollado para el diseño y construcción de la placa de circuito impreso para el nodo.

#### 4.2.1.1. Diagrama esquemático

En la Figura 4.2.1 se presenta un diagrama de bloques del prototipo desarrollado, donde se muestran las partes que conforman el prototipo. En la parte central se empleó el MCU ATmega1284P, que realiza el procesamiento y control de los módulos, sensores y datos. Para la comunicación con el módulo LoRa y la memoria micro SD se utilizó el protocolo Serial Peripheral Interface (SPI). Por otra parte, para el control del RTC y el sensor de corriente se usó el protocolo Inter-Integrated Circuit (I2C). En cuanto al sensor de temperatura, su lectura se realizó mediante una entrada digital. En relación a los sensores de pH, DO y ORP, sus datos se registraron a través de los pines analógicos. La herramienta que se utilizó para el diseño del circuito fue el *software* Kicad, donde se elaboró el esquemático con las conexiones de los componentes. Para cargar los programas al MCU se dispuso del puerto SPI. Por otra parte, el puerto serial TX0 y RX0 se empleó para visualizar los datos y realizar pruebas de funcionamiento. En el apéndice B se presenta el diagrama esquemático del diseño PCB realizado.

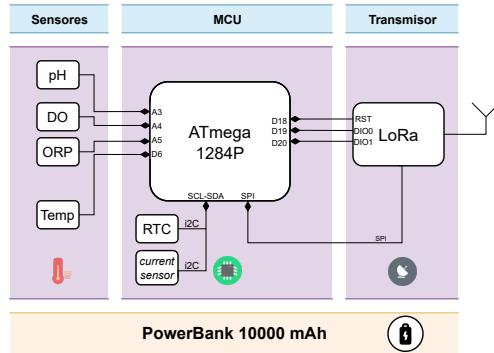
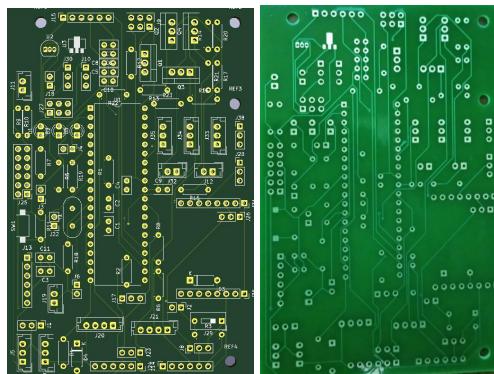


Figura 4.2.1: Diagrama de bloques del prototipo.

#### 4.2.1.2. Características del PCB

El diseño del circuito impreso se dimensionó para acoplarse a la caja IP65, las dimensiones finales de la PCB fueron 19x11 cm. Debido a que la mayoría de señales a emplear en el circuito son digitales, el espesor de las pistas fueron 0.25 mm y las de alimentación 0.3 mm. El microcontrolador es el elemento principal al que se conectan el resto de componentes, en este sentido se ubicó en la parte central del PCB, de esta manera se logra reducir la longitud de las pistas y en consecuencia los efectos parásitos producidos por el material conductor. En la Figura 4.2.2 se indica la parte superior del diseño.



(a) Diseño 2D del PCB (b) PCB impresa vista vista superior. superior.

Figura 4.2.2: Vista superior PCB

#### 4.2.2. Descripción de los equipos

En esta sección se describen los equipos utilizados para el control de las funciones básicas del nodo.

##### 4.2.2.1. Microcontrolador ATmega1284P

El microcontrolador elegido es el ATmega1284P desarrollado por la empresa MICROCHIP, el cual se caracteriza principalmente por sus propiedades de bajo consumo energético, adecuado para dispositivos remotos con fuente de energía limitada. Posee varios niveles de consumo que pueden ser configurados mediante *software*, los cuales funcionan a diferentes niveles de voltaje y frecuencia, equilibrando su velocidad de procesamiento y rendimiento energético. La configuración del MCU se realiza mediante librerías *open source* disponibles en la plataforma Arduino, lo cual permite adaptar diferentes módulos fácilmente al prototipo a través de interfaces I2C y SPI. Además, cabe resaltar que el microcontrolador ATmega1824P,

incluye un puerto Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) para realizar procesos de depuración. Para el diseño, se escogió el encapsulado que se observa en la Figura 4.2.3, para permitir la extracción del MCU y poder realizar actualizaciones software fácilmente intercambiando de chip.



Figura 4.2.3: MCU ATmega1284P [6].

#### 4.2.2.2. Transceptor LoRa Ra-02

En la Figura 4.2.4 se indica el módulo LoRa RA-02 elegido para la etapa de transmisión. Este módulo funciona en la banda de 433 MHz y admite niveles de voltaje entre 1.8 V a 3.3 V, similares al ATmega1284P. Incorpora el chip LoRa SX1278 y la parte de radiofrecuencia viene ya instalada internamente brindando facilidad para ser acoplado al MCU. En relación al consumo energético, su fabricante indica que varía entre 10 mA a 240 mA de acuerdo a los estados de funcionamiento, además posee una sensibilidad de -18 dBm y su amplificador de potencia se puede configurar desde 0 dBm hasta 20 dBm.

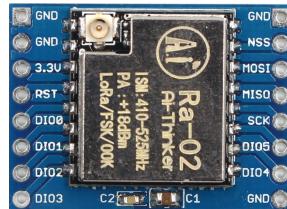


Figura 4.2.4: Módulo LoRa RA-02 [7].

#### 4.2.2.3. Reloj en tiempo real DS3231

Para obtener la marca temporal se optó por un reloj en tiempo real (RTC), caracterizado por tener un oscilador de cristal interno que contabiliza el paso del tiempo. En este sentido, con el registro del tiempo, cada variable capturada por los sensores tiene una marca temporal. En la Figura 4.2.5 se indica el módulo seleccionado RTC DS3231, el cual viene en un encapsulado para ser conectado fácilmente. Este módulo incorpora un bus I2C para su comunicación, los voltajes de funcionamiento van desde 2.7 V a 5 V. Además, incluye una memoria AT24C32N disponible para el usuario. Adicionalmente, el RTC DS3231 posee propiedades de bajo consumo energético e incorpora la opción de alimentación con baterías CR2032, necesarias para mantener el registro del tiempo cuando el reloj pasa a etapas de bajo consumo.

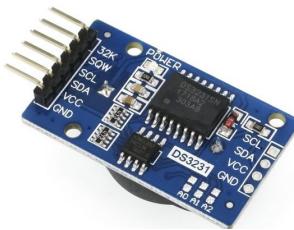


Figura 4.2.5: RTC DS3231 [8].

#### 4.2.3. Adquisición de datos y sensores

El prototipo necesita de sensores para medir las variables fisicoquímicas del agua, además serán instalados por un tiempo prolongado, por tanto, los sensores seleccionados deben ser adecuados para este escenario. En relación a los datos de temperatura, se optó por un sensor digital y los demás parámetros se miden con sensores analógicos de bajo costo.

##### 4.2.3.1. Temperatura

Para esta variable se utiliza el sensor DS18B20 [73] del fabricante Dallas Semiconductor. Dicho sensor incorpora un ADC interno de 12 bits y puede medir temperaturas en el rango de -55 °C a 125 °C con una precisión de  $\pm 0.5$  °C. La señal que provee este sensor es digital y su lectura se realiza empleando un bus 1-Wire, enviando comandos al sensor. En cuanto a su voltaje de alimentación, requiere un voltaje de 3 V a 5.5 V con un consumo energético de 1 mA. En la Figura 4.2.6 se indica el encapsulado que posee el sensor para ser colocado directamente en líquidos.



Figura 4.2.6: Sensor de temperatura DS18B20 [9].

##### 4.2.3.2. Potencial de hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno (pH) es un indicador de la actividad de los iones de hidrógeno en el agua, estos iones son importantes en el equilibrio y la cinética de las reacciones químicas en ambientes acuáticos [74]. Para adquirir esta variable se utilizó el sensor analógico Gravity Analog pH [75] del fabricante Atlas Scientific, su encapsulado se muestra en la Figura 4.2.7, además trabaja con voltajes de alimentación entre 3.3 V y 5 V con un consumo de 3 mA. En cuanto al rango de medición, varía entre 0.1 a 14 con una precisión de  $\pm 0.2$ . El fabricante indica que ha sido probado durante largos períodos de tiempo y requiere una recalibración después de 3 meses.



Figura 4.2.7: Sensor del potencial de hidrógeno [10].

##### 4.2.3.3. Potencial de Oxidación-Reducción (ORP)

El potencial de óxido-reducción (ORP) es una medida de la capacidad de un ambiente acuoso para oxidar o reducir productos químicos [74]. Esta variable es medida usando el sensor analógico Gravity Analog

ORP [76] del fabricante Atlas Scientific, (ver Figura 4.2.8 ). El fabricante indica que el sensor trabaja con voltajes de 3.3 V y 5 V, con un consumo energético de 3 mA. Además, cuenta con una precisión de  $\pm 1$  trabajando en el rango desde -1500 mV a +1500 mV. Por otra parte, el fabricante señala que este equipo ha sido probado por tiempos prolongados sin inconvenientes y debe ser recalibrado después de 3 meses.



Figura 4.2.8: Sensor del potencial de óxido-reducción [10].

#### 4.2.3.4. Oxígeno disuelto (DO)

El nivel de oxígeno disuelto (DO) es muy importante para la calidad del agua, ya que es esencial para la respiración aeróbica, además las concentraciones excesivas de oxígeno disuelto en el agua pueden provocar traumatismo por burbujas a los animales acuáticos [77]. Este parámetro se adquiere mediante el sensor analógico Gravity Analog DO [78] del fabricante Atlas Scientific (ver Figura 4.2.9). Acorde al fabricante el voltaje de funcionamiento es de 3.3 V y 5 V, generando un consumo energético de 0.3 mA. Además, posee una precisión de  $\pm 2$  trabajando en el rango de 0-700 % de saturación. Adicionalmente, el fabricante indica que dicho sensor ha sido probado durante largos períodos de tiempo y requiere una recalibración después de 6 meses.



Figura 4.2.9: Sensor de oxígeno disuelto [10].

#### 4.2.4. Nivel de corriente

En relación al nivel de consumo energético del dispositivo y comportamiento del mismo se empleó un sensor de corriente INA219 [79]. Este dispositivo usa el protocolo I2C para reportar las mediciones, además el nivel máximo de corriente que puede medir es de 3.2 A, con una resolución de  $\pm 0.8$  mA. En relación a su encapsulado (ver Figura 4.2.10), permite ser adaptado fácilmente a otras placas. Adicionalmente, trabaja con un ADC interno de 12 bits para realizar las mediciones. En cuanto a su nivel de voltaje requerido, es compatible con 3.3 V y 5 V.

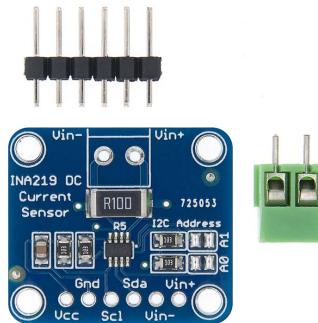


Figura 4.2.10: Sensor de corriente INA219.

Después de agregar los componentes, el resultado final se observa en la Figura 4.2.11. En relación a su envoltura, se utilizó la protección IP65 para reunir todos los componentes y facilitar el manejo del prototipo.

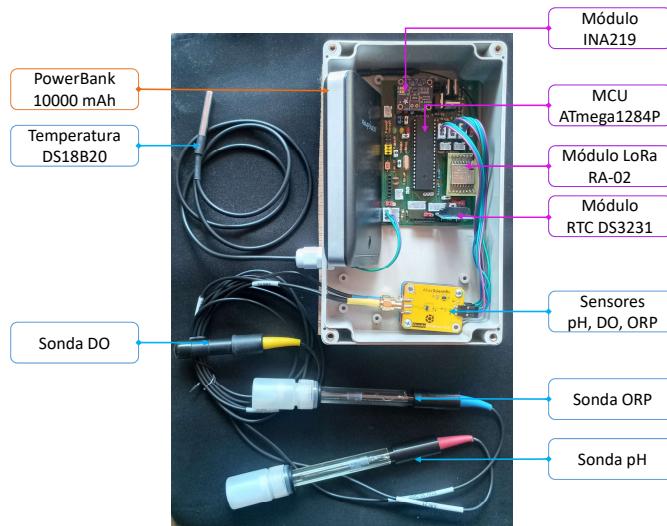


Figura 4.2.11: Diseño del prototipo y sus componentes.

#### 4.2.5. Gestión y control de energía

La fuente de energía es un *PowerBank* de 10000 mAh, la cual brinda alimentación a los distintos componentes del prototipo. Por otra parte, dado que el prototipo se enciende cada cierto tiempo para transmitir las variables, la mayoría del tiempo deberá pasar a un modo de bajo consumo, durante esta etapa se consideraron los siguientes criterios para aumentar el rendimiento energético:

- Apagar los módulos y sensores que no requieran permanecer encendidos.
- Apagar los puertos ADC del microcontrolador.
- Utilizar los modos de funcionamiento *sleep* de los sensores, módulos, o dispositivos que tengan esta característica.

En relación al control de energía, se usó el sensor de corriente INA219 para tener un registro del consumo de corriente del nodo, con esta información se monitorea el comportamiento del dispositivo en relación a la corriente consumida.

#### 4.2.6. Descripción del Gateway



Figura 4.2.12: Equipo Wi-Fi LoRa 32 (V2.1).

Para la implementación del *Gateway*, se utilizó el dispositivo Wi-Fi LoRa 32 (V2.1) desarrollado por Heltec Automation. Este modelo está basado en el ESP32 y el chip LoRa SX1278, además es capaz de comunicarse en la banda de 433 MHz, aunque también dispone versiones en 863-870 y 902-928 MHz. Con este equipo, el desarrollo de aplicaciones enfocadas a IoT se facilita, gracias a su característica de bajo consumo y la incorporación de la etapa de RF.

Con respecto a sus características técnicas, la máxima potencia de salida LoRa es de  $19 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dBm}$ , en su modo *deep sleep* el consumo es de aproximadamente  $800 \mu\text{A}$  y puede trabajar a una temperatura que varía entre  $-40$  y  $80^\circ\text{C}$ . En relación al suministro de energía, puede ser máximo de  $6 \text{ V}$  y mínimo de  $2.7 \text{ V}$ , dependiendo del método o condición que se elija [80].

### 4.3. Desarrollo de software

#### 4.3.1. Captura del tráfico LoRa y presentación en Wireshark

Para capturar el tráfico se empleó la librería LoRa.h (disponible en [LoRa - Arduino Reference](#)), adecuada para enviar y recibir datos a través de interfaces de radio LoRa, puesto que es compatible con Arduino. El nodo y el GW forman parte del escenario de captura, tanto el nodo como el GW funcionan con las librerías LoRa, RTC, SD y ArduinoJSON. En relación a los datos, se recopilan en las tarjetas micro SD de ambos dispositivos y se encapsulan en formato JavaScript Object Notation (JSON), que tiene como parámetros:

- *Payload* (Carga útil)
- Tiempo
- Potencia de la señal radio recibida (RSSI)
- Frecuencia
- Factor de dispersión (SF)
- Ancho de banda (BW)
- Tasa de código (CR)

Gracias al RTC disponible tanto en el nodo como el GW, se logra la sincronización y por tanto el análisis de variables de los paquetes capturados, como retrasos, paquetes perdidos, entre otros. El proceso de captura está diseñado para cambiar los parámetros LoRa cada cierto intervalo de tiempo. El correcto desarrollo del experimento para caracterizar la red requiere que, tanto el GW como el nodo, operen bajo la misma configuración durante el mismo intervalo de transmisión, es decir; los parámetros LoRa de ambos equipos deben cambiar al mismo tiempo. Por ello se ha definido que los parámetros cambien en función del tiempo proporcionado por el RTC. De esta forma se garantiza que los resultados sean confiables.

Por otra parte, para usar la herramienta Wireshark, es necesario encapsular estos archivos JSON en un formato pcap. En vista de ello, la encapsulación se realizó mediante un *software* desarrollado en C

disponible en el repositorio [lora-3lagunas](#), el mismo que se encarga de convertir los archivos JSON en pcap a través de la librería LoRaTap. De esta manera se generan correctamente los archivos pcap compatibles con Wireshark. Una vez obtenidos los pcap de cada intervalo de captura, el disector de Wireshark puede analizar el protocolo LoRa, lo que permite aprovechar las herramientas disponibles en Wireshark para obtener resultados más precisos del estado de la comunicación entre el GW y el nodo LoRa.

#### 4.3.1.1. Explicación del código que genera las combinaciones.

En primer lugar, se definen los vectores con los parámetros LoRa que se analizarán en el experimento, en este caso un vector para los valores del factor de dispersión y otro para la tasa de codificación.

```
1 int sf_array[] = {7, 8, 9, 10, 11, 12};
2 int cr_array[] = {5, 6, 7, 8};
```

A continuación, se define la matriz final, formada por la combinación de elementos de los vectores creados en el paso anterior.

```
1 int final_array[filas][columnas];
```

La matriz final es el resultado de la ejecución de un *for loop* en el *setup* (código de inicio) que recorre cada elemento de los vectores.

```
1 for (int i = 0; i < size_sf_array; i++) {
2     for (int j = 0; j < size_cr_array; j++) {
3         final_array[contador_array][0] = sf_array[i];
4         final_array[contador_array][1] = cr_array[j];
5         contador_array++;
6     }
7 }
```

Adicionalmente se crea un archivo que registra todos los avisos en la SD, para detectar si ha ocurrido algún error durante el proceso.

```
1 File logfile = SD.open(logname, FILE_APPEND);
2 if (!logfile)
3 {
4     Serial.println("X Error al crear log en SD");
5     return;
6 }
```

En particular, se propone cambiar el índice del arreglo cada vez que ocurre un cambio de minuto en el RTC, luego se compara el minuto de la última transmisión con el minuto actual y, si difieren, se selecciona el siguiente elemento del arreglo mediante un contador, el mismo que se reinicia al transmitir en la configuración de la última combinación.

#### 4.3.2. Descripción software del nodo

Para que la estación funcione correctamente se necesita de un programa capaz de manejar adecuadamente el *hardware* (sensores, transceptor, reloj en tiempo real, etc). Este programa se ejecuta dentro del ATmega1284P de forma continua. Otro aspecto a tomar en cuenta es que, el dispositivo estará instalado en lugares remotos y su acceso será muy limitado, en este sentido el programa debe garantizar el funcionamiento de la estación, manejando los errores que puedan ocurrir. De esta forma se brinda autonomía a la estación y se ahorra gastos debido al traslado de personal al sitio. En este contexto, existen muchos programas *open source* disponibles enfocados al monitoreo de parámetros ambientales y tomando en cuenta los requerimientos del prototipo, se eligió como base el programa desarrollado en [70] (disponible en [Cave Pearl Data Logger](#)). A partir de este programa, se logró establecer un esquema de funcionamiento que cubre las tareas principales de lectura y transmisión de datos, monitorizando el estado de la batería y disminuyendo el consumo energético. En la Figura 4.3.1 se indica todas las etapas del programa, en la primera etapa se realiza la configuración de variables, revisión del nivel de batería, activación de módulos, sensores y el transceptor LoRa. A continuación, en la segunda etapa se realiza la lectura de los sensores cuando se recibe la señal de lectura desde el RTC. Dicha señal de interrupción, se usa para indicar cuando el nodo debe despertar y realizar las operaciones del programa (despertar, adquirir datos,

transmitir, dormir). En relación a la tercera etapa, se revisa que el nivel de batería se mantenga mayor al umbral de 3.0 V, cuando sea menor a dicho umbral el nodo se apaga completamente con la finalidad de proteger los módulos, en otro caso avanza a la etapa de transmisión.

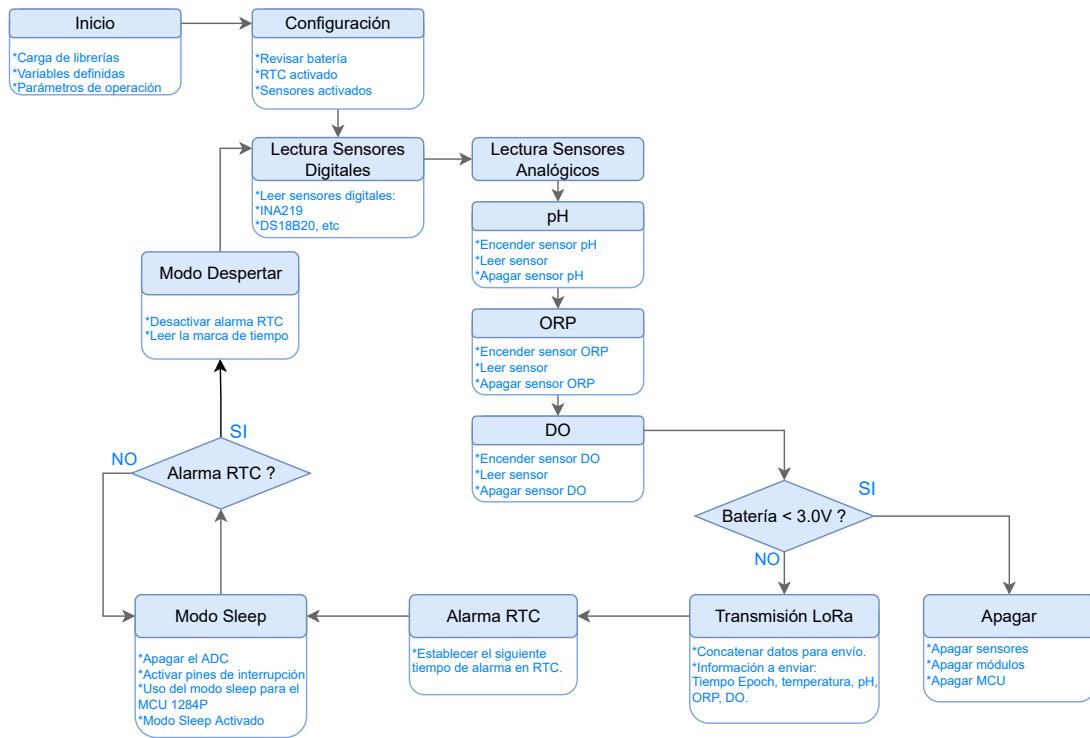


Figura 4.3.1: Diagrama de flujo del programa de la estación.

En cuanto a la cuarta etapa, el nodo realiza la transmisión de los datos empleando LoRa. Este proceso se realizó mediante la librería [CayenneLPP](#), que permite comprimir los datos para transmisiones de bajo consumo, cada variable se asigna a un canal de acuerdo al requerimiento de la variable, los datos se concatenan en este orden: tiempo, temperatura, corriente, pH, ORP y DO, como se indica en la figura 4.3.2. A continuación, se establece el siguiente tiempo de alarma del RTC (15 minutos). Finalmente se llega al estado de bajo consumo energético o modo *sleep*, permaneciendo en este estado hasta que ocurra una interrupción desde el RTC, que despierta al MCU para un nuevo ciclo de muestreo.

### 4.3.3. Estructura de la trama

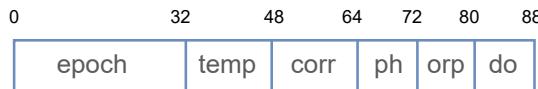


Figura 4.3.2: Estructura de la trama de datos.

En relación a la trama física, esta formada como se indica en la Figura 4.3.2. La marca temporal (epoch) tiene el formato Unix y ocupa 32 bits. Para la variable de temperatura (temp) se usan 16 bits para enviar los decimales y números negativos. En relación a la variable de corriente (corr) se emplean 16 bits. Para las variables de pH, ORP y DO se usan 8 bits para cada una, debido a que son datos analógicos y sus valores no sobrepasan el valor de 255. En relación al intervalo de envío, se estableció en 15 minutos, debido a que los valores no presentan cambios significativos.

#### 4.3.4. Sistema de monitoreo Node-RED

El esquema de la Figura 4.3.3 representa las partes que conforman la plataforma de monitoreo implementada en Node-RED, básicamente su diseño se enfoca en la presentación de los datos y un manejo fácil para el usuario.

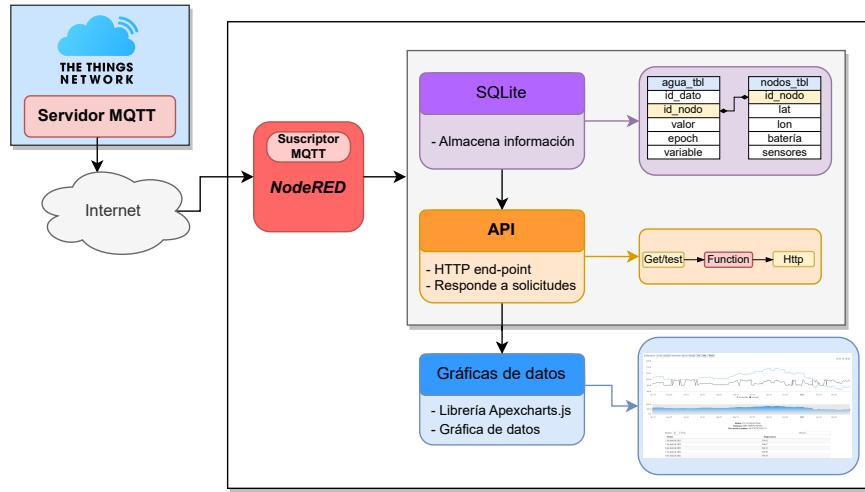


Figura 4.3.3: Esquema del sistema de monitoreo en Node-RED.

El diseño de la Figura 4.3.3 cumple las funciones de recibir los datos de la estación, almacenamiento de forma local en una base de datos y visualización de la información. Mediante el protocolo MQTT se envía la información de la estación desde TTN a Node-RED, los datos recibidos contienen cada una de las variables ambientales transmitidas. En Node-RED se configura los nodos para enlazar MQTT a TTN con las credenciales respectivas, en la Figura 4.3.4 se muestra la configuración realizada. En cuanto a la interfaz en esta plataforma, se puede acceder a través del siguiente enlace [Node-Red](#)<sup>1</sup>.

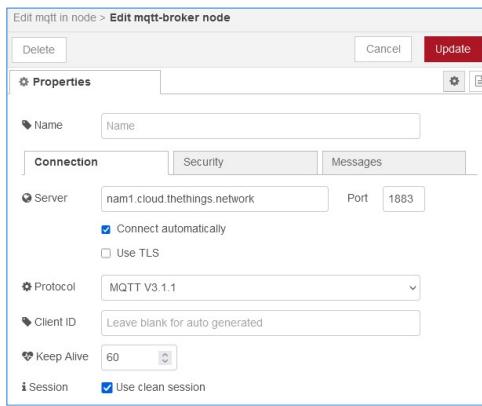


Figura 4.3.4: Configuración suscriptor MQTT en Node-RED.

Para el almacenamiento de los datos se utiliza la base de datos SQLite, en donde se crea una tabla con los campos básicos para la información de la estación. En Node-RED se utilizan los nodos para la conexión con SQLite y se realizan las consultas a la base de datos, en la Figura 4.3.5 se indica esta configuración.

<sup>1</sup><https://node-red-jzfeh-2021-06-28.mybluemix.net/ui/#/0?socketid=G0Y1WCBKm6nDy83AAC>



Figura 4.3.5: Configuración para almacenamiento de datos con SQLite.



Figura 4.3.6: Presentación de datos en la interfaz web.

Para la visualización de la información se dispone una interfaz gráfica web creada utilizando la librería APEXCHART.JS como se observa en la Figura 4.3.6. Los datos se obtienen directamente desde Node-RED a través de una API implementada con los nodos de red (*network*): *http in* y *http response*. Por objetivos de la aplicación, únicamente se ha implementado el método *GET*. La información es procesada en la página web mediante el lenguaje de programación JavaScript y se muestra en una interfaz interactiva que ha sido temporalmente alojada en el siguiente enlace [sistema de monitoreo](#), donde se puede filtrar los datos fácilmente de las diferentes variables y exportarlos como un archivo Excel.

#### 4.3.5. Descripción del software del gateway

En una red LoRaWAN, un *Gateway* es un dispositivo que recibe datos transmitidos por un nodo final y luego reenvía los paquetes a un servidor de red. Para la conexión con el servidor TTN se utilizó un *packet forwarder* de un canal compatible con el procesador ESP32 del módulo Heltec. El objetivo del *forwarder* es enviar la información de los nodos hacia el servidor LoRaWAN, este proceso se realiza mediante el protocolo UDP a través del puerto 1700. Para este proceso se escogió un programa *open source* disponible en [Single Channel LoRaWAN Gateway](https://github.com/things4u/ESP-1ch-Gateway)<sup>2</sup>.

### 4.4. Área de estudio

El complejo de humedales andinos Tres Lagunas está ubicado en el sur del Ecuador entre los cantones de Saraguro, Oña y Yacuambi. Sus coordenadas son -3.58466 latitud y -79.07071 longitud y está a más de 3300 m.s.n.m, en la Figura 4.4.1 se aprecia su ubicación [81].

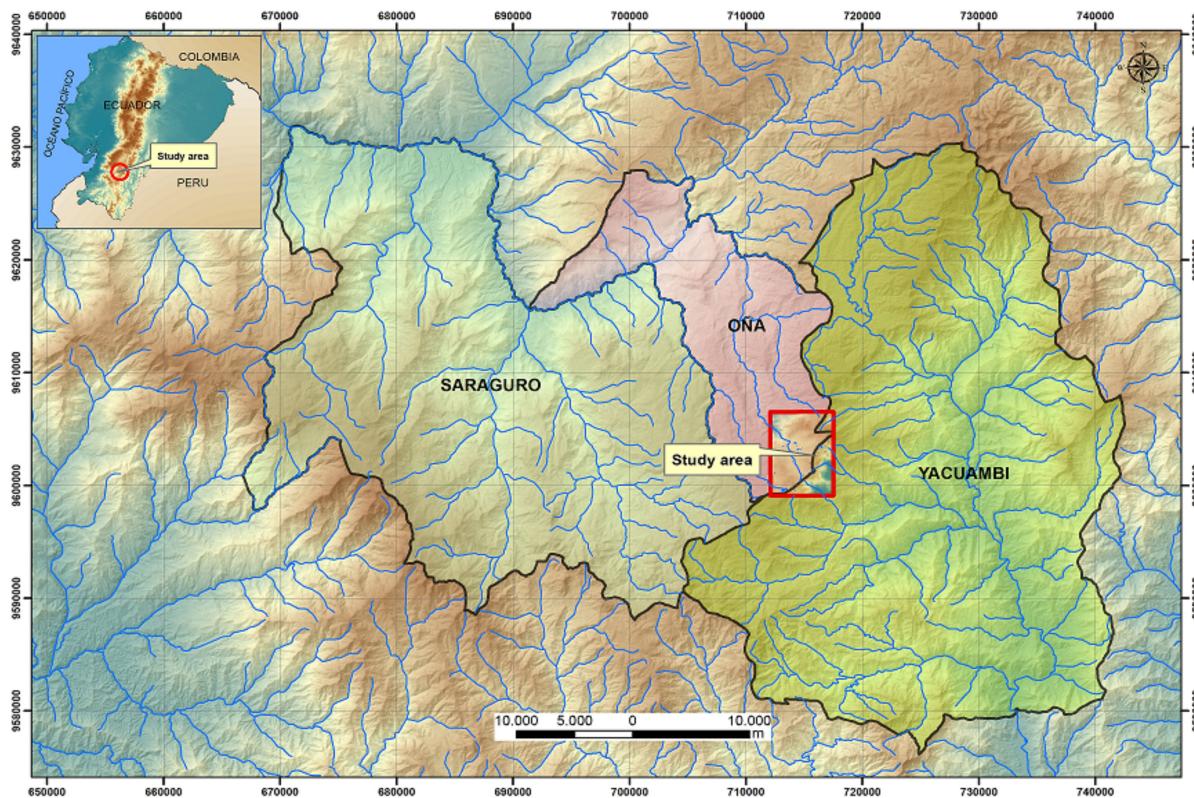


Figura 4.4.1: Ubicación del sistema de humedales Tres Lagunas al sur del Ecuador.

Condorshillu (6.3 ha), Tres Lagunas (8.5 ha) y Laguna Grande (12 ha) son las tres lagunas más grandes que conforman el sistema lacustre Tres Lagunas. Este ecosistema contiene alrededor de 75 lagunas de agua dulce de poca profundidad, donde nacen los ríos de la cordillera amazónica (con dirección al océano Pacífico) y de la cordillera andina (con dirección al océano Atlántico) [81].

Además, en este ecosistema de páramo se identificaron 24 especies de bofedales. Los bofedales son humedales que suelen estar ubicados a más de 3300 m.s.n.m, además están constituidos por suelo orgánico, agua y flora adaptada. Se asemeja a grandes esponjas que almacenan y filtran poco a poco el agua de la lluvia a las lagunas, caudales y quebradas aledañas [82].

<sup>2</sup><https://github.com/things4u/ESP-1ch-Gateway>

#### 4.4.1. Escenario y ubicación del nodo-Gateway

Se realizaron múltiples experimentos para definir la ubicación del GW, considerando parámetros de conectividad móvil y línea de vista con los nodos. Finalmente, se localizó en las coordenadas -3.575806 latitud y -79.075807 longitud, este lugar está ubicado en la montaña de la Figura 4.4.2, que se encuentra a aproximadamente 3350 m.s.n.m.



Figura 4.4.2: Ubicación del GW en el sistema de humedales Tres Lagunas.

Como se observa en la Figura 4.4.3, el punto se encuentra a una distancia de 1.5 km de la vía, por lo tanto, existe menos peligro que terceras personas puedan manipular los equipos.



Figura 4.4.3: Ubicación del GW visto en Google Earth.

La zona cuenta con cobertura móvil Third-Generation (3G), según el mapa de cobertura de un operador de telefonía celular local que se presenta en la Figura 4.4.4.

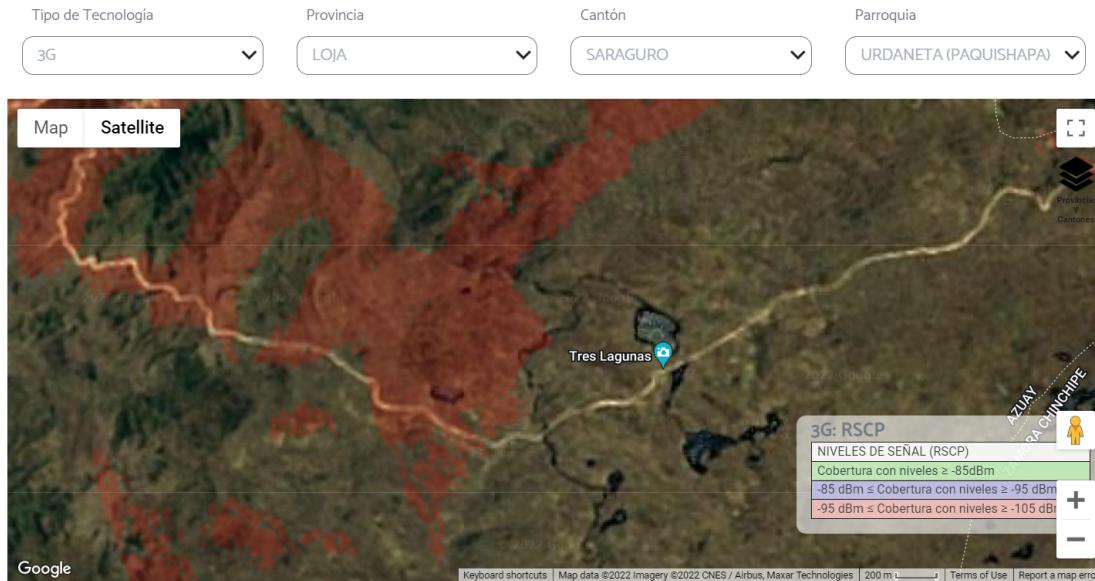


Figura 4.4.4: Mapa de cobertura de la operadora Tuenti/Movistar en Tres Lagunas.

Se analizaron otras operadoras como se indica en las Figuras 4.4.5 y 4.4.6, donde se observa que estas no proporcionan cobertura en el sitio elegido para la ubicación del GW.

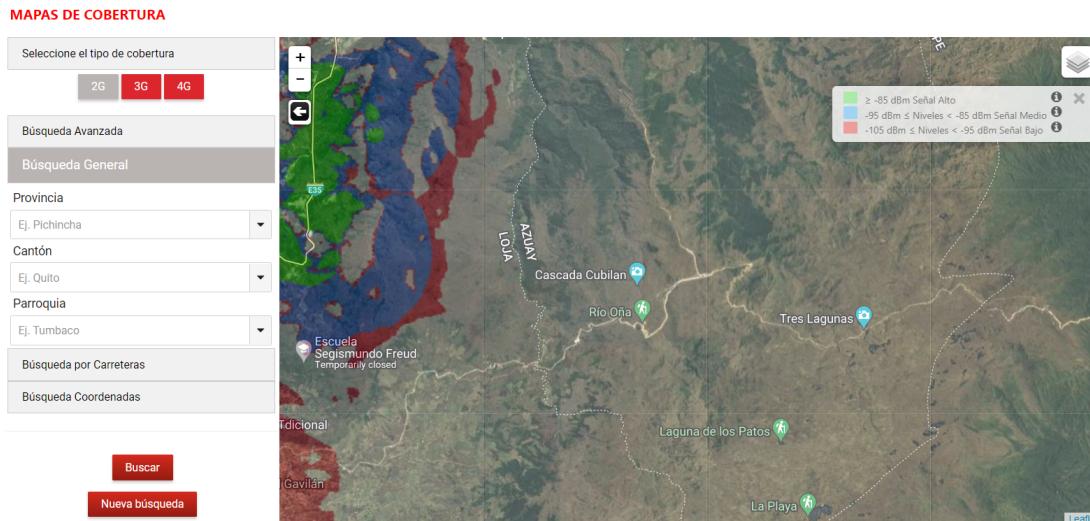


Figura 4.4.5: Mapa de cobertura de la operadora Claro en Tres Lagunas.

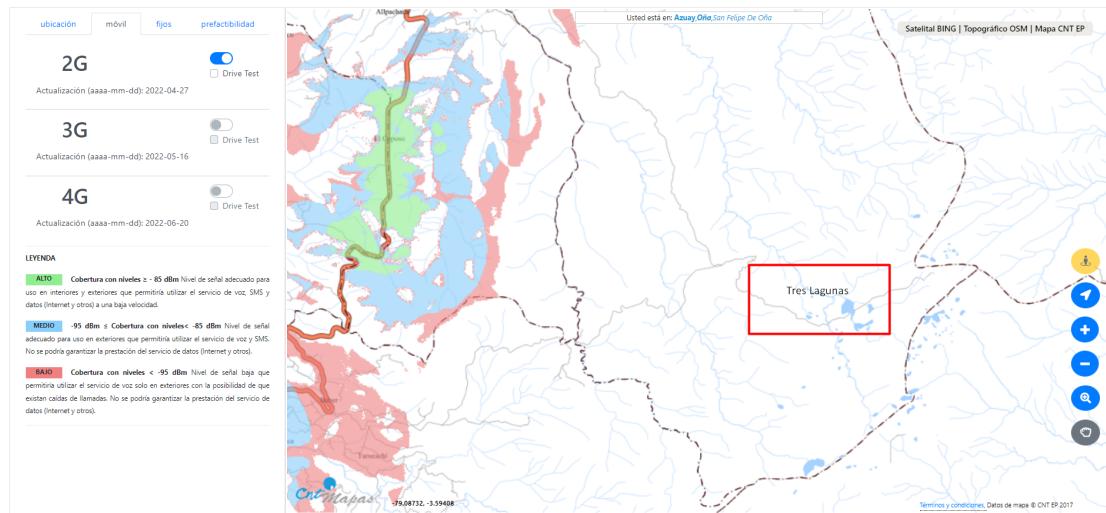


Figura 4.4.6: Mapa de cobertura de la operadora CNT en Tres Lagunas.

Con el objetivo de determinar si realmente existe cobertura móvil en el sector para el GW, se procedió a realizar pruebas y experimentos utilizando las herramientas de Iperf. Para el análisis se desarrolló un *software* en Bash, diseñado para obtener el *bit rate* real que proporciona cada una de las operadoras (disponible en el repositorio [Iperf-3lagunas](#)). Los resultados de estas pruebas se indican en la Figura 4.4.7, donde *bit rate* Tx y el Rx son el generado y recibido respectivamente, además se graficaron sus intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad. En relación a la operadora Movistar/Tuenti, el ancho de banda máximo fue aproximadamente de 8 Mbps y para Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT) 3 Mbps. Con estos datos, se observa claramente un ancho de banda suficiente para los requerimientos de una red LoRaWAN. En cambio, para la operadora Claro, no se pudo realizar las pruebas de red debido a la falta de cobertura.

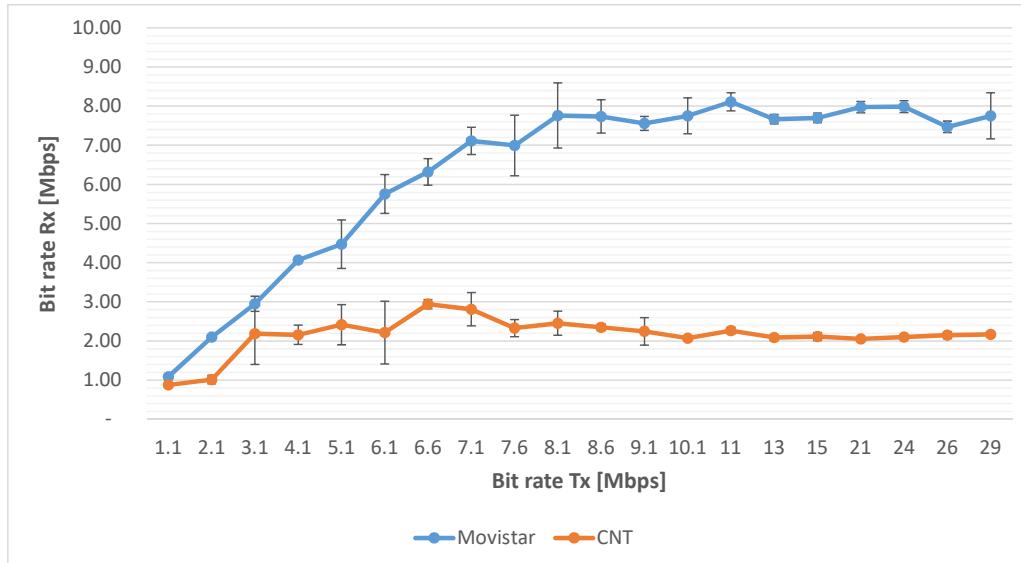


Figura 4.4.7: Análisis del bit rate de uplink para las operadoras Movistar y CNT.

En cuanto al nodo, se han propuesto dos posibles ubicaciones, procurando que estos puntos estén próximos a las lagunas de interés. En este sentido, se han seleccionado las dos lagunas situadas más cerca de la vía y que se verían mayormente afectadas por la circulación vehicular, dichas ubicaciones del nodo

se presentan en la Figura 4.4.8.

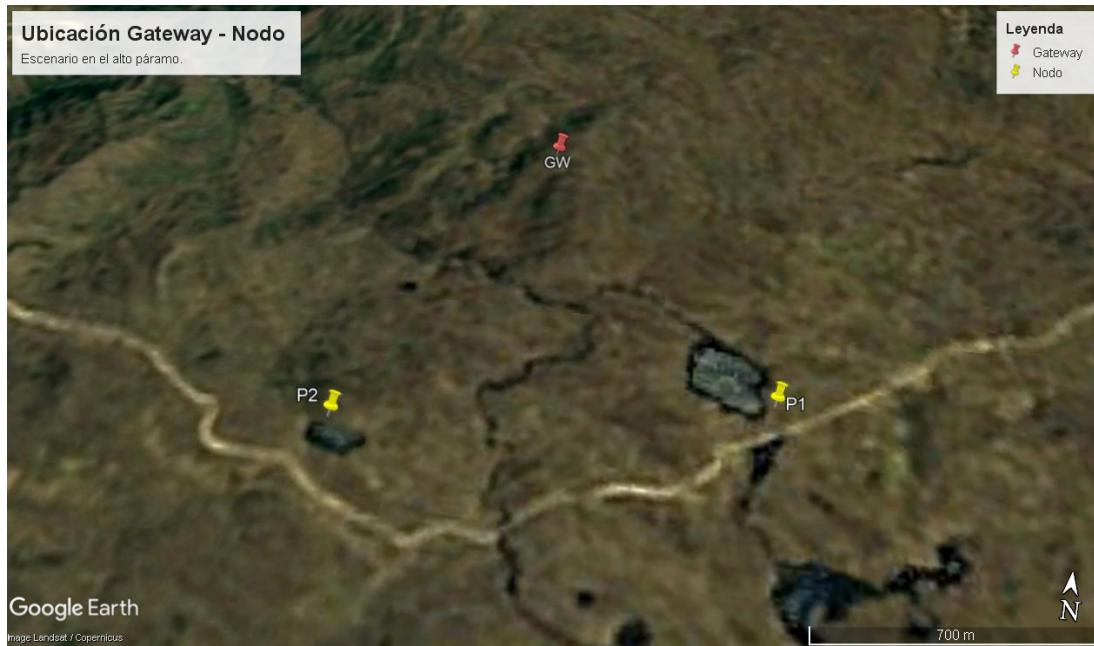


Figura 4.4.8: Posibles lagunas del sistema permanente.

## 4.5. LoRa en diferentes escenarios

A continuación se presenta la descripción de los escenarios de estudio y la metodología de los experimentos a seguir, con el objetivo de caracterizar el comportamiento del prototipo y la red. Además, se tomó como primer escenario referencial un entorno rural, debido a las dificultades de acceso a la zona de páramo.

### 4.5.1. Entorno rural

La decisión de poner a prueba el prototipo en una zona rural, surgió de la necesidad de determinar cuál es el comportamiento del equipo desarrollado con respecto a cobertura, procesamiento, cambios climáticos y demás factores que ayuden evaluar si su funcionamiento es adecuado. La zona elegida fue la parroquia de Urdaneta, ubicada en el norte de Saraguro. Urdaneta se encuentra aproximadamente a 30 km de distancia de Tres Lagunas con una altitud de alrededor de 2490 m.s.n.m, es decir; una diferencia cercana a los 810 m entre la zona rural y la zona del páramo, sin embargo, Urdaneta facilita las pruebas de campo y permite llevar a cabo los experimentos en distintas condiciones. Para evitar interferencias significativas de multicamino, se decide ubicar el nodo en la terraza de una casa de 3 plantas al extremo del centro de Urdaneta, en cambio el GW cambiará su ubicación a lo largo del barrio Cañaro, dependiendo del experimento. Las ubicaciones del nodo y el GW se muestran en la Figura 4.5.1. Los 4 puntos se encuentran a distancias y entornos distintos, intentando tener una colección de datos lo más amplia posible y de esta forma verificar que tan robusto es el prototipo ante diferentes condiciones.



Figura 4.5.1: Ubicación del GW y distribución del nodo en el entorno rural.

Durante los experimentos se variaron 2 parámetros de LoRa: el factor de ensanchamiento (SF) y la tasa de código (CR). Con el objetivo de obtener gráficas más confiables que involucren intervalos de confianza, en cada punto de prueba se repite 3 veces la misma combinación. Los parámetros que se combinaron por cada iteración son los siguientes:

- **Frecuencia:** 433 MHz
- **SF:** 7, 8, 9, 10, 11, 12
- **BW:** 125 kHz
- **CR:** 5, 6, 7, 8

El resultado de las combinaciones y experimentos genera un total de 3 colecciones de datos por cada combinación en cada punto. Por ejemplo, el primer punto obtiene 3 grupos de  $n$  paquetes ( $n$  depende del intervalo de transmisión y del SF) con la combinación: Frecuencia = 433 MHz, SF = 7, BW = 125 kHz y CR = 5.

#### 4.5.2. Alto páramo

Los experimentos realizados en el área de Tres Lagunas son comparables a los del entorno rural. En este caso el GW estará ubicado en la zona más alta del sector (ver Figura 4.4.8), que corresponde a la elevación de la Figura 4.4.2. Este lugar también fue elegido para la ubicación permanente del GW LoRaWAN. Como se indica en la Figura 4.4.8, el nodo se ubicó en puntos estratégicos cercanos a las lagunas, con el objetivo de obtener datos similares al sistema permanente a implementar. La combinación de parámetros, intervalos de tiempo y el número de muestras son las mismas que en las zonas rurales, pero con menos puntos de muestra debido a las dificultades de acceso y condiciones climáticas de este sector.

## Capítulo 5

---

### Resultados

---

En el presente capítulo se analizan los resultados de los experimentos desarrollados. Se examina el comportamiento del nodo ante distintas condiciones climáticas, distancias y configuraciones de los parámetros SF y CR tanto en la zona rural como en el alto páramo, el análisis se enfocó en las métricas de Packet Reception Rate (PRR), *throughput/bit rate*, RSSI, *delay* y *jitter*. En concreto, se obtuvieron 3 conjuntos de muestras para cada combinación de los valores SF y CR en los cuatro puntos de la zona rural, es decir; existe un total de 12 conjuntos de muestras para la combinación sf7cr5 y para cada una de las demás combinaciones. Por otra parte, en el alto páramo se realizaron los experimentos en 2 puntos, generando en total 6 conjuntos de muestras por combinación. En relación a la gestión de energía, se presenta el estudio del consumo energético para diferentes parámetros de LoRa, a fin de determinar el comportamiento general del nodo. Adicionalmente, se realizó una comparación de los datos obtenidos por los sensores del prototipo frente a un equipo comercial. Finalmente se comprobó el correcto funcionamiento del prototipo en el sitio de estudio.

#### 5.1. Análisis de los datos LoRa en diferentes escenarios

En esta sección se determinó el comportamiento del sistema LoRa en los dos escenarios: rural y alto páramo. En cada punto de la zona rural se tomaron muestras de cada combinación en intervalos de 1 minuto con tres repeticiones, se asigna además un *delay* de 500 ms por código para cada transmisión. Aunque teóricamente se envían 2 paquetes por segundo, no obstante la ejecución del código retrasa el tiempo previsto y sobre todo el comando `LoRa.endPacket()` que espera a que se complete la transmisión del paquete LoRa [83], el cual varía dependiendo de la combinación de SF y CR seleccionada. Por lo tanto, la cantidad de paquetes también varía para cada combinación. Las primeras pruebas de la zona rural muestran que el *jitter* no se puede determinar con exactitud debido a la precisión del RTC, por lo que en el alto páramo se decidió aumentar el *delay* en el código a 1000 ms.

#### 5.2. Zona rural

Con respecto al entorno en la zona rural, se observaron muchos arbustos y árboles altos entre el nodo y el GW, sin embargo; no interfieren directamente en la línea de vista. Los experimentos se realizaron en los 4 puntos anteriormente planteados. A continuación, se detallan sus ubicaciones.

##### 5.2.1. Punto 1 - Zona rural

La ubicación del primer punto y la colocación del GW se presentan en la Figura 5.2.1.



(a) GW en el primer punto.

(b) Ubicación del primer punto.

Figura 5.2.1: GW en el primer punto de la zona rural.

Este punto se encuentra a más de 500 m de distancia del nodo, como se observa en el perfil de elevación de la Figura 5.2.2. Durante la captura no hubo cambios drásticos en el clima, el GW se mantuvo la mayoría del tiempo en un ambiente soleado y en ocasiones con el cielo nublado. Con respecto a la línea de vista con el nodo, no hay ninguna interferencia considerable.



Figura 5.2.2: Perfil de elevación del primer punto de la zona rural.

## 5.2.2. Punto 2 - Zona rural

La ubicación del segundo punto y la colocación del GW se presentan en la Figura 5.2.3.



(a) GW en el segundo punto.

(b) Ubicación del segundo punto.

Figura 5.2.3: GW en el segundo punto de la zona rural.

Este punto se encuentra a más de 1 km de distancia del nodo, como se observa en el perfil de elevación de la Figura 5.2.4. Durante la captura el clima se mantuvo soleado y estable en su mayoría, únicamente los últimos dos minutos del experimento se presentó un poco de lluvia. La línea de vista con el nodo no tiene ninguna interferencia visible considerable.



Figura 5.2.4: Perfil de elevación del segundo punto de la zona rural.

### 5.2.3. Punto 3 - Zona rural

La ubicación del tercer punto y la colocación del GW se presentan en la Figura 5.2.5.



(a) GW en el tercer punto.

(b) Ubicación del tercer punto.

Figura 5.2.5: GW en el tercer punto de la zona rural.

El punto 3 se encuentra a más de 1.7 km de distancia del nodo, como se observa en el perfil de elevación de la Figura 5.2.6. Durante la captura el clima fue variable, entre soleado, nublado y lluvioso, pero en su mayoría soleado. Este punto sería el más afectado con respecto a la línea de vista, ya que tiene pequeñas interferencias debido a las ramas de los árboles.

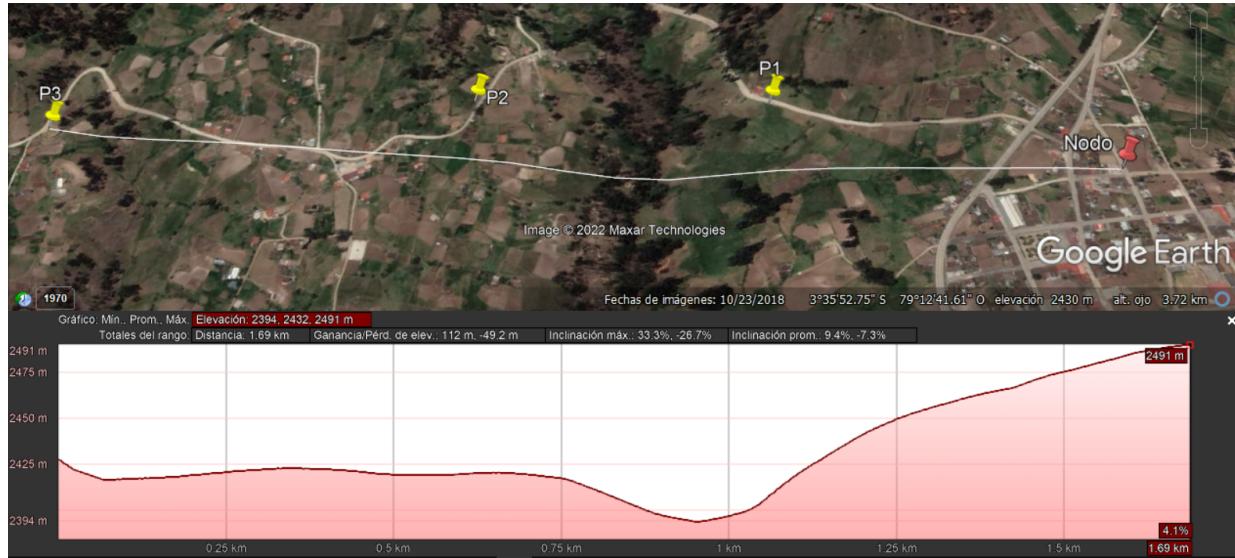


Figura 5.2.6: Perfil de elevación del tercer punto de la zona rural.

## 5.2.4. Punto 4 - Zona rural

La ubicación del cuarto punto y la colocación del GW se presentan en la Figura 5.2.7.



(a) GW en el cuarto punto.

(b) Ubicación del cuarto punto.

Figura 5.2.7: GW en el cuarto punto de la zona rural.

Este punto se encuentra a más de 2.2 km de distancia del nodo, como se observa en el perfil de elevación de la Figura 5.2.8. Durante la captura el clima fue variable entre nublado y lluvioso, la captura de datos tiene una duración de 72 min y durante los 16 primeros minutos el clima fue lluvioso, el tiempo restante el clima se mantuvo nublado. Con respecto a la línea de vista, es totalmente limpia y no tiene ningún tipo de interferencias. Además es el único punto donde, tanto el nodo como el GW, se encuentran aproximadamente a la misma altura, como se observa en la Figura 5.2.8.

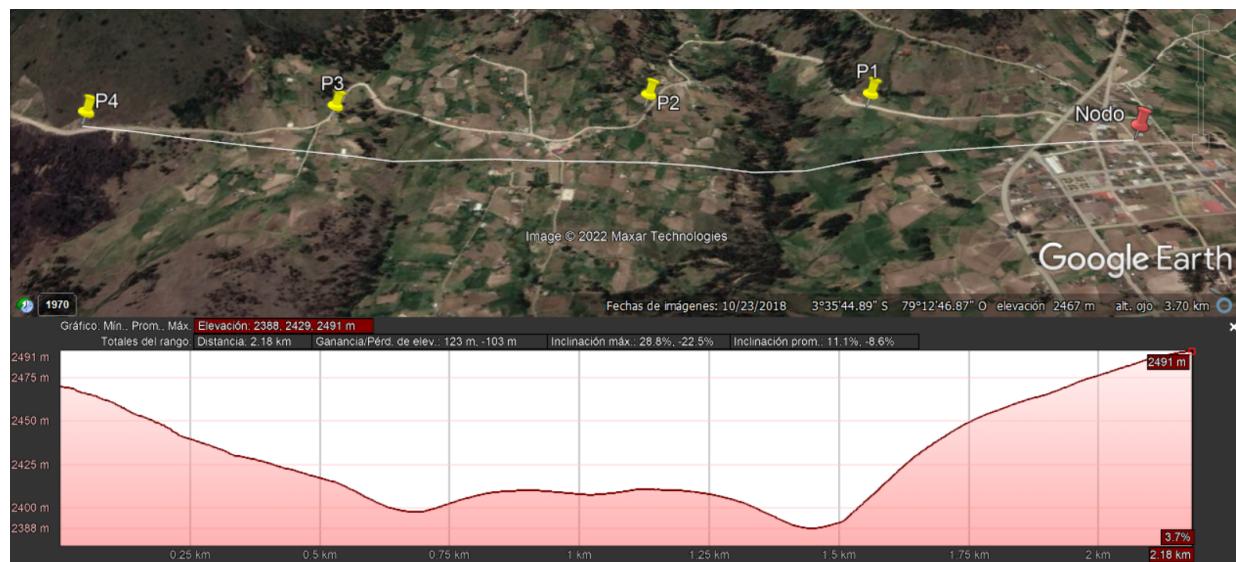


Figura 5.2.8: Perfil de elevación del cuarto punto de la zona rural.

### 5.2.5. Packet Reception Rate (PRR)

Antes de comenzar con el análisis de los resultados, cabe resaltar que las pruebas se realizaron en múltiples ocasiones hasta conseguir que la ubicación del GW y la posición de la antena sean las adecuadas. Llegando a la conclusión que estos dos factores son de gran importancia. En este sentido, para los experimentos se empleó un trípode extensible con una altura de 1.5 m y se ubicó al GW en zonas elevadas para evitar posibles interferencias. La colocación del trípode y del GW se presentan en la Figura 5.2.9.



(a) Ubicación del trípode.

(b) Colocación del GW en el trípode.

Figura 5.2.9: Adeuada ubicación y colocación del GW en la zona rural.

Los resultados de la captura están almacenados en archivos JSON generados mediante los programas de Arduino, los cuales pueden ser consultados en el repositorio [lora-3lagunas](#). Para generar las gráficas, se extraen los campos de importancia del JSON y se crea un nuevo archivo comma-separated values (CSV) con la información, que posteriormente es procesado en Excel. Para generar el archivo CSV se utilizan *scripts* de Bash que automatizan el proceso. En el Código 5.1 se presenta el script utilizado para determinar la cantidad total de paquetes de cada muestra. Todos los *scripts* utilizados se encuentran en el repositorio [lora-3lagunas](#).

```

1  #!/bin/bash
2
3  for estacion in "tx" "rx"; do
4      for p in 1 2; do
5          files="$estacion/p$p/*.json"
6          echo "$files"
7          for file in $files; do
8              echo "$file"
9              temporal="temporal.csv"
10             comb=$(echo "$file" | cut -c9-)
11             file_csv="resultados-ppr/${comb %??????}-$estacion.csv"
12             jq -r '.data[] | [.sec] | @csv' $file >>$temporal
13             muestra=$(cat $temporal | awk 'END{print NR}')

```

```

14     resultado=$( echo "${file%?????},$muestra" | tr "/" ,)
15     echo "$resultado"  >>$file_csv
16     rm $temporal
17   done
18 done
19 done

```

Código 5.1: Script para obtener el número de paquetes

A continuación, se presentan los resultados generales del PRR. Además, se agregan barras de error a las gráficas con intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad. En cuanto a los resultados individuales de los experimentos, se detallan en el Apéndice A.

### 5.2.5.1. PRR general

El histograma general de cada SF se presenta en la Figura 5.2.10. Donde se observa que tanto SF7 como SF8 tienen la tasa de recepción de paquetes más baja, por lo tanto, son los menos recomendables para este escenario. A partir de SF9 se obtiene un PRR promedio mayor a 97 % con intervalos de confianza entre 1.53 y 0.52, lo que demuestra estabilidad en la conexión.

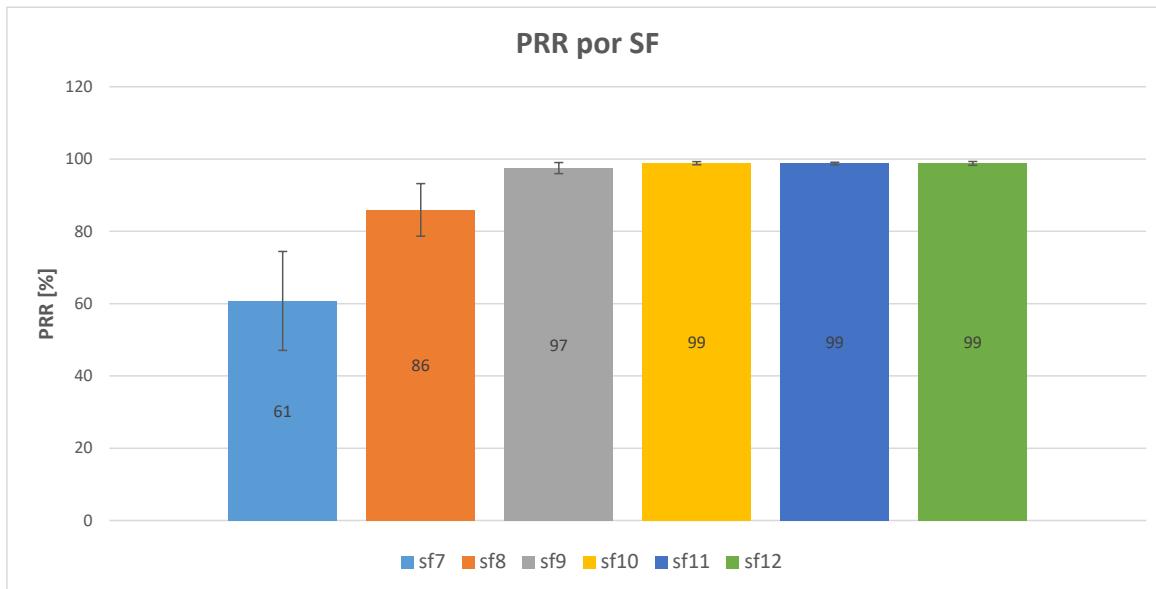


Figura 5.2.10: PRR general obtenido en la zona rural.

### 5.2.6. Throughput/Bit Rate

Para obtener la tasa de bits, se utiliza el comando **capinfos** que imprime la información de los archivos de captura pcap. En la Sección 5.2.5 se observó que existen muchos paquetes perdidos para SF7 y SF8. Por lo tanto, es necesario determinar la tasa de bits para cada combinación con los datos almacenados en el transmisor, porque a pesar que se defina un intervalo fijo en el código, el intervalo final depende del SF y CR utilizado. En la Figura 5.2.11 se presenta la tasa de bits promedio de todos los puntos para cada SF, donde se observa que la tasa de bits disminuye a medida que el SF aumenta, además el intervalo de confianza es muy pequeño, varía entre 1.56 y 0.66. Algo similar pasa con respecto al CR, en la Figura 5.2.12 se observa que mientras los bits de redundancia CR aumentan, la tasa de bits disminuye, además en este caso los intervalos de confianza son más significativos; entre 14.84 y 13.29, con un rango de variabilidad similar en todos los valores de CR.

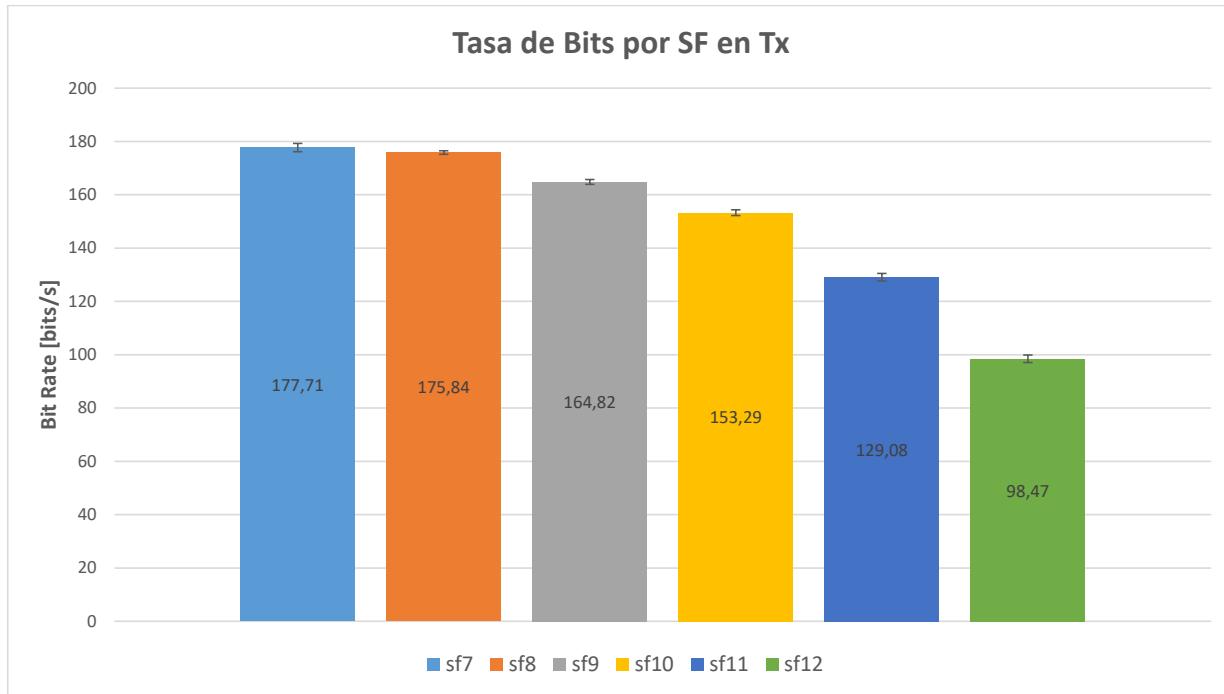


Figura 5.2.11: Bit Rate en Tx para cada SF en la zona rural.

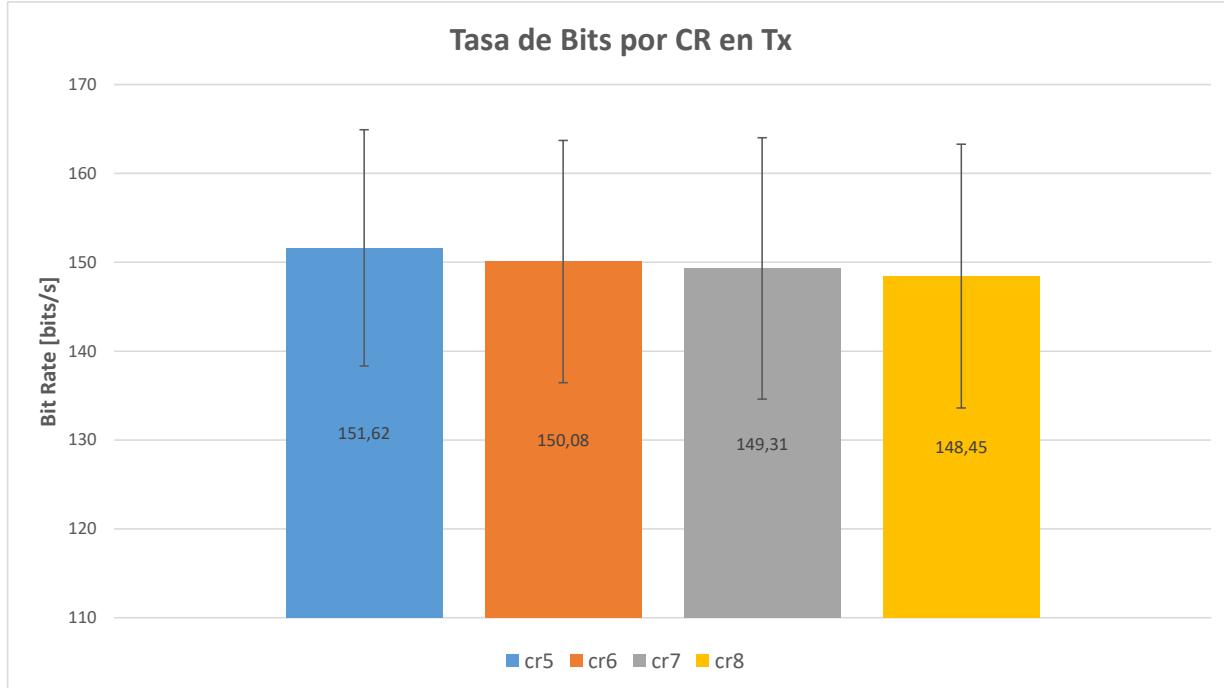


Figura 5.2.12: Bit Rate en Tx para cada CR en la zona rural.

Para obtener el *throughput*, en primer lugar, se utiliza el *script encapsulacion-loratap* del repositorio [lora-3lagunas](#) que convierte los archivos JSON en pcap. Una vez generados los archivos pcap, es posible utilizar **capinfos** mediante un programa en Bash. En el Código 5.2 se presenta el *script* utilizado para

determinar el *throughput* de las muestras.

```

1 #!/bin/sh
2
3 files="pcap/*.pcap"
4 for file in $files; do
5     comb=$(echo "${file} %???????" | cut -c14-)
6     estacion=$(echo "${file}" | cut -c6-7)
7     file_csv="resultados-bps/$comb-$estacion.csv"
8     bps=$(capinfos -i -T -r $file)
9     resultado=$(echo $bps | tr "-" \; | tr [:space:] \;)
10    echo "$resultado" >> $file_csv
11    sed -i 's/pcap\///' $file_csv
12    sed -i 's/.pcap\//\/' $file_csv
13 done

```

Código 5.2: Script para obtener el bit rate.

A continuación, se presenta el análisis general del *bit rate* obtenido en el receptor para los diferentes SFs.

#### 5.2.6.1. Bit Rate general por SF

En la Figura 5.2.13 se presenta el histograma con los resultados generales del *bit rate* para cada SF. La forma de campana obtenida es debido a la pérdidas de paquetes obtenidas para el caso de SF7 y SF8, por lo tanto, el *bit rate* es directamente afectado. En cambio para SF10, SF11 y SF12, la tasa de recepción de paquetes es del 99 %, pero como se observó en la Figura 5.2.11, el *bit rate* en el transmisor disminuye a medida que aumenta el SF. Por lo tanto, las mejores opciones para este caso resultan los valores de SF9 o SF10, ya que están en un punto intermedio y permiten obtener la tasa de bits más alta posible.

Con respecto a los valores de *bit rate*, según la Tabla 2.2.1, los valores obtenidos en el receptor se encuentran dentro de los valores teóricos, por lo que no existiría problema al enviar paquetes de aproximadamente 25 kb en intervalos de *delay* de 500 ms utilizando un SF mayor o igual a SF9.

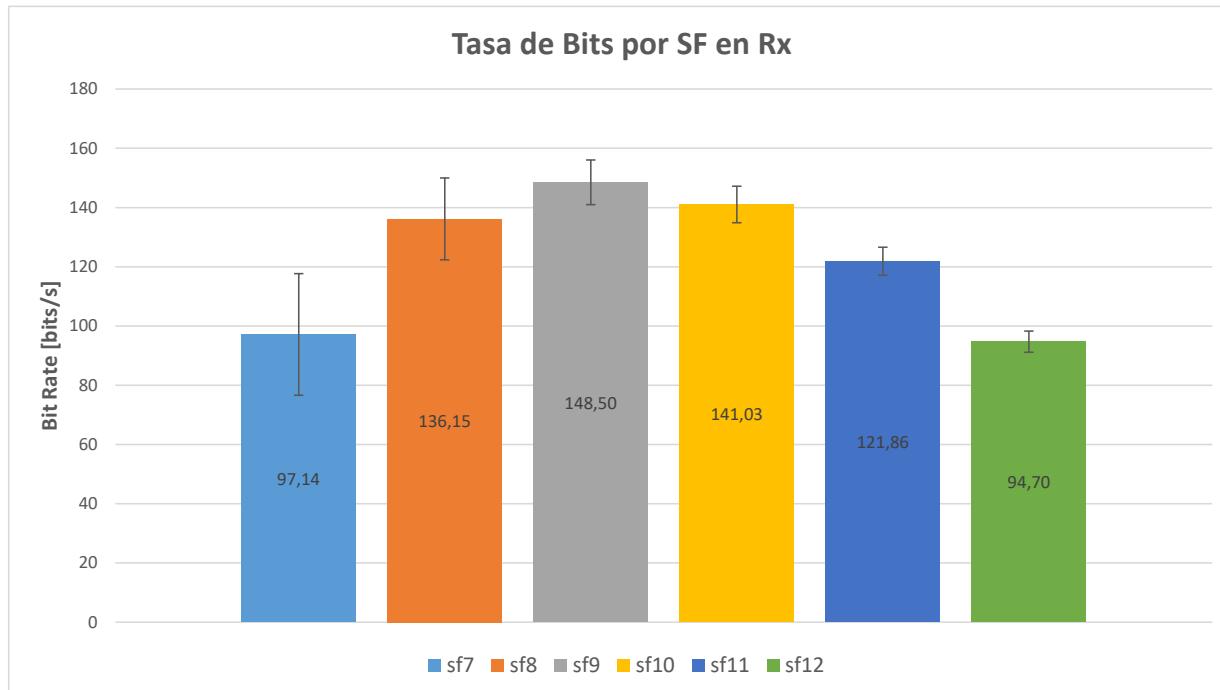


Figura 5.2.13: Bit Rate obtenido en Rx por cada SF en la zona rural.

### 5.2.6.2. Bit Rate general por CR

Los resultados se presentan en la Figura 5.2.14. La tendencia es la misma que en Tx, el *bit rate* disminuye a medida que aumenta el denominador del CR, a excepción de CR5.

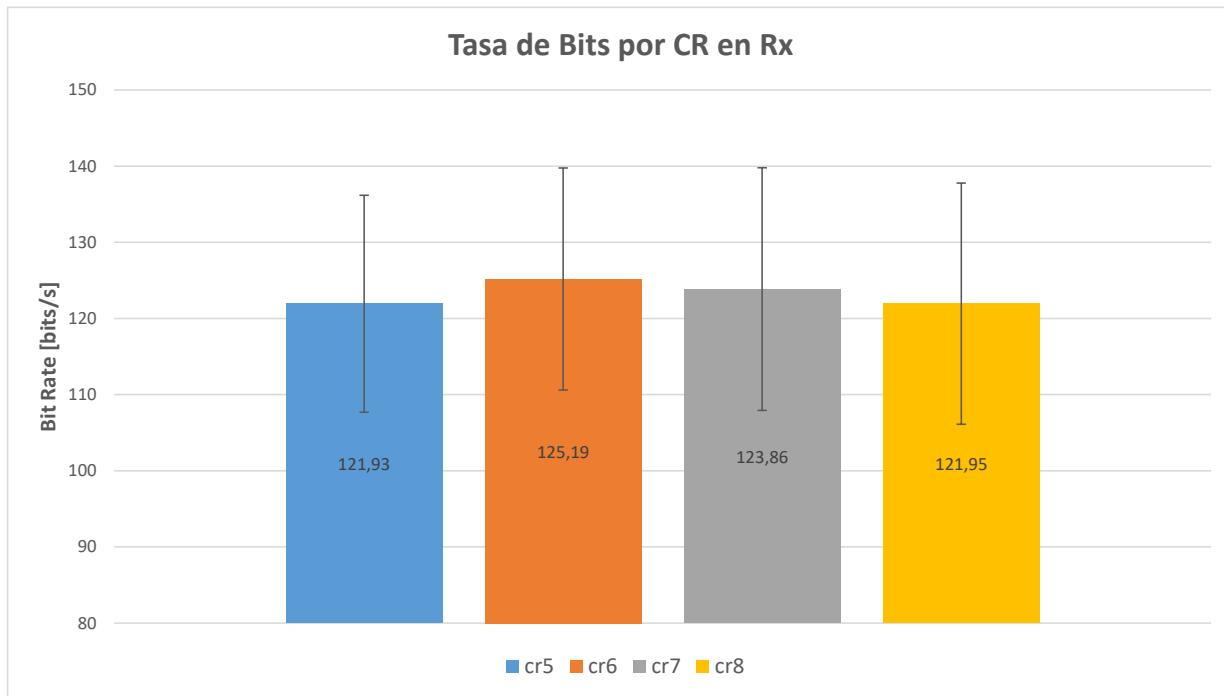


Figura 5.2.14: Bit Rate obtenido en Rx por cada CR en la zona rural.

### 5.2.7. Cobertura y RSSI

En esta sección se analizan los valores de RSSI alcanzados en los puntos de prueba y cómo cambian con el SF y CR. Teniendo en cuenta los puntos de localización permanente del nodo en Tres Lagunas, se decidió evaluar hasta aproximadamente 2 km con el objetivo de determinar si es posible garantizar la cobertura del nodo en el sistema. Los datos se detallan para cada combinación en los diferentes puntos de prueba. La evaluación se divide en análisis individuales por SF en el Apéndice A, donde se comparan las diferentes combinaciones.

El RSSI, al igual que en las secciones anteriores, se obtiene mediante un programa en Bash. El archivo JSON no requiere un preprocesamiento, con el *script* del Código 5.3 se generan los archivos CSV que encapsulan los valores de RSSI.

```

1 #!/bin/bash
2
3 for estacion in "rx"; do
4     for p in 1 2; do
5         files="$estacion/p$p/*.json"
6         echo "$files"
7         for file in $files; do
8             temporal="temporal.csv"
9             comb=$(echo "$file" | cut -c9-)
10            file_csv="resultados-rssi/${comb%??????}-$estacion.csv"
11            jq -r '.data[] | [.rss] | @csv' $file >$temporal
12            rss=$(.awk '{total+=$1;count++} END {print total/count}' $temporal)
13            resultado=$( echo "${file%?????};$rss" | tr "/" "\;" | tr "." ",")
14            echo "$resultado" >$file_csv
15            rm $temporal
16     done

```

17      done  
18      done

Código 5.3: Script para obtener los valores de RSSI.

En general, los valores de RSSI promedio son muy similares, pero a continuación, se proporciona un análisis detallado del comportamiento del RSSI según cada SF y CR.

#### 5.2.7.1. RSSI general por SF

La Figura 5.2.15 muestra el resultado general de los valores de RSSI obtenidos por cada SF. Se observa que los datos de potencia han variado poco con respecto a los demás SFs, sin embargo; es clara la tendencia de reducción de RSSI a medida que aumenta el valor del SF. Es decir, la señal es ligeramente más fuerte cuando el SF disminuye.

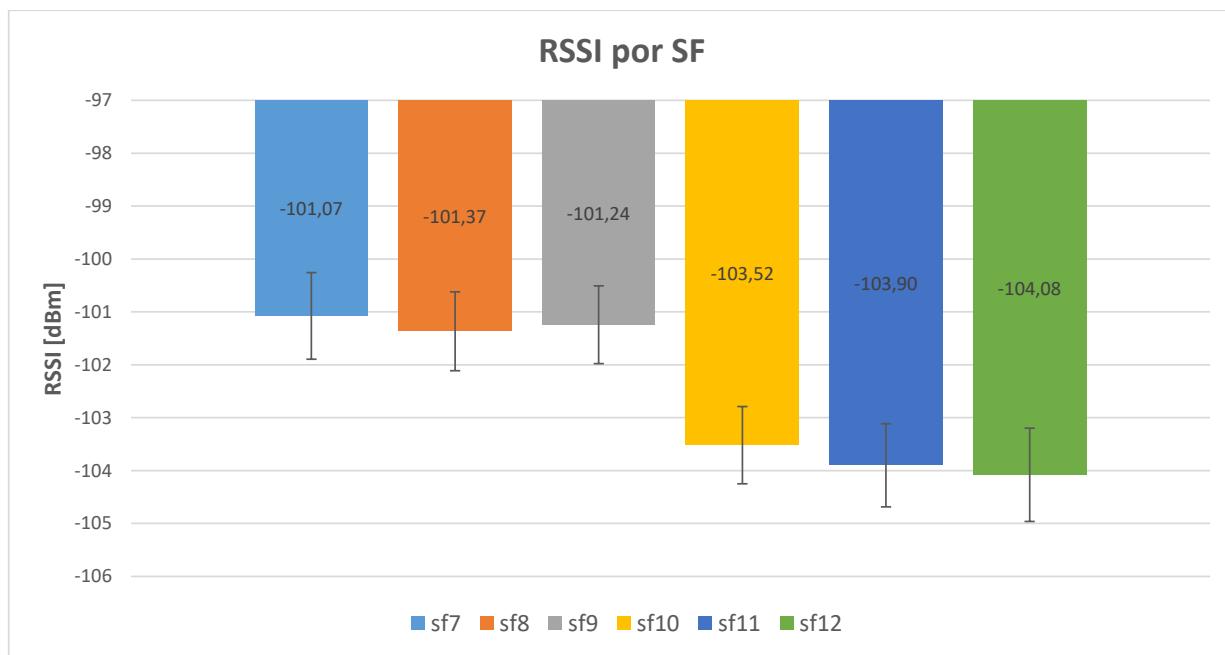


Figura 5.2.15: RSSI general obtenido para diferentes valores de SF en la zona rural.

#### 5.2.7.2. RSSI general por CR

El histograma se presenta en la Figura 5.2.16, donde se observa claramente que más bits de redundancia en el CR mejora la potencia de la señal, generando cambios entre cada CR de aproximadamente 1 dBm de diferencia. Por lo tanto, la mejor opción en términos de sensibilidad, sería adoptar el CR más alto para garantizar una buena recepción.

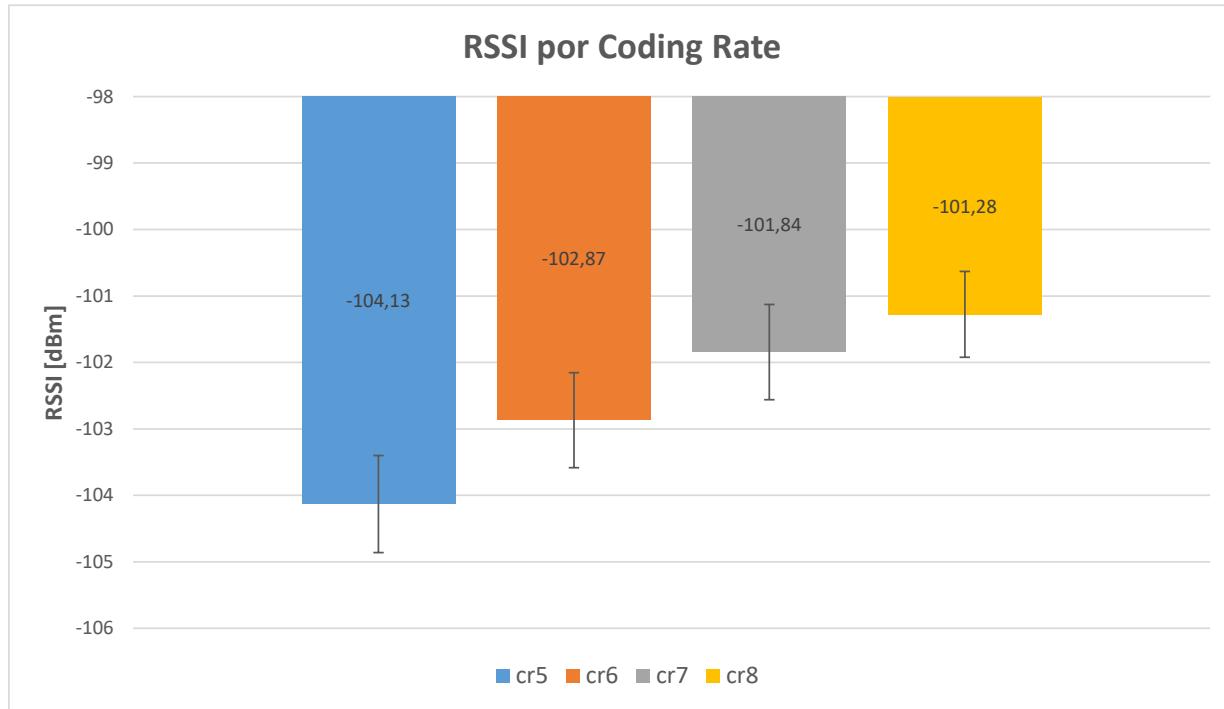


Figura 5.2.16: RSSI general obtenido para diferentes valores de CR en la zona rural.

### 5.2.8. Delay

Para analizar el *delay* se utilizan las marcas de tiempo del archivo JSON y se obtiene la diferencia entre el paquete del receptor con su paquete respectivo en el transmisor. Debido a la pérdida tan grande de paquetes en SF7 y SF8, son descartados como posibles opciones a utilizar en el sistema permanente y ya no se consideran para el análisis del *delay*. Además, existen muchos paquetes con el *payload* distorsionado, lo que dificulta el análisis al no detectar que paquete de Receptor (Rx) corresponde al Transmisor (Tx).

El código utilizado para extraer las marcas de tiempo y *payload* correspondiente, tanto para Tx y Rx, se presenta en el Código 5.4.

```

1 #!/bin/bash
2
3 for estacion in "tx" "rx"; do
4     for p in 1 2; do
5         files="$estacion/p$p/*.json"
6         echo "$files"
7         for file in $files; do
8             comb=$(echo "$file" | cut -c7-)
9             file_csv="resultados-delay/p$p/${comb%????????}-$estacion.csv"
10            echo "          " >>$file_csv
11            echo "$file" >>$file_csv
12            echo "$file"
13            jq -r '.data[] | [.sec, .payload] | @csv' $file >>$file_csv
14        done
15    done
16 done

```

Código 5.4: Script para obtener los valores de RSSI.

### 5.2.8.1. Delay general por SF

En la Figura 5.2.17 se presentan los valores de *delay* promedio para cada SF de todos los puntos y combinaciones de CR. Existe una clara tendencia al aumento del *delay* a medida que se incrementa el SF, lo que corresponde a la teoría, ya que un SF más grande representa mayor ToA. Sin embargo; la variación entre SF 9, 10 y 11, no es tan grande, en cambio entre SF11 y SF12 existe una diferencia de aproximadamente 500 ms. Los intervalos de confianza son menores a 3 % debido a la poca variación que se observó en las figuras anteriores.

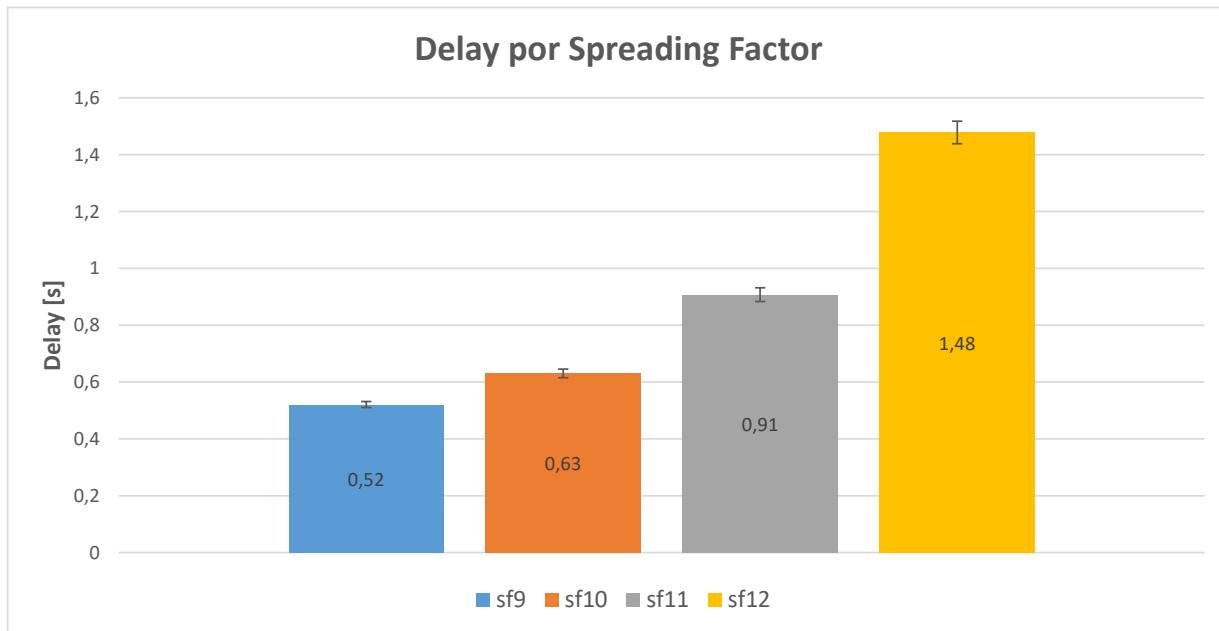


Figura 5.2.17: Delay general obtenido para diferentes valores de SF en la zona rural.

### 5.2.8.2. Delay general por CR

Los resultados se presentan en la Figura 5.2.18. Se puede observar que el retraso es mayor cuando el denominador de la tasa de codificación aumenta, ya que existen más bits para la transmisión. Sin embargo, la variación es pequeña, pasando de 0,84 s al valor máximo de 0,94 s, por lo que la incidencia del CR en el *delay* no es considerable para esta aplicación.

## 5.2.9. Jitter

Los resultados de este parámetro se generan a partir de los datos del *delay*. Es importante recordar que un *jitter* menor implica una conexión más estable, con menor probabilidad de colisión de paquetes. A continuación, se realiza un análisis detallado de los resultados.

### 5.2.9.1. Jitter general por SF

El *jitter* promedio por SF se presenta en la Figura 5.2.19.

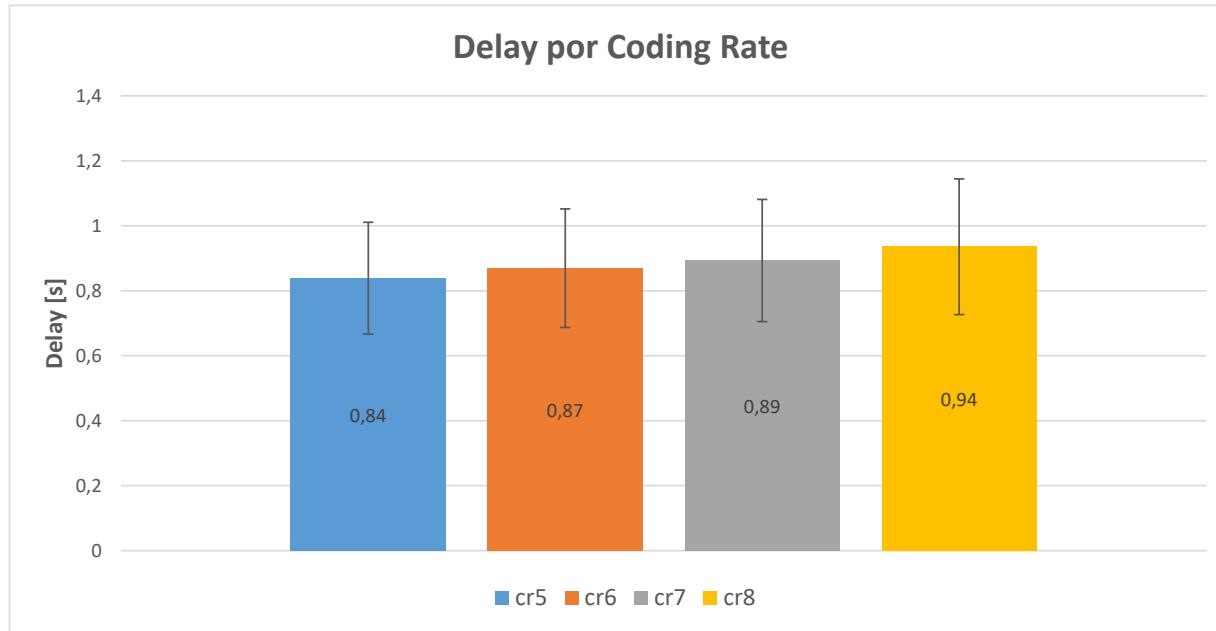


Figura 5.2.18: Delay general obtenido para diferentes valores de CR en la zona rural.

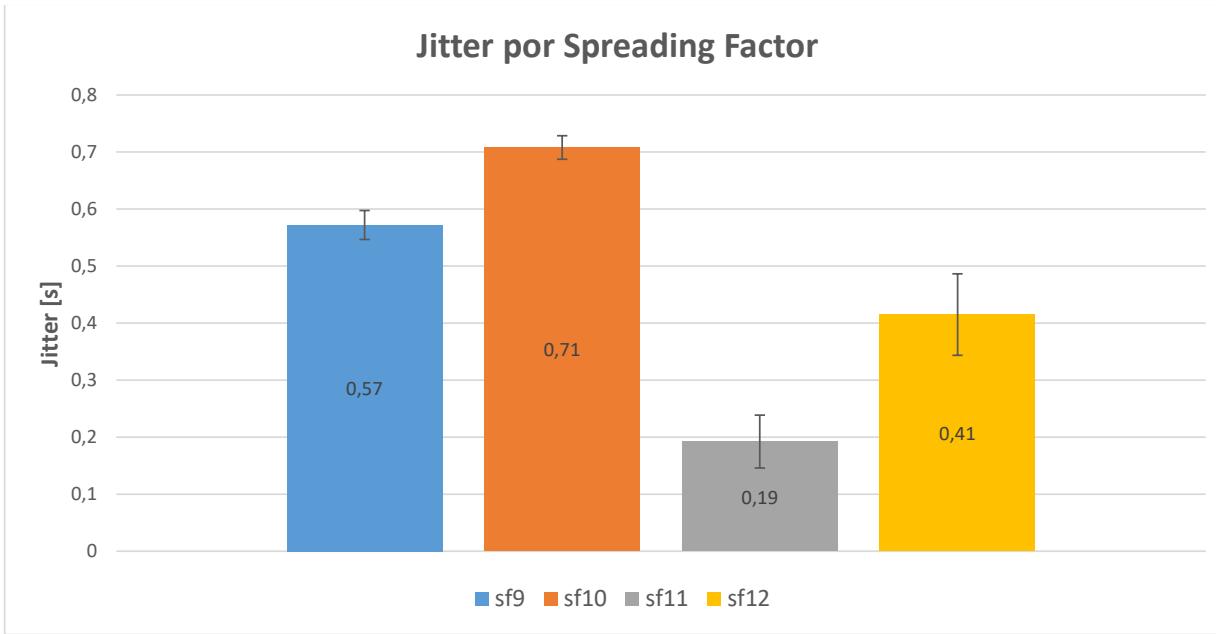


Figura 5.2.19: Jitter general obtenido para diferentes valores de SF en la zona rural.

En cuanto a los resultados presentados en la Figura 5.2.19 respecto al *jitter*, dicho comportamiento está relacionado con la exactitud del RTC. En particular, el dispositivo RTC (DS3231) posee una escala mínima dada en segundos como se indica en su *datasheet* [84], entonces el *delay* mínimo es de 1 segundo, lo que produce que los retrasos de milisegundos o menos, sean indetectables. Entonces, mientras más cercano sea el *delay* promedio a valores enteros, existe menos probabilidad de varianza en el *delay*. Por ejemplo, en caso de tener un *delay* promedio de 500 ms, si el paquete es transmitido a las 15:20:05 será recibido en el receptor a las 15:20:05, como se observa en la Tabla 5.2.1, es decir; el *delay* fue ignorado.

Tabla 5.2.1: Tiempos generados por el RTC en Tx y Rx.

Tiempo exacto Tx	RTC Tx	Delay	Tiempo exacto Rx	RTC Rx
15:20:05+0 ms	15:20:05	500 ms	15:20:05+500 ms	<b>15:20:05</b>

Por lo tanto, la detección de un valor de *delay*, depende del tiempo exacto de transmisión, por ejemplo, si la transmisión tiene lugar a las 15:20:05+800 ms, será recibido a las 15:20:06, debido a los 500 ms *delay*. En cambio, si se transmite a las 15:20:05+200 ms, será recibido a las 15:20:05 como se observa en la Tabla 5.2.2.

Tabla 5.2.2: Tiempos generados por el RTC en Tx y Rx con un retardo de 500 ms.

Tiempo exacto Tx	RTC Tx	Delay	Tiempo exacto Rx	RTC Rx
15:20:05+800 ms	15:20:05	500 ms	15:20:05+1300 ms	<b>15:20:06</b>
15:20:05+200 ms	15:20:05	500 ms	15:20:05+700 ms	<b>15:20:05</b>
15:20:05+500 ms	15:20:05	500 ms	15:20:05+1000 ms	<b>15:20:06</b>
15:20:05+100 ms	15:20:05	500 ms	15:20:05+600 ms	<b>15:20:05</b>

En este sentido, mientras más cercano a 1000 ms (1 segundo) sea el *delay*, más probabilidad tiene de ser detectado en el siguiente segundo. Por ejemplo, considerando un *delay* de 900 ms, si el paquete se transmite a las 15:20:05+800 ms, será recibido a las 15:20:06. En la Tabla 5.2.3, se presentan ejemplos adicionales de este comportamiento.

Tabla 5.2.3: Tiempos generados por el RTC en Tx y Rx, con un retardo de 900 ms.

Tiempo exacto Tx	RTC Tx	Delay	Tiempo exacto Rx	RTC Rx
15:20:05+800 ms	15:20:05	900 ms	15:20:05+1700 ms	<b>15:20:06</b>
15:20:05+200 ms	15:20:05	900 ms	15:20:05+1100 ms	<b>15:20:06</b>
15:20:05+500 ms	15:20:05	900 ms	15:20:05+1400 ms	<b>15:20:06</b>
15:20:05+100 ms	15:20:05	900 ms	15:20:05+1000 ms	<b>15:20:06</b>

Estos resultados se reflejan directamente en el *jitter*, porque mientras más cercano sea el *delay* promedio a valores enteros de segundos, es decir; 1 s, 2 s, etc, existe menos variación del *delay*. Tal como se observa en la Figura 5.2.20, el *jitter* más bajo corresponde al SF con el *delay* promedio más cercano a 1 s, en este caso SF11. Pero esto no quiere decir que al utilizar SF11 tendrá menos *jitter* y una conexión más confiable, sino se trata de un error debido a la precisión del RTC. Sin embargo, el *jitter* afecta a las comunicaciones con altas tasas de bits o aplicaciones que requieran datos en tiempo real, por lo que para nuestro caso el comportamiento del *jitter* no afecta a la red.

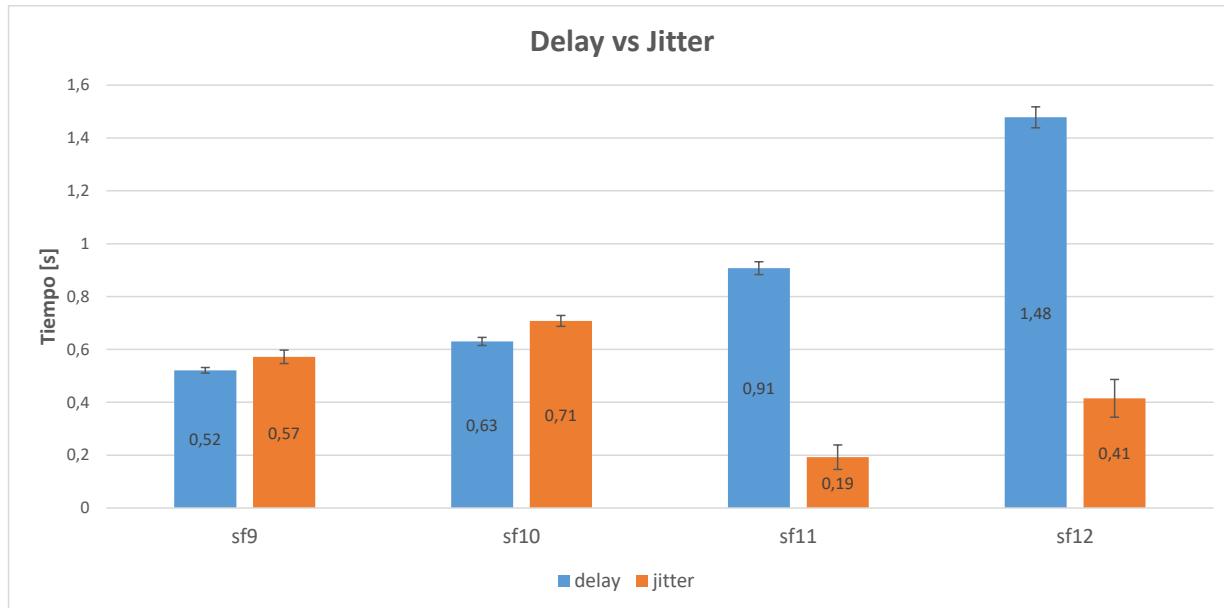


Figura 5.2.20: Delay promedio en comparación con el jitter promedio por SF en la zona rural.

## 5.3. Zona alto páramo

En el páramo, el entorno es el adecuado para LoRa, ya que los resultados de la zona rural muestran un excelente rendimiento cuando la línea de vista está totalmente despejada y en Tres Lagunas no existen interferencias considerables. El lugar está en su mayoría cubierto de pasto, pequeños arbustos y plantas silvestres que no representan un obstáculo. A continuación, se detallan las ubicaciones de los puntos elegidos para la ubicación del nodo y el GW.

### 5.3.1. Gateway - Zona alto páramo

La ubicación del GW y su colocación se presentan en la Figura 5.3.1. El GW fue colocado en el punto más alto del sector con el objetivo de proporcionar mejor cobertura al nodo. Debido a las condiciones climáticas aceptables se decidió realizar la captura de datos sin ninguna protección en el GW, al igual que en la zona rural. La fuente que alimenta al GW es un celular, que además permite visualizar a través del puerto serial los paquetes que están siendo recibidos, de esta forma se realiza un monitoreo constante que permite tomar decisiones en caso de producirse algún error.

### 5.3.2. Punto 1 - Zona alto páramo

La ubicación del primer punto y la colocación del nodo se presentan en la Figura 5.3.2. El nodo fue colocado en la estructura metálica dentro de la caja IP65, junto con el *PowerBank*. Para monitorear el estado de la transmisión y si los paquetes se están enviando correctamente, se utilizan los Light-Emitting Diode (LED) agregados en la PCB, que además indican mediante códigos de luces si la tarjeta SD o el chip LoRa presentan algún error.



(a) GW en el páramo.

(b) Ubicación del GW.

Figura 5.3.1: Ubicación del GW en el páramo.



(a) Nodo en el primer punto.

(b) Ubicación del primer punto.

Figura 5.3.2: Nodo en el primer punto del páramo.

Este punto se encuentra a más de 1 km de distancia del nodo, como se observa en el perfil de elevación de la Figura 5.3.3. Durante la captura el clima se mantuvo estable, con un cielo parcialmente nublado y nunca hubo cambios bruscos de las condiciones climáticas. La mayor parte del tiempo existió presencia

leve de viento y únicamente durante los primeros minutos, presencia de lluvia.

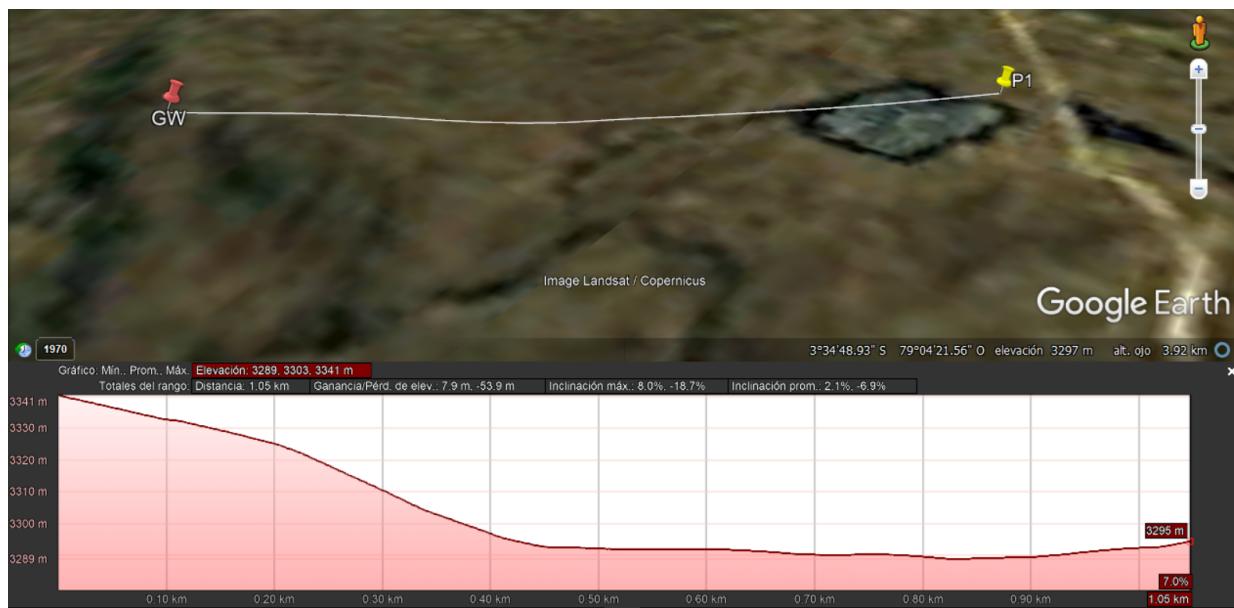


Figura 5.3.3: Perfil de elevación del primer punto del páramo.

### 5.3.3. Punto 2 - Zona alto páramo

La ubicación del segundo punto y la colocación del nodo se presentan en la Figura 5.3.4.



(a) Nodo en el segundo punto. (b) Ubicación del segundo punto.

Figura 5.3.4: Nodo en el segundo punto del páramo.

Este punto se encuentra a más de 1.2 km de distancia del nodo, como se observa en el perfil de eleva-

ción de la Figura 5.3.5. El clima no tuvo variaciones considerables, hubo poca presencia de viento y lluvia. El cielo permaneció nublado la mayoría del tiempo. En general, fue un ambiente estable e ideal para LoRa.



Figura 5.3.5: Perfil de elevación del segundo punto del páramo.

A continuación, se realiza el análisis de los resultados. Los parámetros son los mismos que se revisaron en la zona rural, a diferencia que en este caso existen solo dos puntos y el intervalo de transmisión es de 1 s. Sin embargo, el comportamiento y tendencias de las distintas métricas de red se asemeja mucho a los resultados de la zona rural. Entonces, el análisis estará enfocado principalmente en las gráficas generales por SF y CR.

### 5.3.4. Packet Reception Rate (PRR)

En esta sección se presentan las gráficas obtenidas correspondientes al PRR. Es importante recordar que el intervalo de transmisión es mayor, por lo que existen menos paquetes y la pérdida de un paquete puede generar un intervalo de confianza más amplio.

#### 5.3.4.1. PRR general

En la Figura 5.3.6 se presenta el resultado general del PRR para todos los puntos y combinaciones de CR. El PRR tiende a aumentar a medida que el SF aumenta, llegando a tener un promedio de 100 % de paquetes recibidos en SF 11 y 12. Además, se observa que SF 9 y 10 tienen un excelente rendimiento, presentando un PRR promedio de 99 % con intervalos de confianza cercanos a cero. Por lo tanto, con respecto al PRR, es recomendable utilizar cualquier SF mayor a 9.

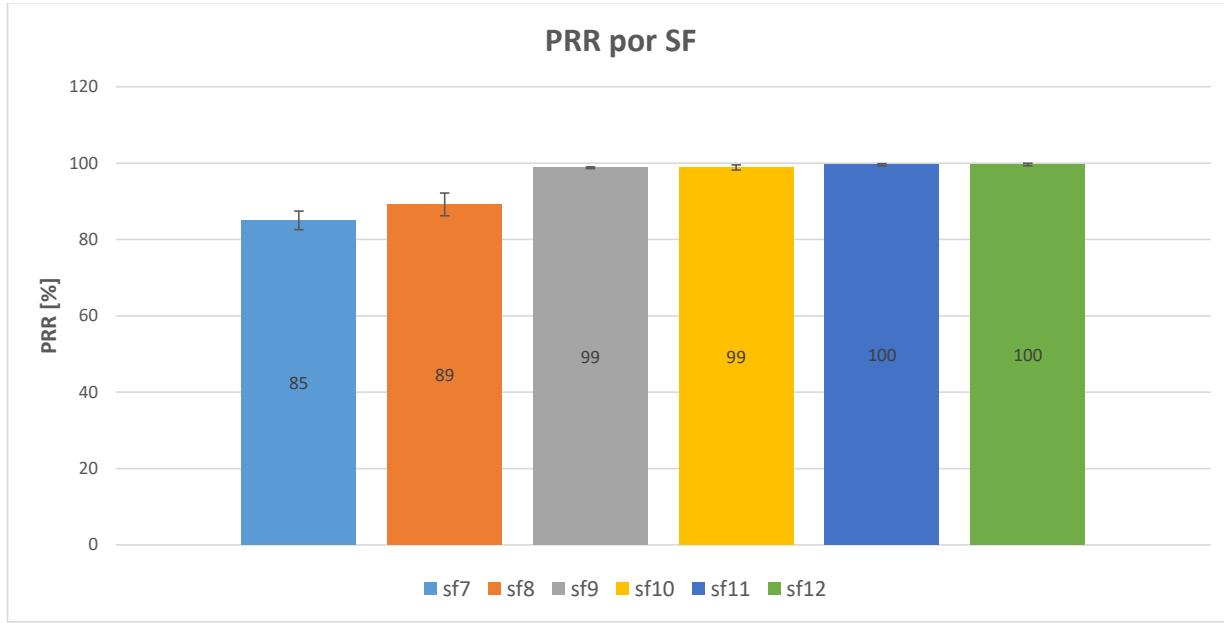


Figura 5.3.6: PRR general obtenido en el páramo.

### 5.3.5. Throughput/Bit Rate

Los resultados de esta sección, a diferencia de la zona rural, presenta tasas menores de bits debido al intervalo de transmisión. En las Figuras 5.3.7 y 5.3.8 se visualiza el *bit rate* para todos los valores de SF y CR en el transmisor, respectivamente. Donde se observa que la tasa de bits disminuye a medida que el SF y el denominador del CR aumentan.

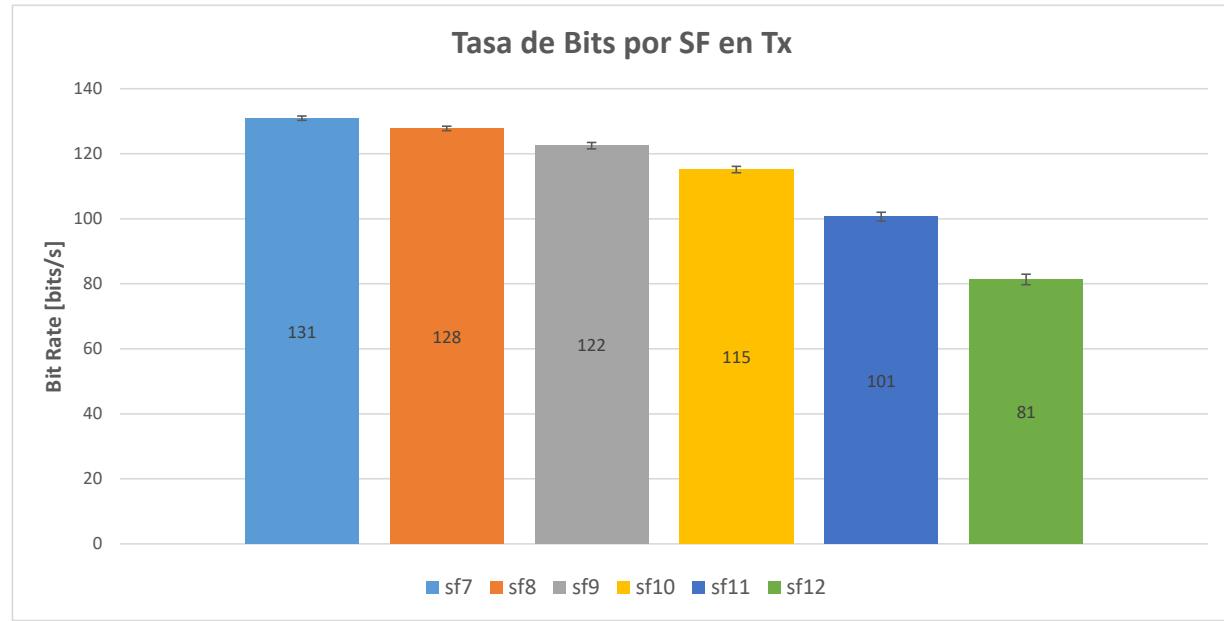


Figura 5.3.7: Bit Rate en Tx para cada SF en el páramo.

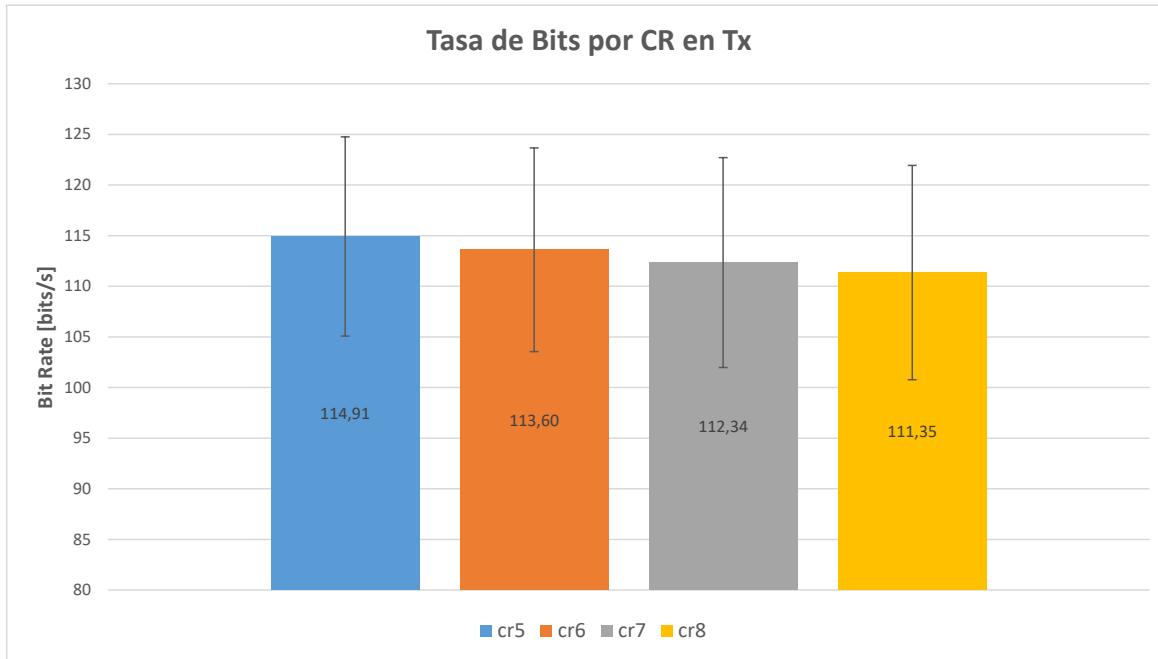


Figura 5.3.8: Bit Rate en Tx para cada CR en el páramo.

#### 5.3.5.1. Bit Rate general SF y CR

El *throughput* general para los valores de SF y CR se presentan en las Figuras 5.3.9 y 5.3.10, respectivamente. La tasa de bits tiende a disminuir a medida que aumenta el SF, a excepción de SF7 y SF8, debido a la pérdida de paquetes. Por lo tanto, sigue siendo SF9 la mejor opción con respecto a *bit rate* para este escenario, ya que proporciona la tasa de bits más alta posible. Con respecto al CR, el *bit rate* disminuye mientras el denominador del CR incrementa, sin embargo, la variación entre cada CR es pequeña.

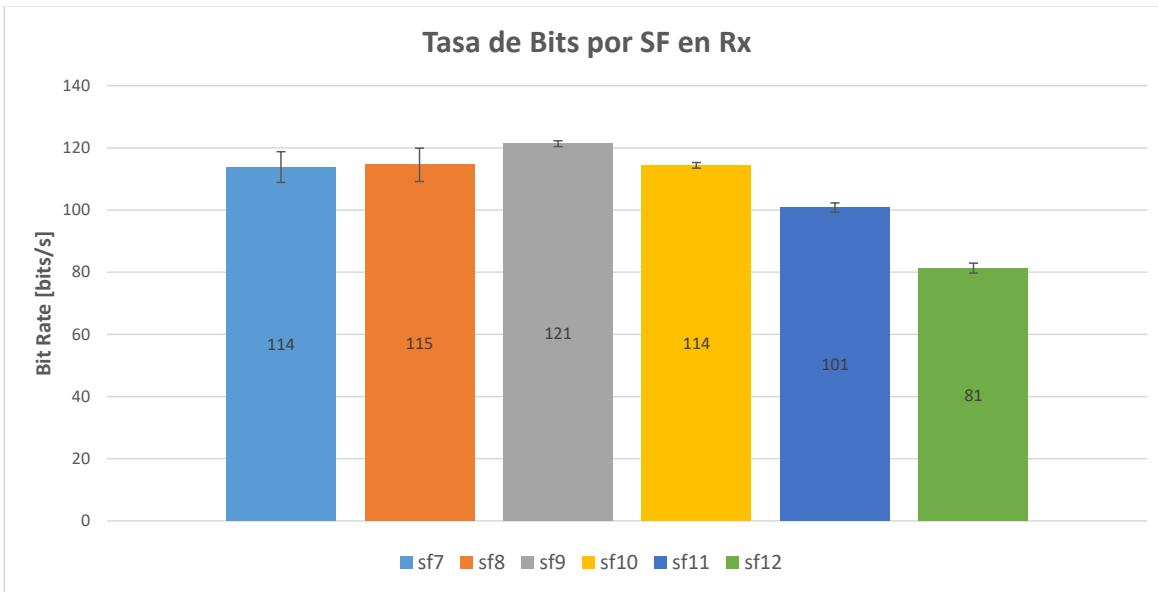


Figura 5.3.9: Bit Rate general para cada SF obtenido en el páramo.

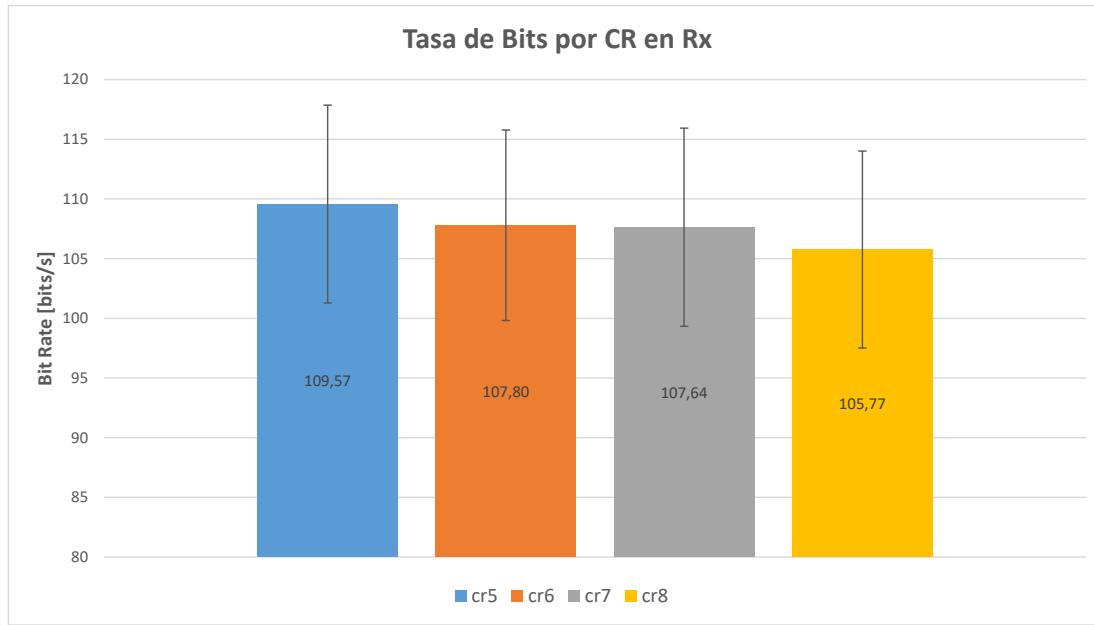


Figura 5.3.10: Bit Rate general para cada CR obtenido en el páramo.

### 5.3.6. Cobertura y RSSI

Los puntos de análisis fueron seleccionados en base a la posible ubicación permanente del nodo. El GW está ubicado a distancias de 1 km y 1,2 km del nodo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los experimentos.

#### 5.3.6.1. RSSI general por SF

La Figura 5.3.11 muestra el resultado general de los valores de RSSI obtenidos por cada SF. La gráfica presenta una clara tendencia de disminución del RSSI a medida que aumenta el SF. Sin embargo, la degradación es bastante pequeña, por ejemplo, SF 10, 11 y 12 tienen aproximadamente la misma media.

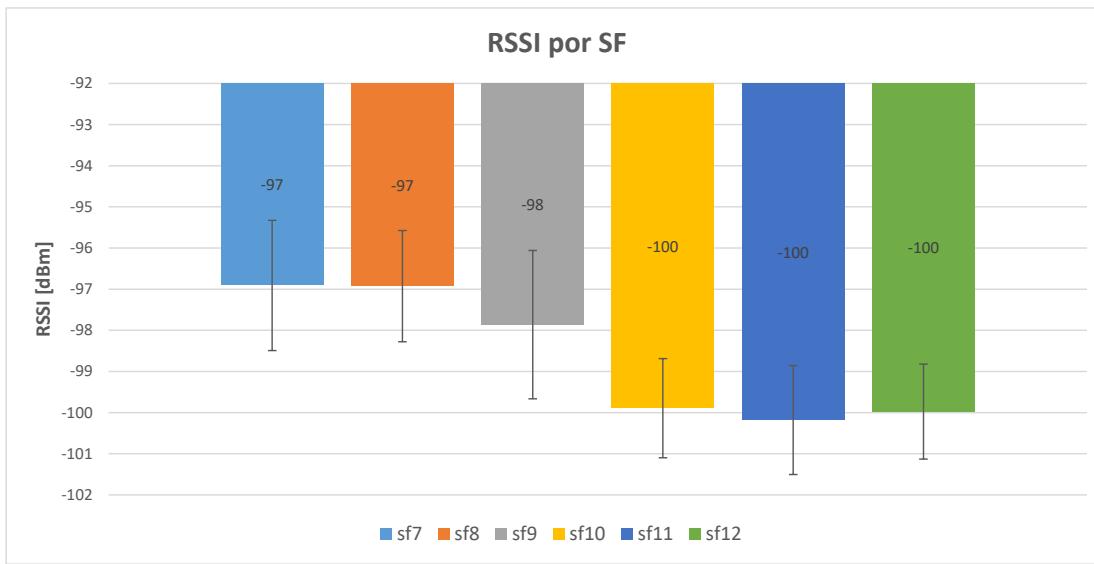


Figura 5.3.11: RSSI general obtenido para diferentes valores de SF en el páramo.

### 5.3.6.2. RSSI general por CR

Los valores de CR obtenidos en la Figura 5.3.12 muestran que el RSSI disminuye a medida que el denominador del CR sea mayor, aunque la diferencia sea mínima. Al igual que en la zona rural, un denominador menor de CR, mejora la potencia de la señal.

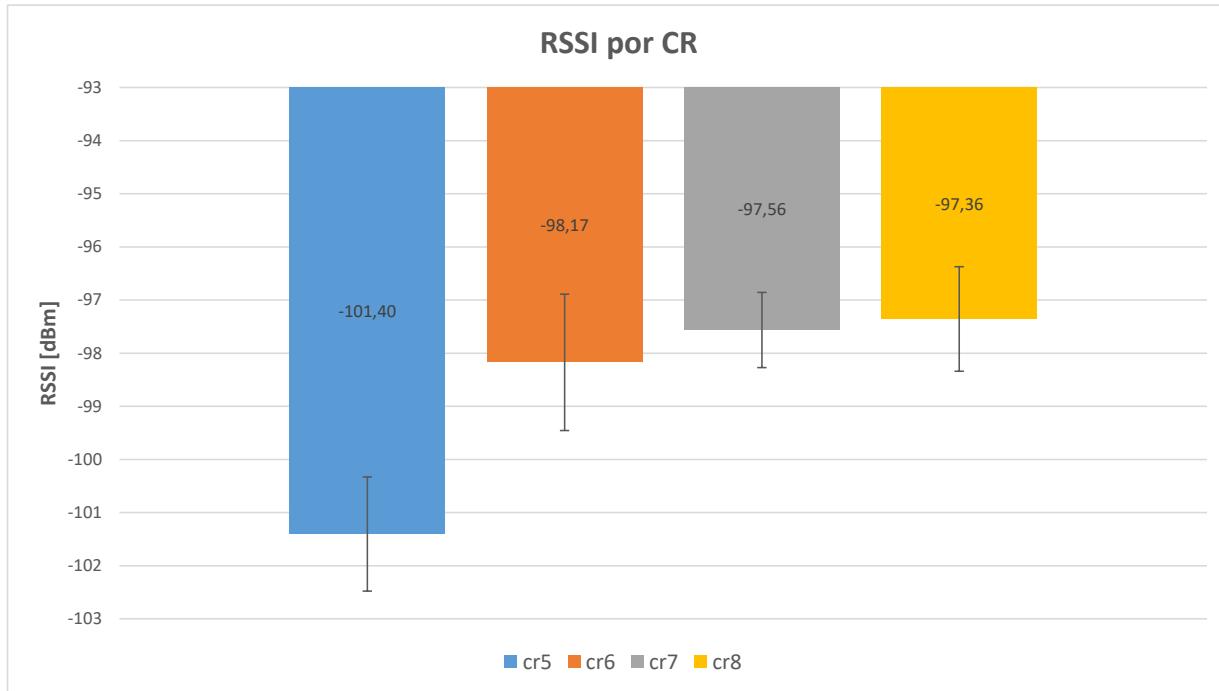


Figura 5.3.12: RSSI general obtenido para diferentes valores de CR en el páramo.

### 5.3.7. Delay

Para generar los resultados con respecto al *delay*, se utilizan las marcas de tiempo de los archivos JSON y los mismos *scripts* utilizados para los datos de la zona rural. A continuación, se presentan las gráficas obtenidas para cada SF y CR.

#### 5.3.7.1. Delay general por SF

En la Figura 5.3.13 se presentan los resultados del *delay* para este escenario. Los datos corresponden con la teoría, porque a medida que el SF aumenta, también aumenta el ToA, lo que genera un *delay* mayor. El resultado más interesante se observa en SF9, donde existe un retardo de aproximadamente 10 ms y una variabilidad reducida, lo que se refleja en los intervalos de confianza. Para el caso de SF 9 y 10, los retardos también son muy pequeños en comparación con la zona rural, reiterando la importancia de la línea de vista para LoRa. Con respecto a SF12, el retardo es aproximadamente de un segundo.

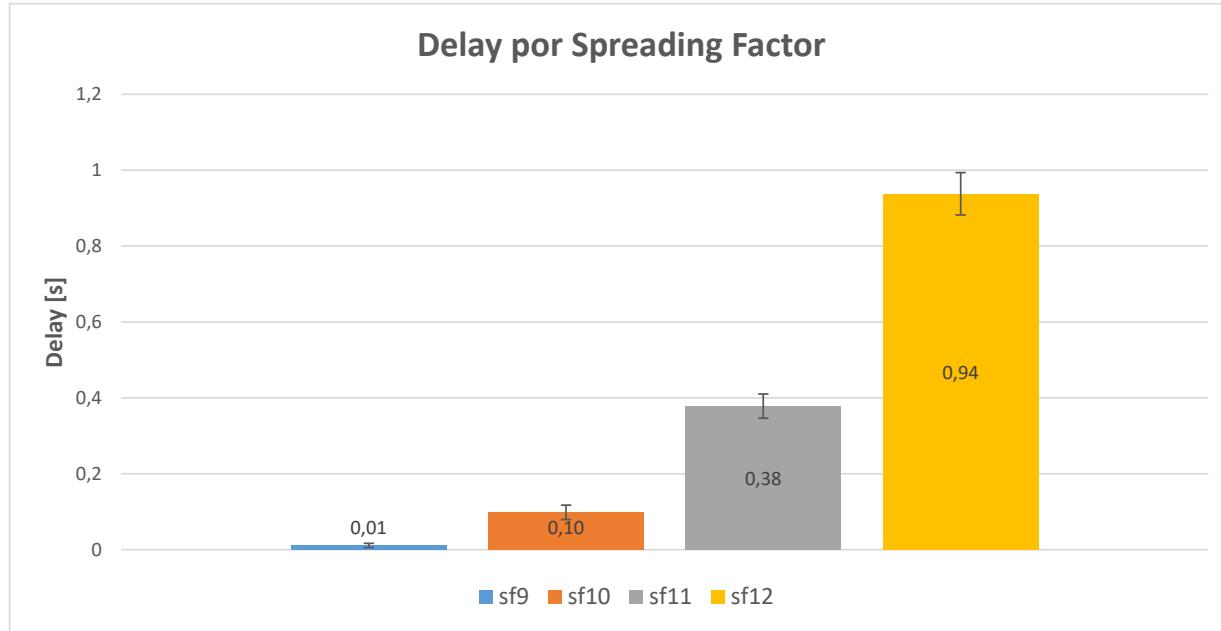


Figura 5.3.13: Delay general obtenido para diferentes valores de SF en el páramo.

#### 5.3.7.2. Delay general por CR

Los resultados de la Figura 5.3.14 muestra un comportamiento que coincide con la teoría, es decir; a medida que el denominador del CR aumenta, también aumenta el retardo. Sin embargo, en este caso se observan intervalos de confianza muy amplios y esto se relaciona directamente con los datos de SF, ya que este resultado es el promedio de todos los CR para cada SF y punto de prueba.

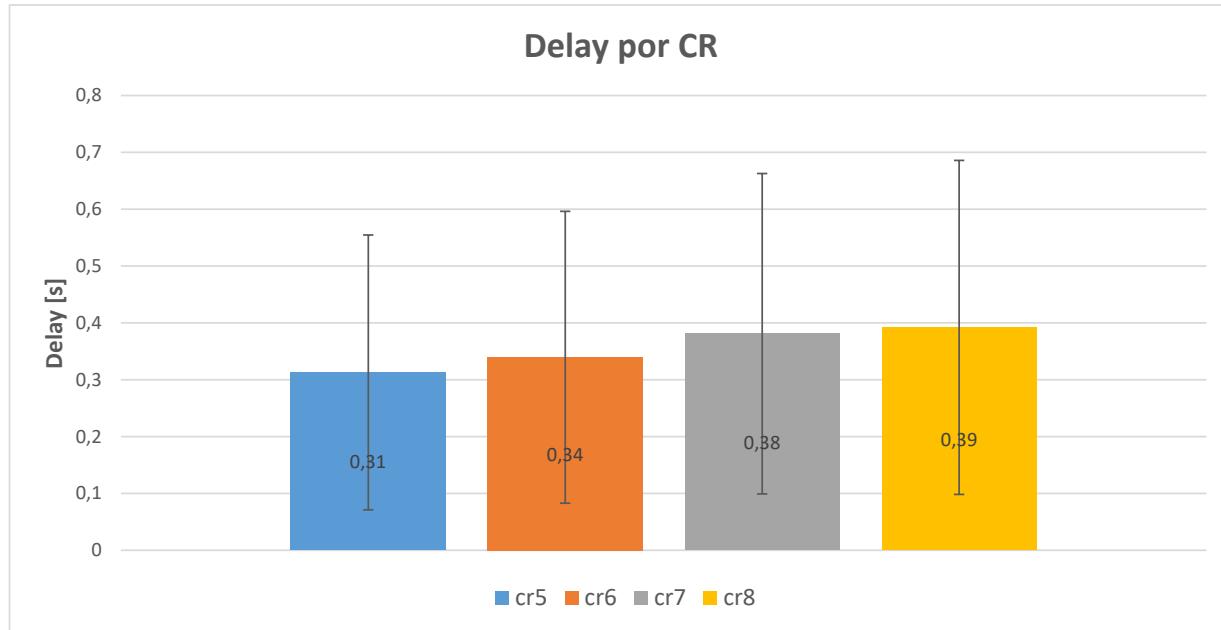


Figura 5.3.14: Delay general obtenido para diferentes valores de CR en el páramo.

Con respecto al *jitter*, no se realiza ningún análisis en este escenario, ya que basados en los resultados

de la zona rural, la información obtenida no sería confiable. Además, al ser una estación meteorológica que requiere una tasa de bits muy baja, el *jitter* no es un factor determinante.

## 5.4. Pruebas de consumo energético

Considerando que el prototipo está alimentado por una batería, es muy importante tener una perspectiva general del consumo de energía durante su funcionamiento. Por este motivo se tomaron medidas del consumo de corriente que demanda el prototipo, tomando en cuenta los modos de funcionamiento de los equipos (modo activo y modo *sleep* o de bajo consumo energético).

### 5.4.1. Parámetros de configuración

Para analizar el rendimiento energético de la estación es necesario definir bajo qué parámetros LoRa se realizará la evaluación. En la Tabla 5.4.1 se describen los parámetros seleccionados.

Tabla 5.4.1: Parámetros de transmisión LoRaWAN

Parámetro	Valor
Frecuencia	433.175 MHz
Ancho de banda	125 kHz
Factor de ensanchamiento	9,10
Tasa de código	4/5
Potencia de transmisión	14 dBm

Por otra parte, con respecto al *hardware* empleado en el prototipo, algunos poseen dos modos de funcionamiento (activo y *sleep*), dichos equipos se aprecian en la Tabla 5.4.2. En este contexto, el análisis del prototipo se realiza tomando en cuenta estos modos de funcionamiento.

Tabla 5.4.2: Elementos hardware de la estación

Descripción	Equipos
Microcontrolador	ATmega1284P
Sensores	Temperatura, pH, DO, ORP
Módulos I2C	RTC DS3231, INA219
Módulos SPI	LoRa RA-02

### 5.4.2. Análisis corriente requerida

Para observar el comportamiento del consumo de corriente se capturaron datos durante un periodo de 30 minutos de funcionamiento del prototipo, donde se midió la corriente que consume mediante el sensor INA219. En la Figura 5.4.1 se indica el consumo de corriente, estas medidas se tomaron con un intervalo de 1 s y se graficaron los intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad.

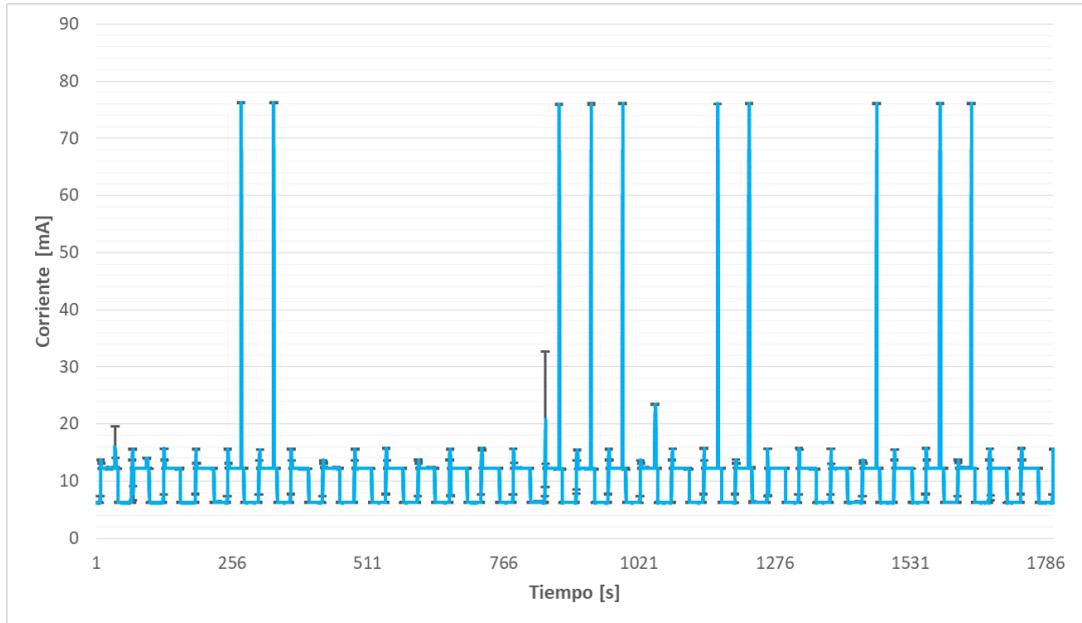


Figura 5.4.1: Corriente general requerida por el prototipo.

Los datos de la Figura 5.4.1 muestran el consumo generado durante el modo de funcionamiento activo y el modo *sleep*, los picos de corriente se deben a la etapa de transmisión LoRa y los mínimos ocurren cuando el MCU pasa al modo de bajo consumo. Esto se detalla en la Figura 5.4.2, donde se aprecia cada etapa y los niveles de corriente generados. Además, se indica los diferentes tiempos que el prototipo usa durante su funcionamiento, permanece activo durante  $T_1 + T_2$ , en modo *sleep* durante  $T_s$  y en modo de transmisión durante  $T_{tx}$ . A continuación, se analiza los períodos de transmisión usando SF9 y SF10.

#### 5.4.2.1. Transmisión LoRa SF9

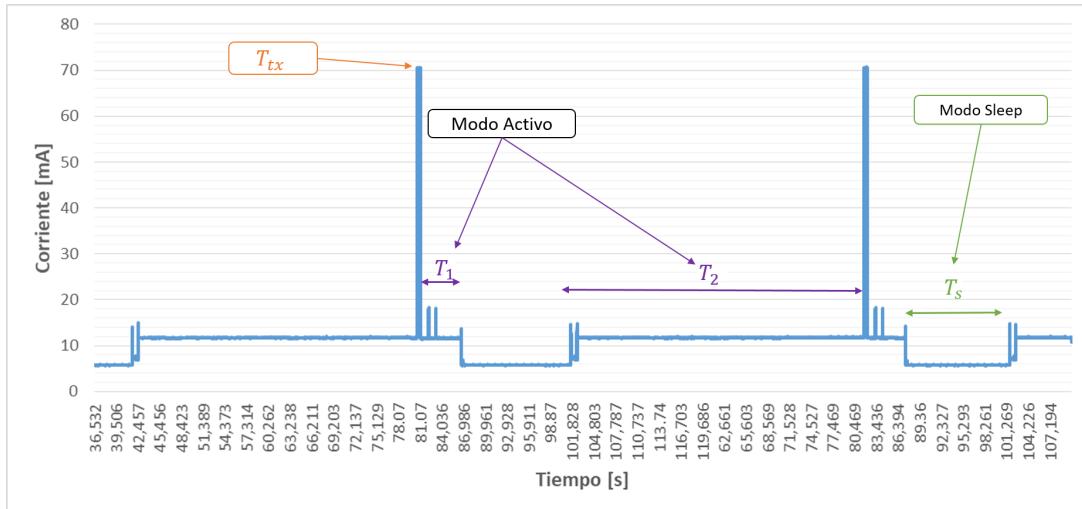


Figura 5.4.2: Corriente consumida durante las etapas de funcionamiento usando SF9.

A partir de la Figura 5.4.2 para SF9, la duración total durante el modo activo es  $T_1 + T_2$  obteniendo  $20.58 + 5.885 = 26.46$  s y para la etapa de transmisión  $T_{tx}$  con una duración de 0.24 s. En cuanto al periodo

de transmisión en LoRa (ver Figura 5.4.3), se calcula una corriente de transmisión promedio  $I_{tx}$  de 73.6 mA. Por otra parte, en relación al modo *sleep*, tiene una duración  $T_s$  de 33.3 s.

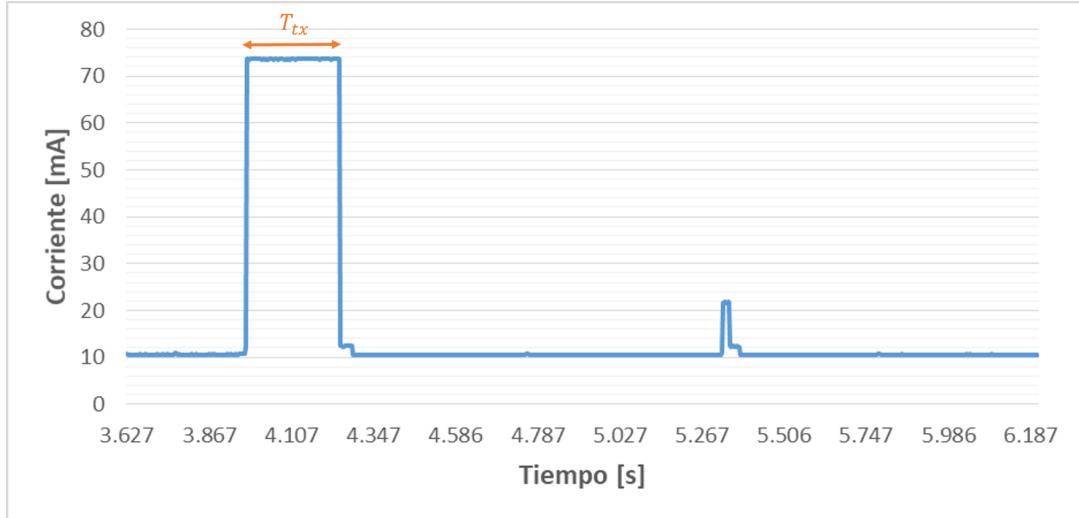


Figura 5.4.3: Corriente demandada durante la etapa de transmisión LoRa usando SF9.

#### 5.4.2.2. Transmisión LoRa SF10

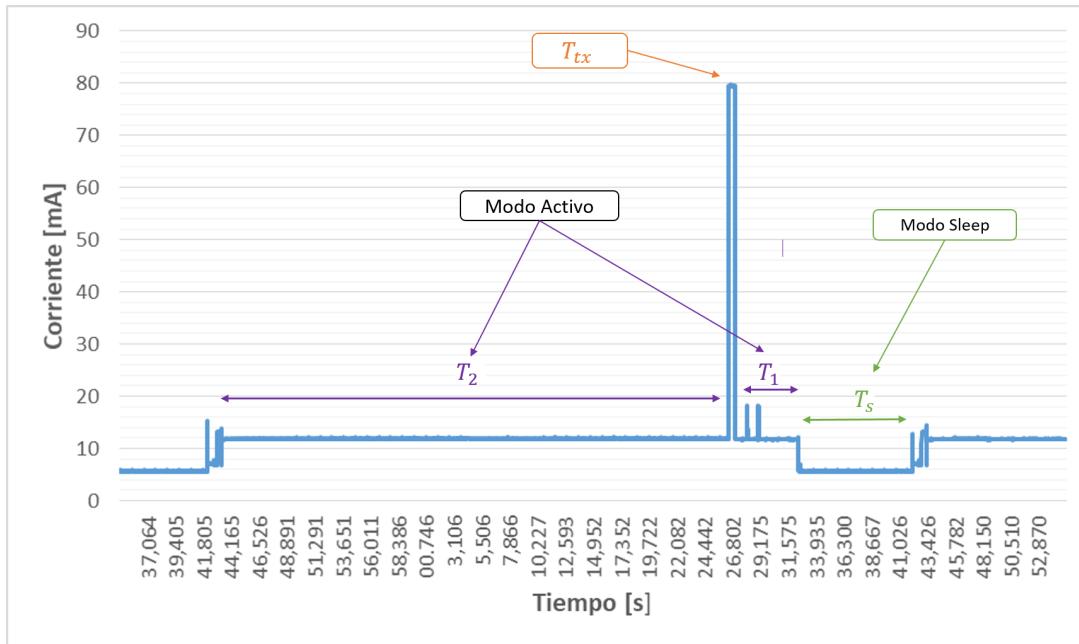


Figura 5.4.4: Corriente consumida durante las etapas de funcionamiento usando SF10.

En la Figura 5.4.4 se observa un ciclo de funcionamiento al utilizar SF10. Se nota un pequeño incremento en el tiempo del modo activo  $T_1+T_2$  llegando a 48.57 s. En cambio, el tiempo de transmisión  $T_{tx}$  incrementó significativamente a dos veces el valor para SF9, llegando a 0.48 s. Respecto a la corriente de transmisión promedio  $I_{tx}$ , también aumentó a 80 mA, como se observa en la Figura 5.4.5. En relación al modo *sleep*  $T_s$ , tiene una duración de 10.95 s.

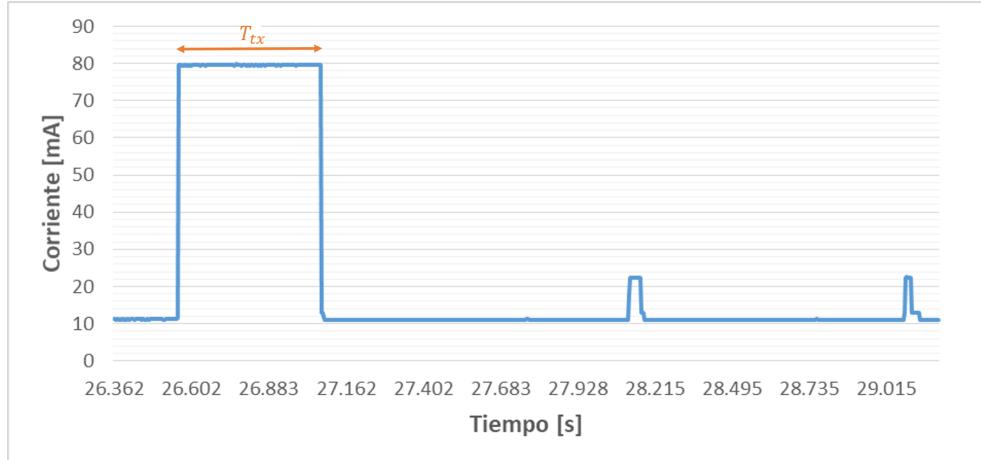


Figura 5.4.5: Corriente demandada durante la etapa de transmisión LoRa usando SF10.

### 5.4.3. Suministro energético

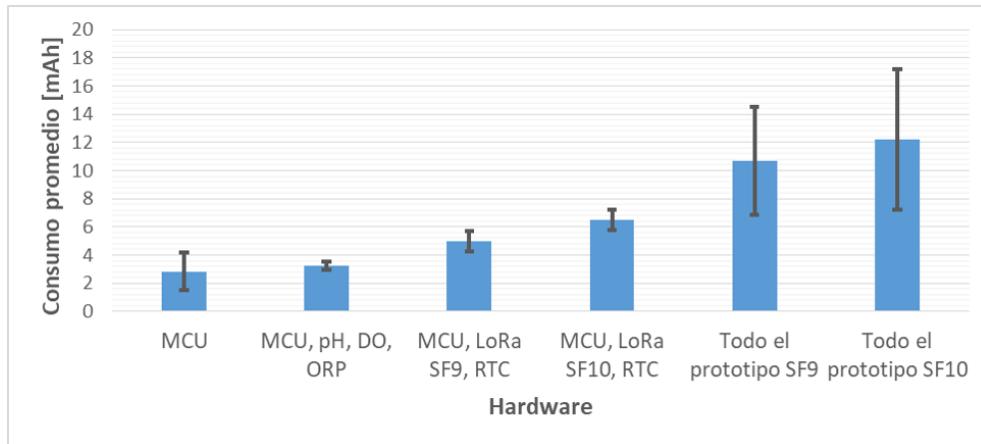


Figura 5.4.6: Energía requerida por el prototipo.

Para encontrar la cantidad de energía que requiere el prototipo y usando un intervalo de muestreo de los sensores de 1 min, se midió el consumo energético durante un periodo de 1 h para SF9 y SF10. En la Figura 5.4.6 se indica el consumo promedio obtenido y se grafica sus intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad. Se obtuvo un consumo promedio de 10.7 mAh usando SF9 y 12.17 mAh para SF10. Esta diferencia entre SF9 y SF10, se debe al incremento de la corriente requerida durante la transmisión inalámbrica junto a sus tiempos de transmisión y el tiempo en el modo activo. En cuanto a los módulos, sensores y periféricos, en la Figura 5.4.6 se indica los niveles de consumo obtenidos. En relación al MCU, tiene un consumo de 2.84 mAh, al adicionar los sensores su incremento no fue significativo llegando a 3.22 mAh, en cambio al usar el módulo LoRa y el RTC alcanzó los 5 mAh para SF9 y 6.5 mAh para SF10. Finalmente, se realizaron pruebas con un *PowerBank* de 10000 mAh para identificar el funcionamiento correcto del prototipo, donde se obtuvo aproximadamente 8 días de autonomía, debido a las pérdidas internas del *PowerBank* no se logró aprovechar toda su capacidad, no obstante, el tiempo fue suficiente para realizar la instalación y evaluación del prototipo. Por otra parte, cabe indicar que se realizaron pruebas con un panel solar de 21W, donde se observó que el tiempo de carga del *PowerBank* puede variar mucho de acuerdo a las condiciones ambientales, en condiciones ideales tardó 5 h y en malas condiciones más de 24 h.

## 5.5. Contrastación con estación comercial

En la presente sección se realizaron experimentos para describir el comportamiento de los sensores del prototipo, con la finalidad de comparar los datos obtenidos con equipos comerciales.

### 5.5.1. Verificación de medidas

Los experimentos se realizaron con el equipo profesional Multi 3630 IDS en un ambiente controlado dentro de los laboratorios de la Facultad de ciencias químicas de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). El equipo de referencia mide las variables de pH, DO y temperatura, además el registro de los datos se realiza de forma manual una vez la medida se encuentre estable, conforme lo recomienda el fabricante. En relación al prototipo, se configuró para registrar 100 capturas con un retardo de 4 s, los sensores analizados fueron de pH, DO y temperatura. Respecto al sensor de ORP, sus datos no se pudieron comparar porque el equipo de referencia no contaba con este sensor. En la Figura 5.5.1 se observa el escenario para los experimentos.

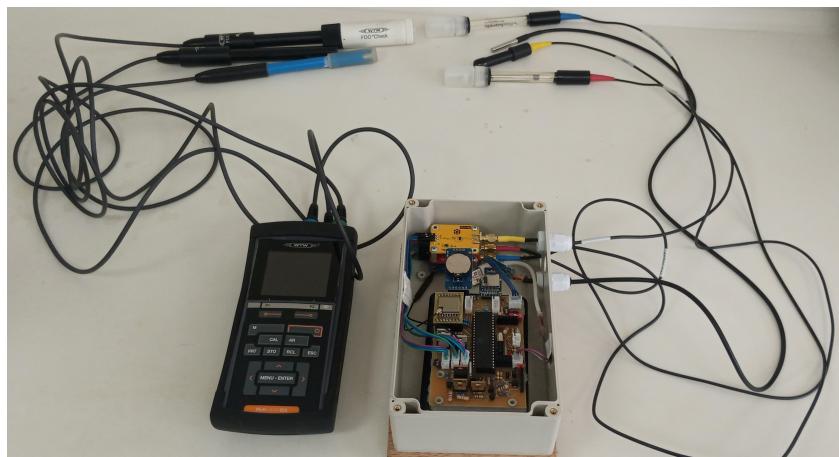


Figura 5.5.1: Equipo de referencia Multi 3630 IDS y prototipo.

Las mediciones se realizaron con 6 soluciones a distintas temperaturas. Para realizar las mediciones, las sondas de ambos equipos se colocaron en la misma solución como se observa en la Figura 5.5.2. Los datos se capturaron por un intervalo de 6 min en cada solución.

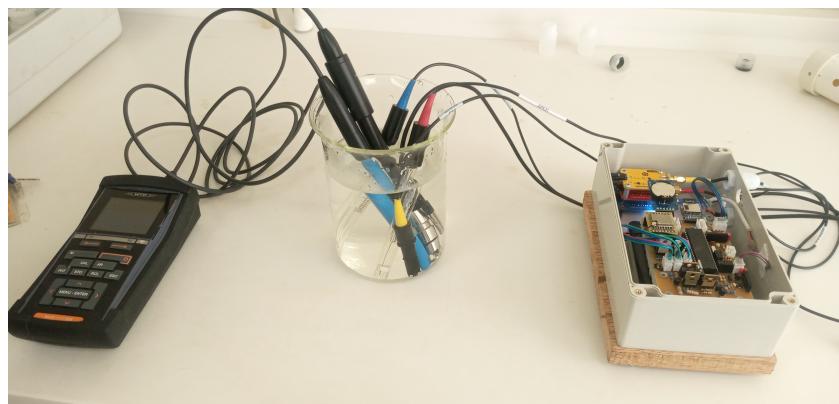


Figura 5.5.2: Experimentos realizados con los dos equipos.

### 5.5.2. Comparación de datos

En cada experimento el prototipo registra las muestras y las almacena en una tarjeta SD, en cambio para el equipo de referencia el registro se realiza manualmente y solo el valor estable. En este sentido, la comparación de los datos se lleva a cabo únicamente con el valor estable del equipo de referencia. La cantidad total de muestras del prototipo fue de 3600 y del equipo de referencia 18.

Por otra parte, cabe recalcar que el equipo profesional fue calibrado días antes de realizar el experimento, por tanto, los datos obtenidos de dicho equipo tienen un error mínimo o nulo y se pueden utilizar como referencia. Una vez obtenida las medidas se analiza el error relativo de estas. En (5.1) se indica la fórmula para calcular el error relativo, el dato *valor referencia* es el valor obtenido por el equipo profesional, mientras que el *valor obtenido* es el dato que hemos adquirido de los sensores del prototipo.

$$\text{Error}_{\text{relativo}} = \frac{\text{valor}_{\text{referencia}} - \text{valor}_{\text{obtenido}}}{\text{valor}_{\text{referencia}}} \times 100 \% \quad (5.1)$$

#### 5.5.2.1. Temperatura

En la Figura 5.5.3 se observa el valor promedio de los datos de temperatura del prototipo y los valores de referencia. Además, se grafica los intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad para los valores del prototipo y para el error promedio. Por otra parte, se observa que los valores del prototipo siguen una tendencia similar a los valores de referencia, presentando mínimas diferencias. Lo cual se refleja en el error relativo (ver Tabla 5.5.1) obtenido en cada experimento.



Figura 5.5.3: Datos de temperatura entre el equipo de referencia y el prototipo.

Tabla 5.5.1: Error relativo promedio del sensor de temperatura.

Experimento	Valor promedio prototipo °C	Valor referencia °C	Error relativo promedio %
Test 1	22.78	22.65	-0.61
Test 2	36.22	34.6	-4.68
Test 3	23.56	23.35	-0.93
Test 4	21.27	21.05	-1.08
Test 5	32.02	32.6	1.76
Test 6	36.24	36	-0.68

Como se aprecia en la Figura 5.5.3 los intervalos de confianza crecen cuando la temperatura incrementa, en cambio al disminuir se observa lo contrario, tanto para las muestras del prototipo y para el error promedio. En cuanto al error relativo, se tiene un máximo de 1.76 % y un mínimo de -4.68 %. Por otra parte, se observaron desviaciones por debajo del nivel de precisión del sensor ( $\pm 0.5$  °C), cuando los cambios de temperatura no son significativos (test 1, 3, 4 y 6) y los errores mínimos ocurren a menor temperatura, por tanto, estos niveles de error serían aceptables para trabajar con dicho sensor y adecuados para el sitio de estudio donde las temperaturas varían entre 10 a 15 °C. Además, cabe indicar que los métodos de medición de cada sensor son diferentes, sin embargo, no se observa diferencias significativas en los datos.

### 5.5.2.2. Potencial de hidrógeno

En relación al potencial de hidrógeno (pH), la Figura 5.5.4 presenta el valor promedio de las muestras del prototipo y se incluyen los valores de referencia. Adicionalmente, se grafica los intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad para los valores del prototipo y para el error promedio. En este caso, las tendencias de los datos en ambos equipos presentan diferencias, además los datos con menor error fueron en los test 3 y 4 donde los cambios de temperatura fueron mínimos. En relación al error relativo, en la Tabla 5.5.2 se indican los valores obtenidos en los experimentos.

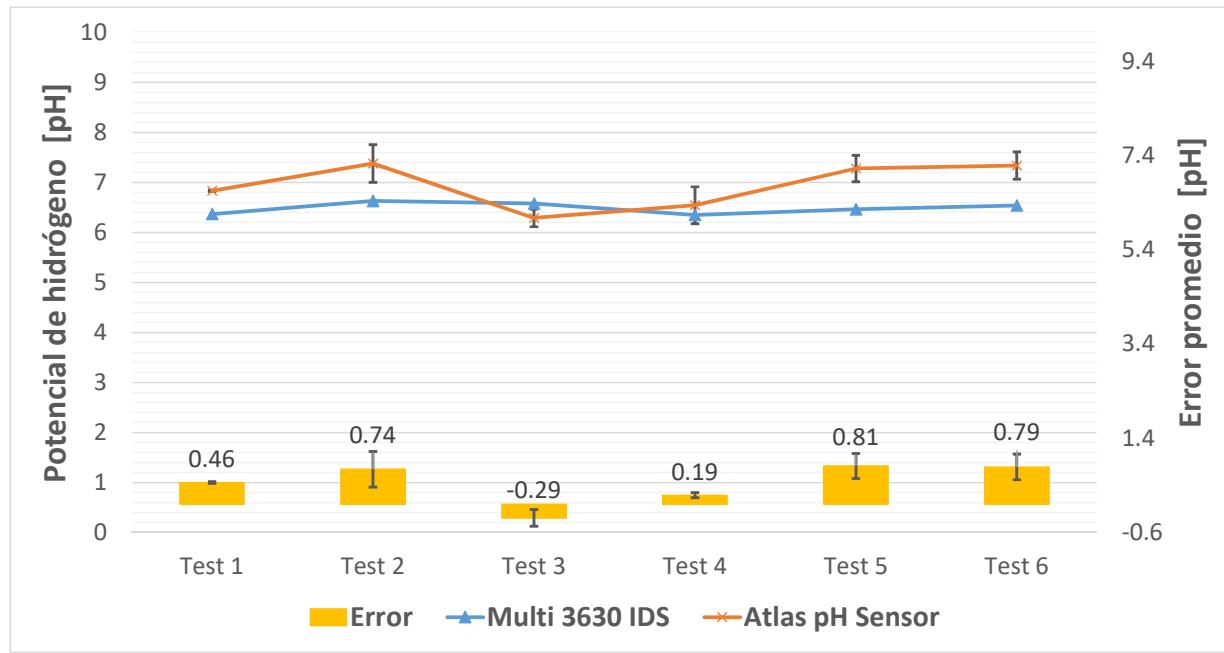


Figura 5.5.4: Datos del potencial de hidrógeno entre el equipo de referencia y el prototipo.

Tabla 5.5.2: Error relativo promedio del sensor de potencial de hidrógeno.

Experimento	Valor promedio prototipo pH	Valor referencia pH	Error relativo promedio %
Test 1	6.83	6.367	-7.32
Test 2	7.37	6.63	-11.30
Test 3	6.28	6.58	4.42
Test 4	6.54	6.35	-3.05
Test 5	7.27	6.461	-12.64
Test 6	7.33	6.54	-12.18

En la Figura 5.5.4 se observa que los intervalos de confianza son significativos, indicando variación en las muestras del prototipo. En relación al error relativo, se tiene un máximo de 4.42 % y un mínimo de -12.64 %. Respecto a los niveles de error promedio (ver Figura 5.5.4), se mantienen cercanos al nivel de precisión del sensor ( $\pm 0.2$  pH) cuando los niveles de temperatura disminuyen (test 1, 3 y 4). En este sentido, el nivel de desviación sería aceptable y el comportamiento del sensor en relación a la disminución de la temperatura es adecuado para trabajar en las lagunas del páramo, donde las temperaturas están por debajo de 16 °C. Por otra parte, cabe recalcar que ambos sensores usan métodos similares para realizar la medición.

### 5.5.2.3. Oxígeno disuelto

Respecto al oxígeno disuelto (DO), en la Figura 5.5.5 se indica el valor promedio de las muestras del prototipo y se incluyen los valores de referencia. Además, se grafica los intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad para los valores del prototipo y para el error promedio. De forma similar se encuentra que, el mínimo error del sensor ocurre en los test 3 y 4, en los test restantes se observa que las tendencias en los datos son diferentes. En cuanto al error relativo, en la Tabla 5.5.3 se muestran los valores obtenidos en cada experimento.

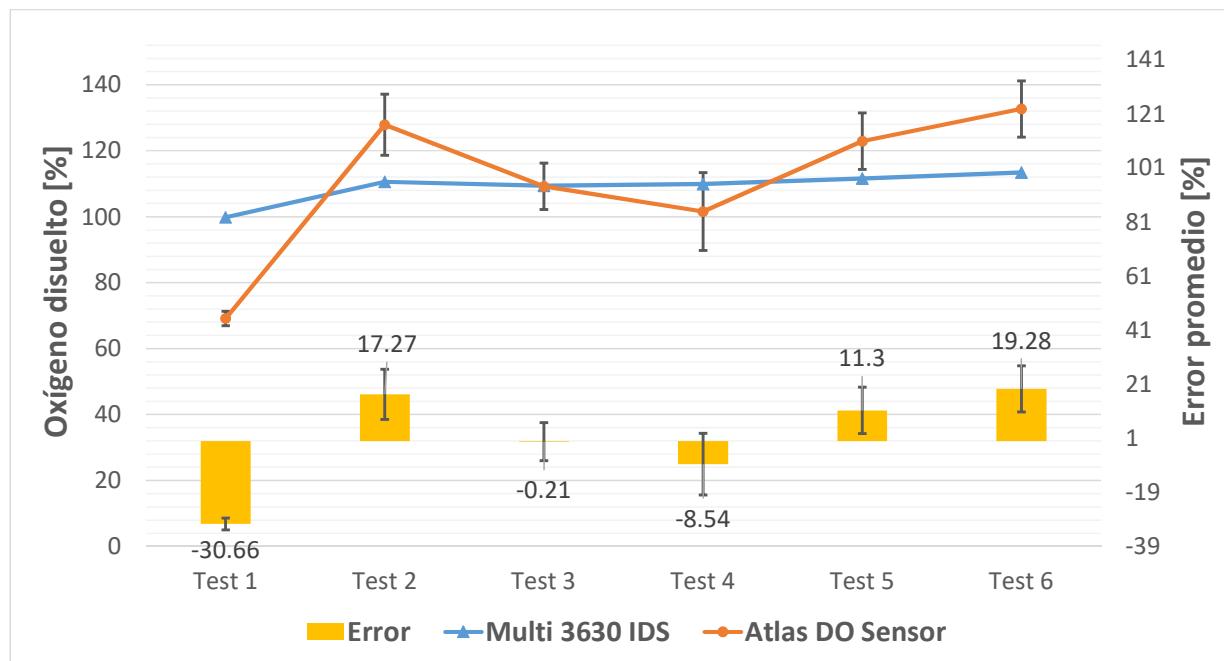


Figura 5.5.5: Datos de oxígeno disuelto entre el equipo de referencia y el prototipo.

Tabla 5.5.3: Error relativo promedio del sensor de oxígeno disuelto.

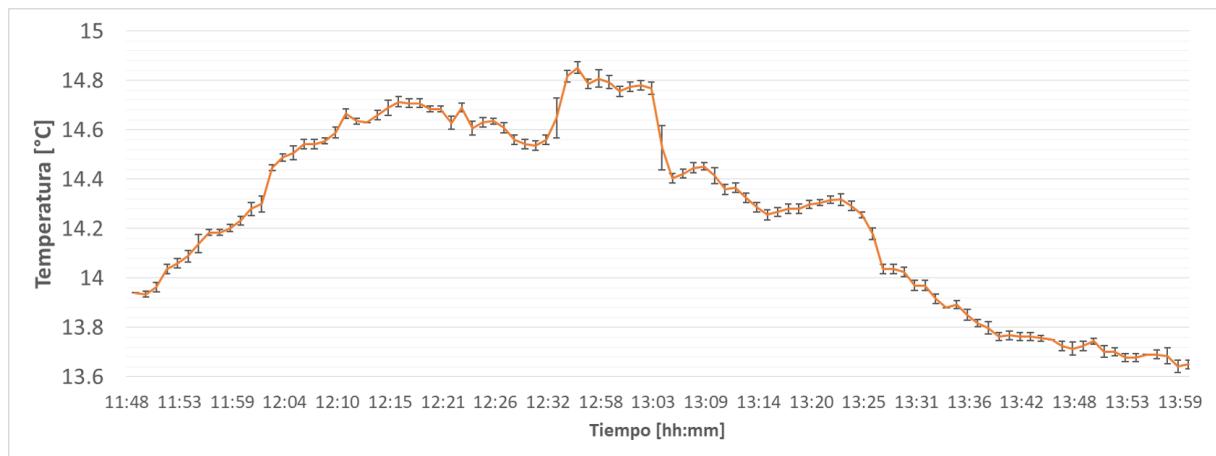
Experimento	Valor promedio prototipo %	Valor referencia %	Error relativo promedio %
Test 1	69.13	99.8	30.72
Test 2	127.87	110.6	-15.62
Test 3	109.18	109.4	0.19
Test 4	101.56	109.9	7.58
Test 5	122.90	111.6	-10.12
Test 6	132.68	113.4	-17.01

En la Figura 5.5.5 se aprecia que los intervalos de confianza son notables en casi todos los experimentos. Respecto al error relativo, llega a un máximo de 30.72 % y un mínimo de -17.01 %. En cuanto a los niveles de error promedio, este sensor presenta valores muy superiores a su nivel de precisión ( $\pm 2\%$ ) en casi todas las pruebas (test 1, 2, 4, 5 y 6), en este sentido las desviaciones serían muy significativas, lo cual puede deberse a los métodos de medición de cada sensor, el equipo de referencia emplea un principio óptico el cual es más preciso que el método electroquímico usado por el prototipo [85]. Por consiguiente, los valores registrados por dicho sensor requieren una revisión más detallada antes de su manipulación. En términos generales, los experimentos indican que las variaciones en los datos del sensor de temperatura son moderadas en comparación con las variaciones observadas en los valores de pH y DO.

## 5.6. Datos recolectados

Considerando que el prototipo está enfocado para funcionar en el páramo Tres Lagunas, se procedió a verificar su funcionamiento *in situ*. Debido a la falta de una infraestructura y la ubicación remota del sitio, las pruebas se limitaron a una duración de 3 h durante el día 21/10/2022. En relación a los datos recolectados, el intervalo de muestreo fue de 4 s. Con esta información, se procedió a graficar el promedio de las muestras en cada minuto y sus intervalos de confianza con un 95 % de fiabilidad.

En relación a los datos de temperatura, estos cambiaron a lo largo del tiempo, iniciando con un valor de 13.9 °C y llegando a un pico de 14.88 °C como se observa en la Figura 5.6.1a. En cuanto a los datos de pH (ver Figura 5.6.1b), los valores mínimos ocurrieron cerca a los máximos de temperatura. Respecto a los valores de ORP, se alcanzaron valores máximos de 432.30 mV cerca a los máximos de temperatura, el resto del tiempo se mantuvo con cambios mínimos como se aprecia en la Figura 5.6.1c. Los datos de DO presentaron mayor variación, aunque de forma similar alcanza los valores máximos cuando la temperatura incrementa significativamente, como se observa en la Figura 5.6.1d.



(a) Temperatura.

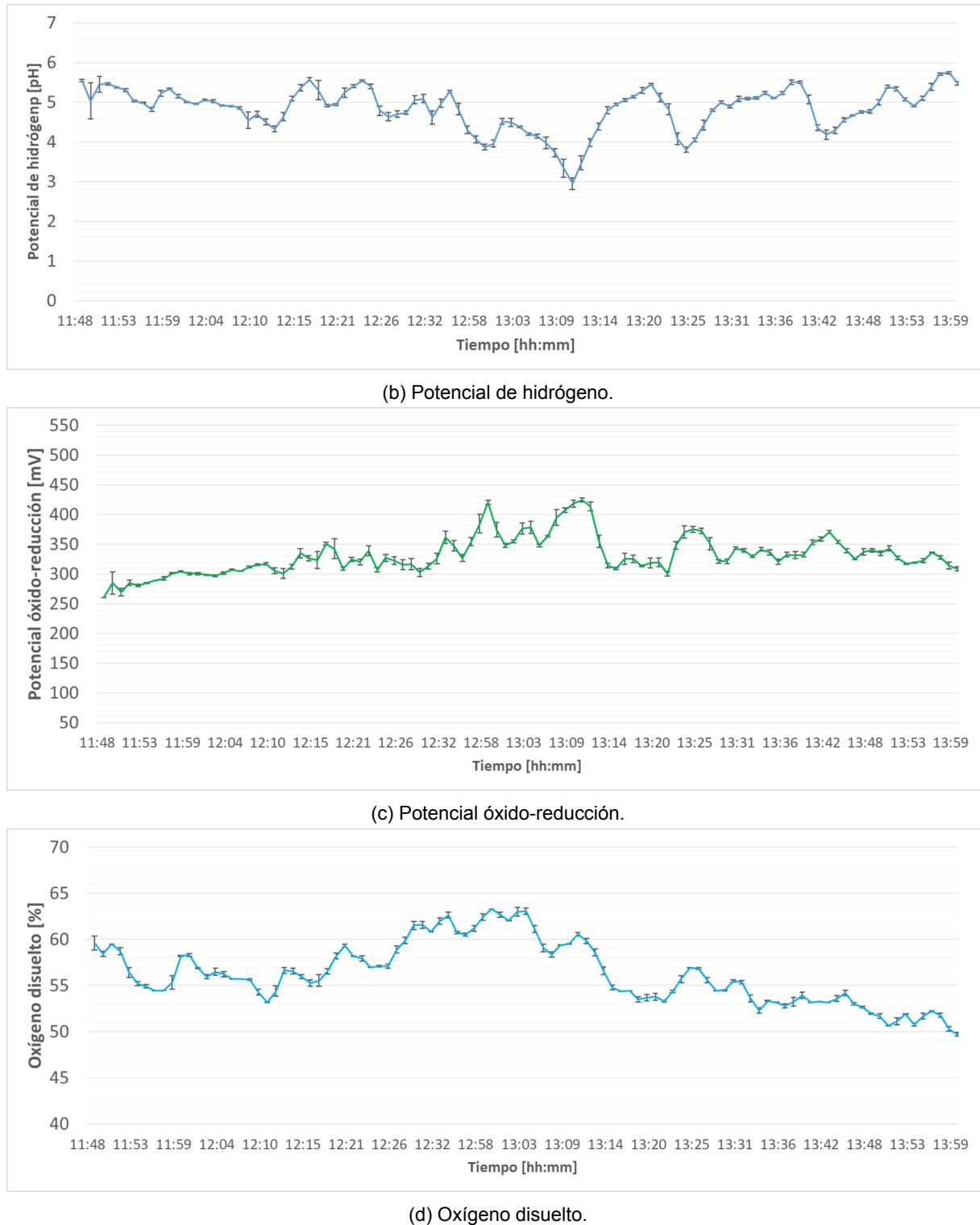




Figura 5.6.2: Instalación del prototipo en el sitio de estudio.

Para esta evaluación se eligió la laguna más accesible llamada Laguna grande, en la Figura 5.6.2 se indica la instalación de los equipos en este sitio.

Por otra parte, en la Tabla 5.6.1 se presentan los valores máximos, mínimos y promedios de los datos obtenidos usando el prototipo, donde se observan datos comparables con el trabajo realizado en [1], estudio que analizó 24 cuerpos de agua del humedal Tres Lagunas, el resumen de sus datos se indican en la Tabla 5.6.2. En cuanto a los valores de pH y temperatura, se indican datos promedios, máximos y mínimos similares a los datos del estudio de referencia (ver Tabla 5.6.2), sin embargo los mismo valores para el parámetro ORP fueron más altos, lo cual podría deberse a diferencias respecto de concentración de oxígeno y materia orgánica, característicos de cuerpos líticos de alta montaña.

Al observar los datos de temperatura (ver Figura 5.6.1a) entre las 12:30 pm y 13:10 pm, las variables (pH, ORP, DO) sufren variaciones interesantes durante el mismo periodo, que, podrían estar relacionados con los cambios de temperatura que a su vez depende de otras variables como la radiación solar, las cuales varían drásticamente a lo largo del día. En este sentido, un parámetro interesante a ser monitoreado a futuro, podría ser los niveles de radiación a las que están expuestos los cuerpos de agua. Por consiguiente, los datos recolectados a partir del prototipo sumarían información clave a efectos de mejorar la comprensión sobre los cambios fisicoquímicos que sufren estos ecosistemas acuáticos ubicados en los páramos tropicales andinos y que, adicionalmente, estarían influyendo sobre las condiciones ecológicas y del estado de conservación biológica y consecuentemente sobre el funcionamiento de estos ecosistemas frágiles. A partir de los datos recolectados, se evidencia la utilidad de la información obtenida mediante el prototipo para la medición de variables fisicoquímicas en el sitio de estudio, con enfoques de aplicación a corto, mediano y largo plazo.

Tabla 5.6.1: Resumen de los datos medidos con el prototipo.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Promedio
Temperatura (°C)	14.88	13.56	14.26
pH	5.77	2.61	4.83
ORP (mV)	432.30	259.41	331.55

Tabla 5.6.2: Resumen de los datos medidos en el estudio de referencia.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Promedio
Temperatura (°C)	15.29	10.7	13.21
pH	5.45	3.45	4.36
ORP (mV)	321	189	248

## 5.7. Detalle de costos

El presupuesto necesario para la construcción de la estación hídrica y el *Gateway* se presenta en la Tabla 5.7.1, sin considerar la mano de obra. En cuanto a la estación, se requiere de sensores, microprocesador, módulos de radiofrecuencia, tarjeta electrónica, componentes electrónicos, baterías y caja de protección. Para el *Gateway*, se considera el módulo de radiofrecuencia, la caja de protección, módulo 3G/4G Alcatel y sus componentes necesarios. Considerando la estación hídrica con el *Gateway* resulta un total de \$795 y únicamente la estación \$601.

En cuanto al equipo profesional Multi 3630 IDS empleado en los experimentos, el cual únicamente permite al usuario mediante un *display* observar los valores de las variables, posee un costo de \$10000, otro equipo con similares características es el HI98194 que tiene un costo de \$5000. En relación al prototipo desarrollado, este integra características de autonomía en la adquisición y transmisión de datos recolectados *in situ*, empleando la tecnología LoRa, además brinda accesibilidad de reconfiguración *software* y permite la incorporación de otros sensores, por tanto brinda mayores ventajas de uso al usuario.

Tabla 5.7.1: Costos generales del prototipo.

Cantidad	Componente	Estación	Costo unitario	Costo total
1	Sensor DO	nodo	173	173
1	Sensor pH	nodo	93	93
1	Sensor ORP	nodo	103	103
1	Sensor DS18B20	nodo	7	7
1	Módulo INA219	nodo	7	7
1	Placa electrónica	nodo	80	80
1	Módulo LoRa RA02	nodo	22	22
1	MCU ATmega1284P	nodo	30	30
2	PowerBank	nodo y GW	40	80
2	Caja IP65	nodo y GW	40	80
2	Módulo RTC DS3231	nodo y GW	6	12
1	MCU Heltec LoRa 32	GW	38	38
1	Módulo 3G/4G Alcatel	GW	70	70

## 5.8. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los experimentos realizados para validar el funcionamiento adecuado del prototipo a nivel de red, consumo energético y adquisición de datos. En este sentido, los resultados muestran claramente que es posible implementar el sistema en los escenarios de páramo.

Durante el análisis se observó que en general SF7 y SF8 tienen el peor rendimiento, además el PRR menor a 85 % es el aspecto más relevante que obliga a descartar estos factores. Entre las opciones restantes: SF 9, 10, 11 y 12, todas serían una buena opción, sin embargo, el *bit rate* disminuye a medida que el SF aumenta, por ejemplo SF12 en el páramo presenta un *bit rate* de 81 bits/s y para SF10 de 114 bits/s, lo que evidencia menos paquetes transmitidos y por lo tanto, menos recibidos a pesar que el PRR sea casi del 100 %. Con respecto al *delay*, también aumenta a medida que sube el SF y se observa claramente en el páramo, donde existe una diferencia de casi un segundo entre SF9 y SF12. Estos resultados reflejan que SFs mayores producen un mayor consumo de energía, porque requieren más tiempo para la transmisión. En el caso del RSSI, se observa que los SFs más bajos tienen una potencia de señal más fuerte, sin embargo, existe una mayor pérdida de paquetes. Es importante recordar que los SFs bajos son menos resistentes al ruido y tienen menos bits redundantes. Entonces, basados en las consideraciones anteriores, lo más adecuado es elegir el menor SF que presente un PRR alto, en el caso de la zona rural sería SF10 y en el páramo SF9. Con respecto al CR, la diferencia entre elegir uno u otro es mínima en todos los casos, a diferencia del SF, que sí afecta considerablemente a la red.

Comparar los resultados por cada punto facilita la elección del mejor escenario para LoRa, concluyendo que el mejor rendimiento corresponde con aquellos lugares que posean un área amplia libre de interferencias y con una línea de vista despejada entre el nodo y el GW. Esto se refleja claramente en la zona rural, donde el punto más alejado del nodo presenta mejores resultados que puntos más cercanos, esto es gracias a la línea de vista libre, ya que además el nodo y el GW se encontraban aproximadamente a la misma altura.

Para facilitar el análisis de los resultados se recomienda convertir todos los archivos JSON a pcap, con el objetivo de realizar un análisis preliminar en Wireshark. Posteriormente, basados en la información observada, detectar los parámetros de interés y utilizar los *scripts* del repositorio [lora-3lagunas](#) para facilitar la extracción individual de los parámetros.

Mediante los análisis de consumo energético se observa que al usar un *PowerBank* el prototipo alcanzó una autonomía de 8 días, lo cual limitaría su instalación por meses, para solventar esto se podrían evaluar otras baterías y agregar un sistema de carga, por ejemplo, usando paneles solares. En términos de rendimiento energético el mejor factor de ensanchamiento es SF9 y tomando en cuenta que los análisis de red muestran una similitud para SF9 y SF10, la mejor opción es seleccionar SF9 para las operaciones del nodo.

Respecto al comportamiento de los sensores, la comparación realizada con el equipo comercial indica el error relativo mínimo de -0.61 % para el sensor de temperatura en todos los experimentos, en cambio el sensor de oxígeno disuelto tuvo el error más alto de 30.72 %. En cuanto al sensor de pH, se observa un error máximo de -12,64 %. En relación al sensor de DO y pH, tuvieron los intervalos de confianza más grandes, indicando que las muestras varían más, una posible causa sería el tiempo de estabilización que requiere el sensor, dicho parámetro no se encuentra especificado por el fabricante, en este sentido es recomendable realizar pruebas adicionales para determinar dicho valor y tratar de reducir el error.

La instalación del prototipo en el sitio de estudio verificó el correcto funcionamiento de los equipos, permitiendo obtener datos (aunque las mediciones pueden tener ciertas imprecisiones) de las lagunas sin inconvenientes. La presencia de viento, lluvia y sol durante la recolección de datos, ayudaron a comprobar que la protección IP65 es adecuada.

## **Capítulo 6**

---

### **Conclusiones y recomendaciones**

---

#### **6.1. Conclusiones**

La adquisición de variables fisicoquímicas en lugares estratégicos, como las fuentes de agua en los páramos andinos, es esencial para la implementación de medidas por parte de organismos gubernamentales. En este sentido, los sistemas de monitoreo en tiempo real permiten mejorar la gestión de los recursos hídricos claves para el desarrollo de la población, a través del análisis pertinente de los datos recolectados. En estos escenarios remotos, una herramienta óptima para construir los sistemas de transmisión de datos es LoRa, debido que esta tecnología puede adaptarse a diversos requerimientos de la red mediante una configuración adecuada de sus parámetros de transmisión.

El prototipo desarrollado y probado en el sitio de estudio para la adquisición y transmisión de variables hídricas, permite establecer el punto de partida del análisis del comportamiento y el estado de estos ecosistemas acuáticos en tiempo real. El prototipo permite medir variables fisicoquímicas a través de los sensores respectivos y los transmite de forma inalámbrica empleando la tecnología LoRa hacia el GW. Adicionalmente, se dispone de puertos libres digitales y analógicos para adaptar más sensores y módulos que se requieran para medir otras variables de interés.

Mediante la plataforma de Node-Red se elaboró un sistema de monitoreo, el cual recibe la información desde TTN a través del protocolo MQTT y permite al usuario analizar los datos fisicoquímicos de las lagunas, además brinda herramientas para determinar variables estadísticas de las muestras. En este sentido, dicha plataforma facilita la administración y gestión de los recursos hídricos del sitio de estudio.

La arquitectura de la red LoRa se ha evaluado mediante pruebas realizadas en ambientes rurales y de alta montaña, en donde se ha obtenido un alcance máximo de 2.2 km con línea de vista, obteniendo una adecuada transmisión de datos. En cuanto al parámetro de *delay*, se ha podido determinar su comportamiento mediante las pruebas realizadas. Sin embargo, en relación al parámetro de *jitter*, los datos obtenidos no han mostrado una tendencia clara, por lo que se sugiere el uso de un reloj de mayor precisión para obtener información adicional sobre este parámetro. En cuanto al rendimiento energético, las pruebas han permitido caracterizar el modo de funcionamiento y la energía requerida por el prototipo.

El presente estudio contribuye directamente a las comunidades locales que se benefician de los servicios hídricos en los cantones Oña, Saraguro y Yacuambi al sur del Ecuador, a través del monitoreo continuo de variables fisicoquímicas para mitigar los efectos del cambio climático y la contaminación antrópica en este complejo de lagunas.

#### **6.2. Recomendaciones**

Apoyado en los resultados obtenidos dentro del alcance de la tesis se destaca que el prototipo desarrollado tiene las funcionalidades necesarias para ser utilizado en aplicaciones reales, tomando en cuenta las diferencias en los datos respecto a un equipo comercial. El funcionamiento correcto del equipo ha

sido probado en campo y posee libertad para adaptar más sensores a través de los puertos disponibles y modificando el *software* desarrollado en Arduino. En este sentido, se podrían abrir más campos de investigación relacionados a otras datos fisicoquímicos como clorofila, fosfato, fitoplancton, nitratos, entre otros.

El acceso a la red móvil en el sitio de estudio es muy limitado, en este sentido, la ubicación del GW resulta un factor clave para la recolección de la información de los nodos y subirlos al servidor, por tanto, la elección del mejor punto para el GW debe ser en función de evaluaciones de la red móvil. En el presente estudio solo se evaluó un punto, sin embargo, existen más sitios que se podrían considerar para aumentar los GWs y de esta manera incrementar la capacidad de la red.

### **6.3. Trabajos futuros**

En este estudio no se desarrolló el diseño (*hardware* y *software*) de un GW LoRa y se limita a la operación de un nodo. Como trabajo futuro se plantea el diseño de un GW de bajo consumo con varios canales disponibles y la evaluación de red empleando múltiples nodos y GWs, permitiendo incrementar las funcionalidades, puntos de monitoreo, una mejor cobertura y en general mejorar las características de la red.

En este trabajo se evaluaron solo aquellas lagunas que estarían en mayor riesgo, sin embargo, el resto de lagunas se encuentran separadas distancias mayores a 3 km del GW. En este sentido, la implementación de un protocolo de comunicación multisalto sería muy importante para brindar cobertura a todo el complejo del ecosistema Tres Lagunas y facilitar la instalación de estaciones más allá del alcance del GW.

Dado que se llevó a cabo la contrastación exclusivamente con un equipo, como trabajo futuro se propone comparar el prototipo con otros equipos comerciales para verificar la diferencia de los datos. Esto ayudaría a determinar si el modelo cumple con los estándares de precisión necesarios. Además, comparar el prototipo con equipos comerciales permitiría optimizar el diseño y la implementación. De esta manera, se podrían tomar medidas para mejorar el rendimiento. También permitiría evaluar el costo-efectividad del modelo en comparación con las opciones comerciales disponibles en el mercado.

---

## Referencias

---

- [1] A. Cartuche, K. M. Manoylov, B. W. Ibelings, and P. Venail, "Highest composition dissimilarity among phytoplankton communities at intermediate environmental distances across high-altitude tropical lakes," *Water*, vol. 13, no. 10, p. 1378, 2021.
- [2] L. Alliance, "LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL." [Online]. Available: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [3] M. Alenezi, K. K. Chai, Y. Chen, and S. Jimaa, "Ultra-dense lorawan: Reviews and challenges," *IET Communications*, vol. 14, no. 9, pp. 1361–1371, 2020.
- [4] M. A. Ertürk, M. A. Aydin, M. T. Büyükakkaşlar, and H. Evrigen, "A survey on lorawan architecture, protocol and technologies," *Future Internet*, vol. 11, no. 10, p. 216, 2019.
- [5] "MQTT - The Standard for IoT Messaging." [Online]. Available: <https://mqtt.org/>
- [6] "Microchip ATMEGA1284P-PU, 8bit AVR Microcontroller, ATmega, 20MHz, 128 kB Flash, 40-Pin PDIP - RS Components Vietnam." [Online]. Available: <https://www.rs-online.vn/p/mcu-8bit-atmega-avr-128kb-flash-pdip40-w/>
- [7] "Módulo Transceptor LoRa SX1278 Ra-02 433 Mhz con Base - Electronilab." [Online]. Available: <https://electronilab.co/tienda/modulo-transceptor-lora-sx1278-ra-02-433-mhz-con-base/>
- [8] "Real time clock module DS3231." [Online]. Available: <https://opencircuit.shop/product/real-time-clock-module-ds3231>
- [9] "Sensor de temperatura DS18B20 tipo sonda - Electronilab." [Online]. Available: <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-temperatura-ds18b20-tipo-sonda/>
- [10] "Atlas Scientific | Environmental Robotics." [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/>
- [11] P. León Ortiz, "Influencia Del Calentamiento Global En Los Ecosistemas Terrestres Del Perú," pp. 1–78, 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/4036>
- [12] M. Castro, "Proyecto "Creación de Capacidades para la Valoración Socioeconómica de los humedales altoandinos": Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos," 2011.
- [13] J. P. Briceño Salas, "Percepción de los cambios ambientales en los humedales de Oña-Saraguro," Ph.D. dissertation, UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA, 2014.
- [14] Arduino, "Low-Power." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/low-power/>
- [15] A.-T. Technology, "Ra-01/Ra-02 LoRa Module User Manual." [Online]. Available: <https://docs.ai-thinker.com/en/lora/man>

- [16] U. ElizondoFernando, "Utilización de estaciones meteorológicas automáticas como nueva alternativa para el registro y transmisión de datos," *Posgrado y Sociedad Revista Electrónica del Sistema de Estudios de Posgrado*, vol. 11, no. 1, pp. 33–49, sep. 2017. [Online]. Available: <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/posgrado/article/view/1881>
- [17] A. Tobajas García, "Diseño e implementación de una estación meteorológica con raspberry pi," 2016.
- [18] Semtech, "LoRa PHY | Semtech," 2021. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>
- [19] ——, "LoRaWAN Standard | LoRa | Semtech," 2021. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/lora/lorawan-standard>
- [20] M. A. Moya Quimbita, "Evaluación de pasarela lora/lorawan en entornos urbanos," 2018.
- [21] Libelium, "Transmission modes - lora networking guide," 2020. [Online]. Available: [https://development.libelium.com/lora\\_networking\\_guide/transmission-modes](https://development.libelium.com/lora_networking_guide/transmission-modes)
- [22] J. Höchst, L. Baumgärtner, F. Kuntke, A. Penning, A. Sterz, and B. Freisleben, "Lora-based device-to-device smartphone communication for crisis scenarios," in *Proceedings of the 17th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM)*, 2020.
- [23] Semtech, "Lora and lorawan: Technical overview | developer portal." [Online]. Available: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [24] B. Reynders and S. Pollin, "Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication," in *2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [25] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of lorawan for iot: From technology to application," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3995, 2018.
- [26] M. Hassan, "LoRa and LoRaWAN," *Wireless and Mobile Networking*, no. December 2019, pp. 218–230, 2022.
- [27] E. Borja, "Diseño de una arquitectura usando el protocolo Message Queue Telemetry Transport (MQTT) sobre plataformas de bajo coste, para monitorización de procesos industriales." 2020. [Online]. Available: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/14099/1/20T01337.pdf>
- [28] P. R. Egli, "An introduction to mqtt, a protocol for m2m and iot applications," *Indigoo. com*, 2015.
- [29] GoLinuxCloud, "Wireshark Dissector Tutorial [Practical Examples] | GoLinuxCloud," 2022. [Online]. Available: <https://www.golinuxcloud.com/wireshark-dissector-tutorial/>
- [30] R. C. Núñez and J. N. Ortiz, "Optimización de mqtt en redes lorawan."
- [31] E. Ollora Zaballa *et al.*, "Implementación de una plataforma de análisis y visualización de datos iot multi-protocolo en tiempo real sobre node-red," 2021.
- [32] J. Dugan, S. Elliott, B. A. Mah, J. Poskanzer, and K. Prabhu, "iPerf - The TCP, UDP and SCTP network bandwidth measurement tool." [Online]. Available: <https://iperf.fr/>
- [33] F. Ahmadi, K. Dahlgren, A. Karlsson Solaiman, and A. Rabitsch, *Adding support for NEAT to iperf3*. Karlstads universitet, 2018.
- [34] D. A. Segovia Cardozo, L. Rodríguez Sinobas, S. Zubelzu Mínguez, and A. Díez Herrero, "Development and programming of low-cost sensors for hydro-meteorological monitoring in small basins," 2019.

- [35] H. Li, Y. Zhu, Y. Zhao, T. Chen, Y. Jiang, Y. Shan, Y. Liu, J. Mu, X. Yin, D. Wu, *et al.*, “Evaluation of the performance of low-cost air quality sensors at a high mountain station with complex meteorological conditions,” *Atmosphere*, vol. 11, no. 2, p. 212, 2020.
- [36] K. Tatsumi, T. Yamazaki, and H. Ishikawa, “An open-source, low-cost measurement system for collecting hydrometeorological data in the open field,” *Technologies*, vol. 9, no. 4, p. 78, 2021.
- [37] E. López, C. Vionnet, P. Ferrer-Cid, J. M. Barcelo-Ordinas, J. Garcia-Vidal, G. Contini, J. Prodolliet, and J. Maiztegui, “A low-power iot device for measuring water table levels and soil moisture to ease increased crop yields,” *Sensors*, vol. 22, no. 18, p. 6840, 2022.
- [38] U. Ahmed, R. Mumtaz, H. Anwar, A. A. Shah, R. Irfan, and J. García-Nieto, “Efficient water quality prediction using supervised machine learning,” *Water*, vol. 11, no. 11, p. 2210, 2019.
- [39] L. Méndez-Barroso, J. Rivas-Márquez, I. Sosa-Tinoco, and A. Robles-Morúa, “Design and implementation of a low-cost multiparameter probe to evaluate the temporal variations of water quality conditions on an estuarine lagoon system,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 11, pp. 1–18, 2020.
- [40] F. Mao, K. Khamis, J. Clark, S. Krause, W. Buytaert, B. F. Ochoa-Tocachi, and D. M. Hannah, “Moving beyond the technology: a socio-technical roadmap for low-cost water sensor network applications,” *Environmental Science & Technology*, vol. 54, no. 15, pp. 9145–9158, 2020.
- [41] C. A. Trasviña Moreno, “Redes autónomas e inteligentes para la monitorización de variables ambientales,” Zaragoza. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/79391/files/ESIS-2019-115.pdf>, 2019.
- [42] O. Pieters, E. Deprost, J. Van Der Donckt, L. Brosens, P. Sanczuk, P. Vangansbeke, T. De Swaef, P. De Frenne, and F. Wyffels, “Mirra: A modular and cost-effective microclimate monitoring system for real-time remote applications,” *Sensors*, vol. 21, no. 13, p. 4615, 2021.
- [43] J. Wild, M. Kopecký, M. Macek, M. Šanda, J. Jankovec, and T. Haase, “Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 268, pp. 40–47, 2019.
- [44] M. Orozco-Alzate, J. J. Velez-Upegui, and N. D. Duque-Mendez, “Data acquisition for hydrometeorological monitoring,” *IEEE Potentials*, vol. 33, no. 5, pp. 22–28, 2014.
- [45] G. S. Menon, M. V. Ramesh, and P. Divya, “A low cost wireless sensor network for water quality monitoring in natural water bodies,” in *2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*. IEEE, 2017, pp. 1–8.
- [46] R. S. Carvalho, J. M. Santos, J. C. Martins, J. F. Santos, P. Palma, and J. Jasna Caeiro, “Hydric resources and meteorological monitoring iot system,” in *IFIP International Internet of Things Conference*. Springer, 2021, pp. 252–267.
- [47] S. Kimothi, R. Singh, A. Gehlot, S. V. Akram, P. K. Malik, A. Gupta, and N. Bilandi, “Intelligent energy and ecosystem for real-time monitoring of glaciers,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 102, p. 108163, 2022.
- [48] A. M. Manoharan and V. Rathinasabapathy, “Smart water quality monitoring and metering using lora for smart villages,” in *2018 2nd International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*. IEEE, 2018, pp. 57–61.
- [49] O. O. Ajayi, A. B. Bagula, H. C. Maluleke, Z. Gaffoor, N. Jovanovic, and K. C. Pietersen, “Waternet: A network for monitoring and assessing water quality for drinking and irrigation purposes,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 48 318–48 337, 2022.

- [50] O. H. Kombo, S. Kumaran, and A. Bovim, "Design and application of a low-cost, low-power, lora-gsm, iot enabled system for monitoring of groundwater resources with energy harvesting integration," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 128 417–128 433, 2021.
- [51] M. Bathre and P. K. Das, "Water supply monitoring system with self-powered lora based wireless sensor system powered by solar and hydroelectric energy harvester," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 82, p. 103630, 2022.
- [52] M. Zarzosa, D. Auccapuri, and J. Paco, "Design and development of a multi-protocol and multi-function datalogger for measuring hydric balance in a forest environment," in *2020 IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [53] K. P. Orellana, F. A. Salinas, G. L. Novillo, A. V. Rodas, and I. M. Ávila, "Registrador de datos pluviométricos basado en el microcontrolador atmel y el transceptor lora," *Latin-American Journal of Computing*, vol. 7, no. 2, pp. 108–123, 2020.
- [54] J. Guaman, F. Astudillo-Salinas, A. Vazquez-Rodas, L. I. Minchala, and S. Placencia, "Water level monitoring system based on lopy4 microcontroller with lora technology," in *2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [55] S. Placencia, F. Astudillo-Salinas, A. Vazquez-Rodas, L. I. Minchala, and J. Guaman, "Rainfall intensity datalogger system. lopy4-based design and implementation," in *Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks*, 2019, pp. 45–50.
- [56] A. M. V. Rodas, F. A. Salinas, and L. I. Minchala, "Aplicación de tecnologías inalámbricas al monitoreo climatológico en la cuenca del río paute," *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información: RITI*, vol. 9, no. 17, pp. 89–96, 2021.
- [57] M. Bor and U. Roedig, "Lora transmission parameter selection," in *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. IEEE, 2017, pp. 27–34.
- [58] S. Ko, H. Song, Y. Cho, J. Chung, S. Kim, D. Yim, D. Jin, and A. Smith, "Lora network performance comparison between open area and tree farm based on phy factors," in *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [59] M. Cattani, C. A. Boano, and K. Römer, "An experimental evaluation of the reliability of lora long-range low-power wireless communication," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 6, no. 2, p. 7, 2017.
- [60] V. H. Lopez Chalacan, "Performance evaluation of long range (lora) wireless rf technology for the internet of things (iot) using dragino lora at 915 mhz," 2020.
- [61] M. P. Gutama Morocho and J. J. Vázquez Patiño, "Prototipo de un dispositivo de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos meteorológicos usando los transductores de la estación davis 6162 wireless vantage pro2 plu."
- [62] J. P. Narváez Bernal, "Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología lora," 2019.
- [63] O. Iova, A. Murphy, G. P. Picco, L. Ghiro, D. Molteni, F. Ossi, and F. Cagnacci, "Lora from the city to the mountains: Exploration of hardware and environmental factors," in *Proceedings of the 2017 International conference on embedded wireless systems and networks*, 2017.
- [64] Z. Zhang, B. Zhang, and X. Zhang, "Performance research of lora at high transmission rate," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1544, no. 1. IOP Publishing, 2020, p. 012177.

- [65] E. F. Rivera Guzmán, E. D. Mañay Chochos, M. D. Chiliquinga Malliquinga, P. F. Baldeón Egas, and R. M. Toasa Guachi, "Lora network-based system for monitoring the agricultural sector in andean areas: Case study ecuador," *Sensors*, vol. 22, no. 18, p. 6743, 2022.
- [66] J. Cecílio, P. M. Ferreira, and A. Casimiro, "Evaluation of lora technology in flooding prevention scenarios," *Sensors*, vol. 20, no. 14, p. 4034, 2020.
- [67] P. Avila-Campos, F. Astudillo-Salinas, A. Vazquez-Rodas, and A. Araujo, "Evaluation of lorawan transmission range for wireless sensor networks in riparian forests," in *Proceedings of the 22nd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, 2019, pp. 199–206.
- [68] M. O. Ojo, D. Adami, and S. Giordano, "Experimental evaluation of a lora wildlife monitoring network in a forest vegetation area," *Future Internet*, vol. 13, no. 5, p. 115, 2021.
- [69] A. E. Ferreira, F. M. Ortiz, L. H. M. Costa, B. Foubert, I. Amadou, and N. Mitton, "A study of the lora signal propagation in forest, urban, and suburban environments," *Annals of Telecommunications*, vol. 75, no. 7, pp. 333–351, 2020.
- [70] P. A. Beddows and E. K. Mallon, "Cave pearl data logger: A flexible arduino-based logging platform for long-term monitoring in harsh environments," *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 530, 2018.
- [71] I. I. E. Commission, "Ip ratings." [Online]. Available: <https://www.iec.ch/ip-ratings>
- [72] D. Federico and D. R. Edison, "Lorawan – codec/decode para datos en tramas." [Online]. Available: <http://blog.espol.edu.ec/gimi/lorawan-codec-decode-para-datos-en-tramas/>
- [73] "Digital thermometer DS18B20." [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [74] F. M. Morel and J. G. Hering, *Principles and applications of aquatic chemistry*. John Wiley & Sons, 1993.
- [75] "Atlas Gravity Analog pH kit." [Online]. Available: <https://files.atlas-scientific.com/Gravity-pH-datasheet.pdf>
- [76] "Atlas Gravity Analog ORP kit." [Online]. Available: <https://files.atlas-scientific.com/Gravity-ORP-datasheet.pdf>
- [77] C. E. Boyd, *Water quality: an introduction*. Springer Nature, 2019.
- [78] "Atlas Gravity Analog DO kit." [Online]. Available: [https://files.atlas-scientific.com/Gravity\\_DO\\_datasheet.pdf](https://files.atlas-scientific.com/Gravity_DO_datasheet.pdf)
- [79] "INA219 Current Sensor, url = <https://www.ti.com/lit/gpn/ina219>, urldate = 2022-08-01."
- [80] H. Automation, "WIFI LoRa 32 (V2) - Heltec Automation," 2018. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>
- [81] A. Cartuche, Z. Guan, B. W. Ibelings, and P. Venail, "Phytoplankton diversity relates negatively with productivity in tropical high-altitude lakes from southern ecuador," *Sustainability*, vol. 11, no. 19, p. 5235, 2019.
- [82] M. Castro, "Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los paramos ecuatorianos," 2011.
- [83] S. Mistry, "LoRa API - End packet," 2022. [Online]. Available: <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa/blob/master/API.md#end-packet>
- [84] Maxim Integrated, "DS3231 RTC General Description," *Data Sheet*, p. 20, 2015.
- [85] M. Häck and D. HACH LANGE, "Optical measurement of oxygen concentration in water," 2017.

## Apéndice A

### Resultados individuales de los experimentos LoRa.

#### A.1. Introducción

En el siguiente apéndice se presentan los resultados individuales correspondientes a los experimentos realizados en la zona rural y zona alto páramo. Las métricas analizadas son: PRR, *throughput/bit rate*, RSSI, *delay* y *jitter*. En cada sección se analiza el comportamiento de LoRa del prototipo para las diferentes combinaciones y ubicaciones, comparando los resultados con la teoría y cuán similares son.

#### A.2. Zona Rural.

##### A.2.1. PRR

###### A.2.1.1. PRR SF7.

En la Figura A.2.1 se observa que los puntos con mayor PRR son el primero y cuarto, tomando en cuenta que tienen la línea de vista más limpia según la Sección 5.1, además son los puntos con intervalos de confianza menos variables. El punto que tiene la tasa más alta de paquetes recibidos es el primer punto, en cambio los puntos con menor PRR son el segundo y tercero, pero en general, la tasa es muy baja para SF7. Con respecto al CR no existe una tendencia clara.

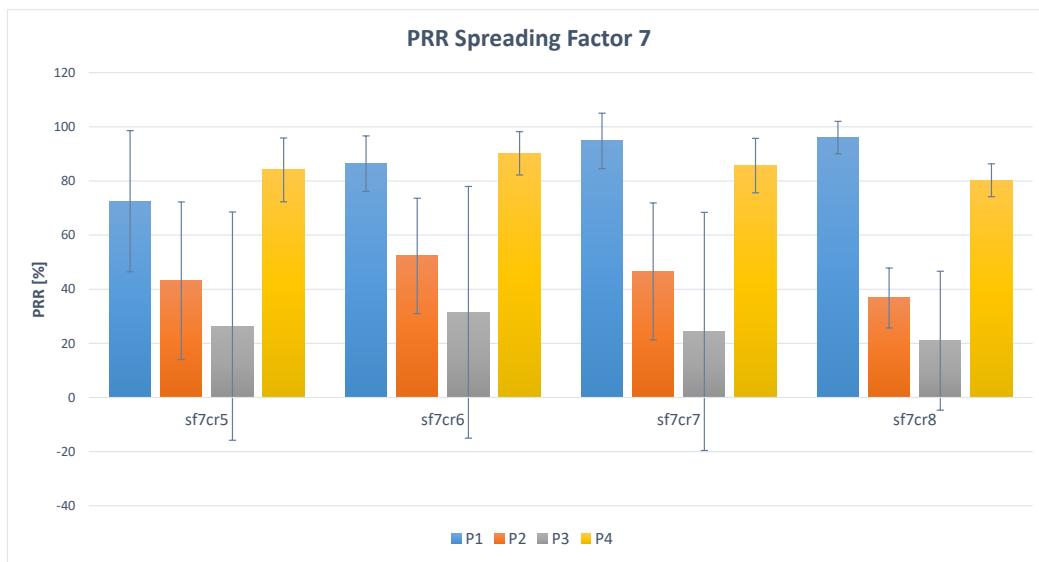


Figura A.2.1: PRR obtenido con Spreading Factor 7 en la zona rural.

### A.2.1.2. PRR SF8.

Para SF8 el análisis es similar a SF7, la principal diferencia se observa en el segundo punto, donde el PRR aumentó considerablemente, llegando a estar a nivel de los puntos 1 y 4 (ver Figura A.2.2). En general, la tasa de recepción de paquetes de SF8 es mayor a SF7, pero se sigue observando un intervalo de confianza muy variable para el tercer punto, evidenciando nuevamente que la línea de vista es muy importante.



Figura A.2.2: PRR obtenido con Spreading Factor 8 en la zona rural.

Al revisar el archivo JSON con los resultados obtenidos para SF7 y SF8, se observa que el *payload* o carga útil de ciertos paquetes recibidos está parcialmente distorsionado (ver Figura A.2.3). Los paquetes recibidos a pesar que su *payload* tiene errores, forman parte de las estadísticas.

```
{
  "payload": "mensac\u2022|205",
  "sec": 1658683562,
  "rss": -102,
  "snr": -8.5,
  "freq": 433000000,
  "sf": 8,
  "bw": 125000,
  "cr": 5
},
```

Figura A.2.3: Payload parcialmente distorsionado en la zona rural.

### A.2.1.3. PRR SF9.

En la gráfica de la Figura A.2.4 se observa un cambio importante con respecto a los anteriores SFs, aquí el PRR tiene valores muy altos y cercanos a 100 %, además los intervalos de confianza son poco variables. Solo para CR7 en el punto 3 se observa un intervalo amplio, pero se debe recordar que mientras aumenta

el SF, la tasa de bits es menor y por lo tanto, existen menos paquetes enviados. Entonces la pérdida de uno o dos paquetes, ya genera un intervalo de confianza variable.

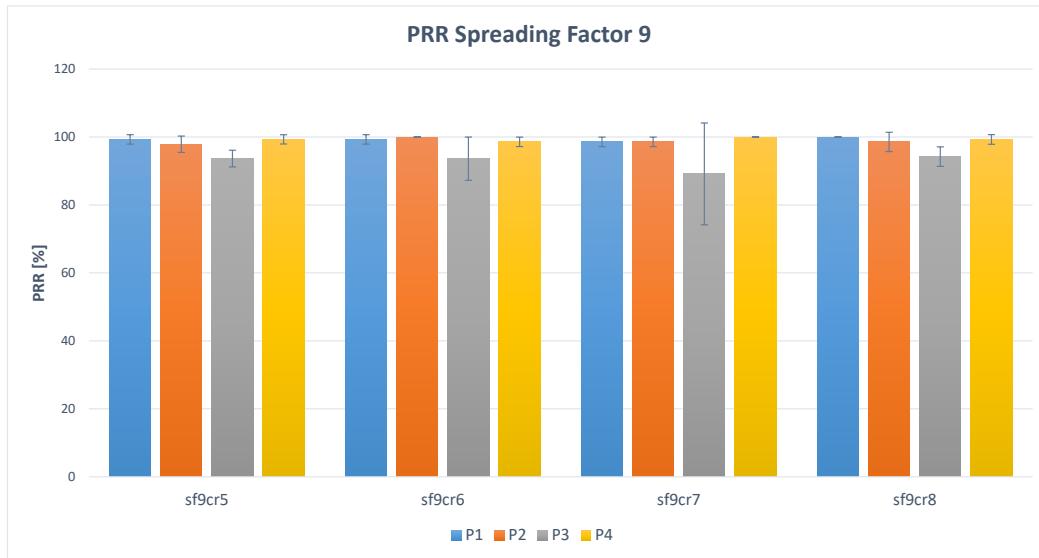


Figura A.2.4: PRR obtenido con Spreading Factor 9 en la zona rural.

#### A.2.1.4. PRR SF10.

A partir de este valor de SF en adelante el comportamiento es muy similar, los valores mínimos están alrededor de 98 % con intervalos de confianza muy poco variables como se observa en la Figura A.2.5. Con respecto al CR no se ha observado ningún patrón ni tendencia.

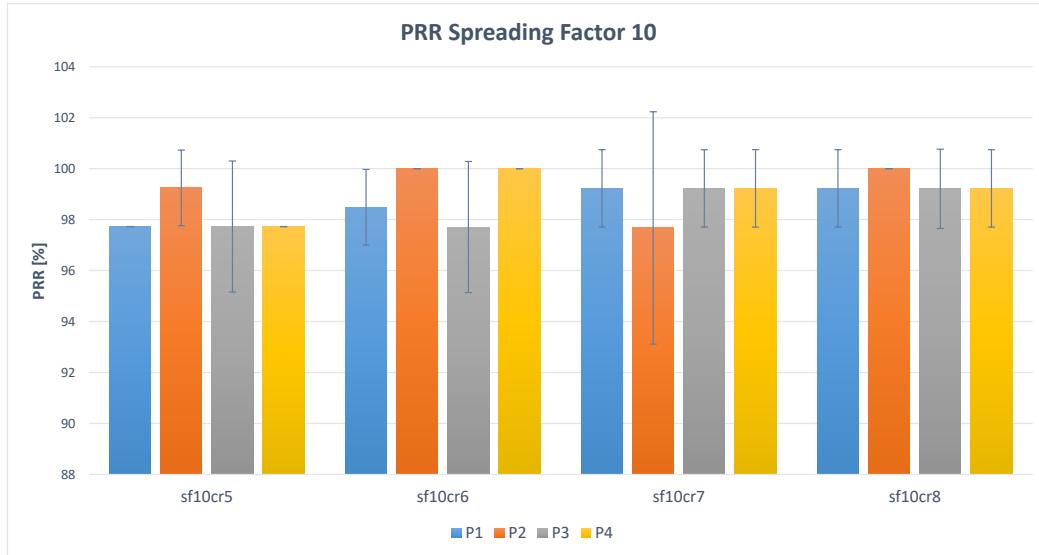


Figura A.2.5: PRR obtenido con Spreading Factor 10 en la zona rural.

#### A.2.1.5. PRR SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.6.

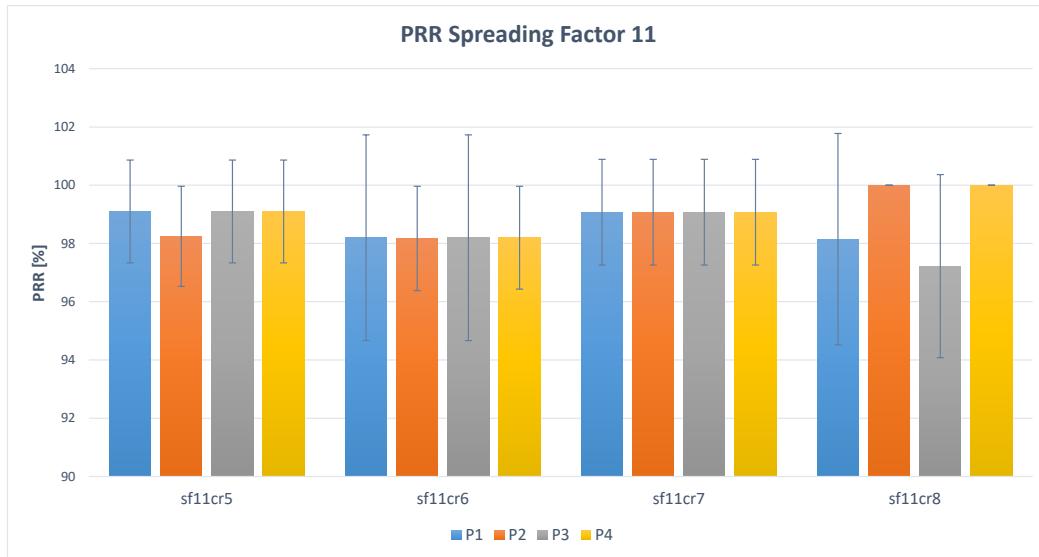


Figura A.2.6: PRR obtenido con Spreading Factor 11 en la zona rural.

#### A.2.1.6. PRR SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.7.

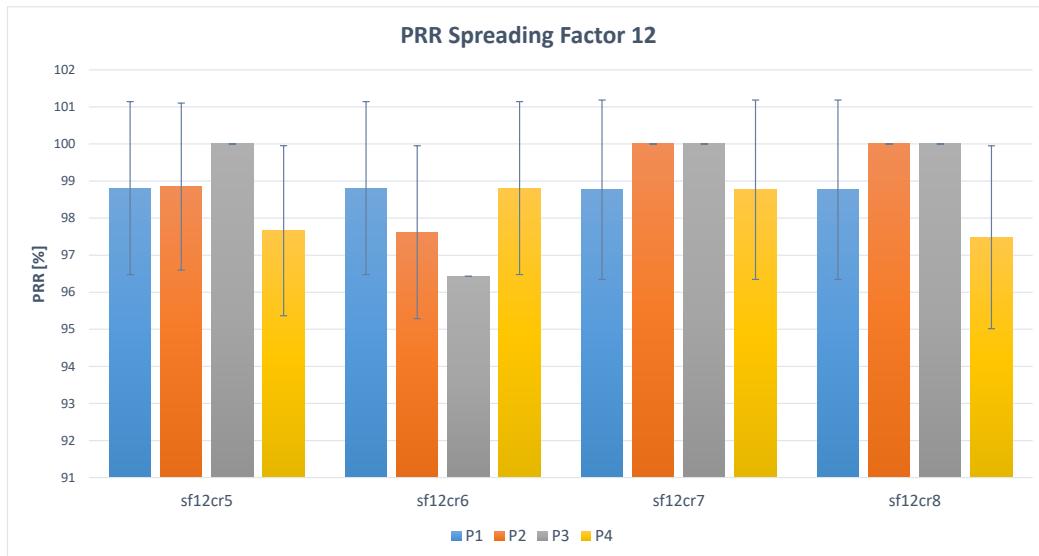


Figura A.2.7: PRR obtenido con Spreading Factor 12 en la zona rural.

### A.2.2. Throughput/Bit Rate

#### A.2.2.1. Bit Rate SF7.

En la Figura A.2.8 se presenta la tasa de bits para SF7, donde se observa una gran variación de los intervalos de confianza. Ya que **capinfos** genera el *bit rate* promedio a partir de las muestras y marcas de tiempo en el archivo pcap, al existir pérdida de paquetes para SF7, se refleja directamente en la tasa de bits. Con respecto al CR no se observa ningún patrón o tendencia.

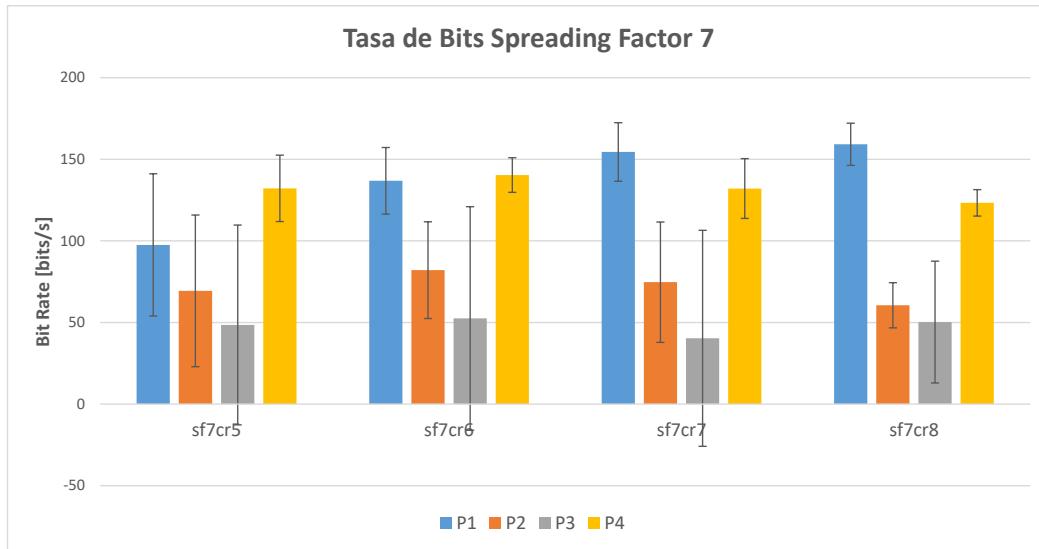


Figura A.2.8: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 7 en la zona rural.

#### A.2.2.2. Bit Rate SF8.

Para SF8 se observan mejores resultados con respecto a los intervalos de confianza, son más pequeños, a excepción del punto 3 (ver Figura A.2.9). La gráfica del punto 4 es la más estable para todas las combinaciones de CR, además el intervalo de confianza muestra una variación mínima de los resultados, entonces para este punto se puede garantizar una tasa de bits constante. Es importante recordar que este es el punto más alejado, pero con una línea vista completamente despejada.

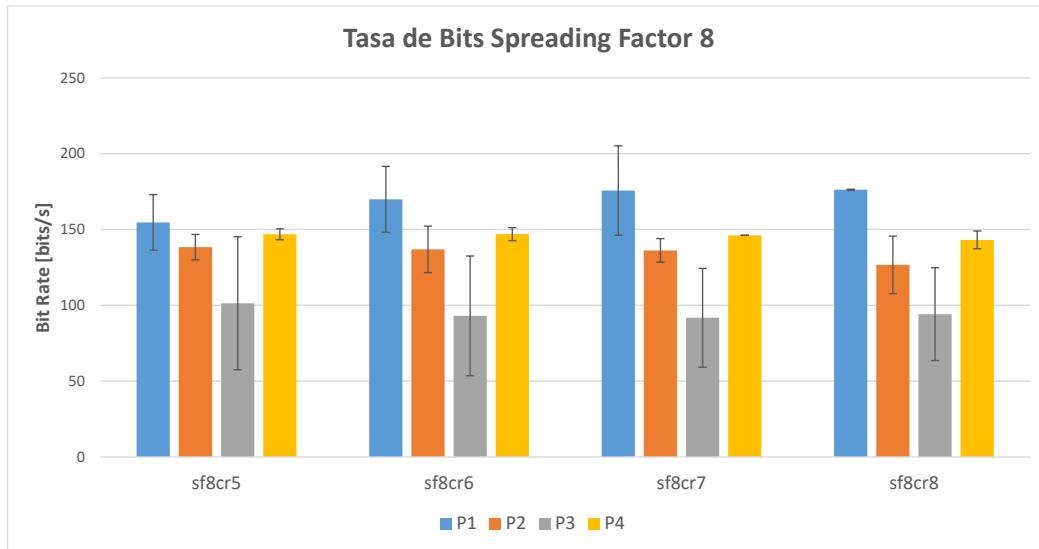


Figura A.2.9: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 8 en la zona rural.

#### A.2.2.3. Bit Rate SF9.

Al igual que en los SF anteriores, no se detecta ningún patrón de variación con respecto al CR (ver Figura A.2.10). El principal cambio con respecto a SF 7 y 8, son los intervalos de confianza, principalmente en los puntos 1, 2 y 3, donde se observa una variación mínima. Sin embargo, el punto 3 aún presenta variaciones en sus muestras, esto se debe a las pérdidas de paquetes existentes para este valor de SF. A pesar de

ello, los resultados son buenos, permitiendo un correcto funcionamiento del sistema con una tasa de bits aproximada de 150 bps si existe línea de vista sin interferencias.

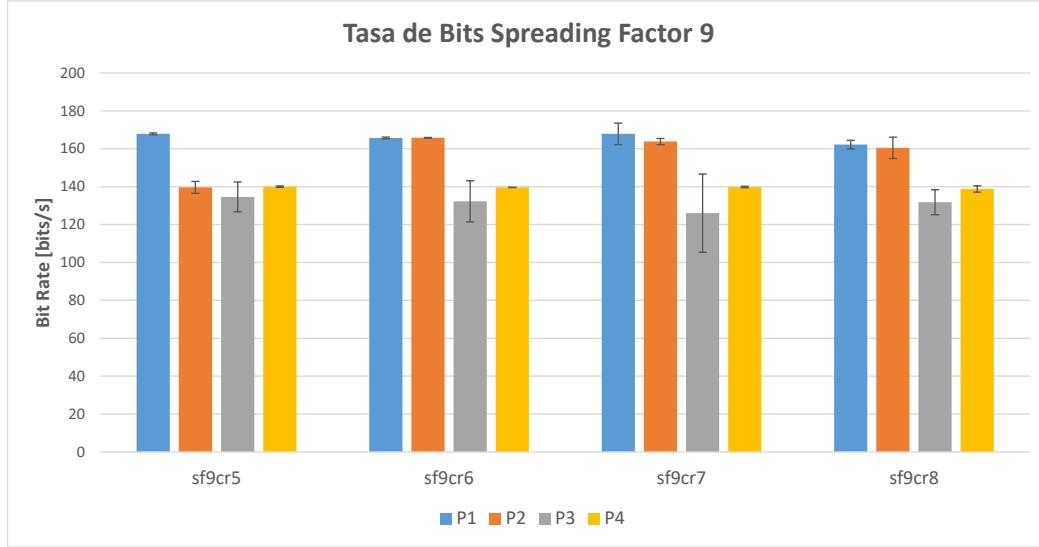


Figura A.2.10: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 9 en la zona rural.

#### A.2.2.4. Bit Rate SF10.

En comparación con los SFs anteriores, SF10 tiene los mejores resultados (ver Figura A.2.11). Se observa uniformidad en los datos e intervalos de confianza pequeños, por lo que se puede garantizar una tasa de bits fija al utilizar cualquier valor de CR con SF10. Además, se nota una ligera tendencia de disminución de la tasa de bits a medida que el denominador del CR aumenta. A partir de este punto los resultados son similares.

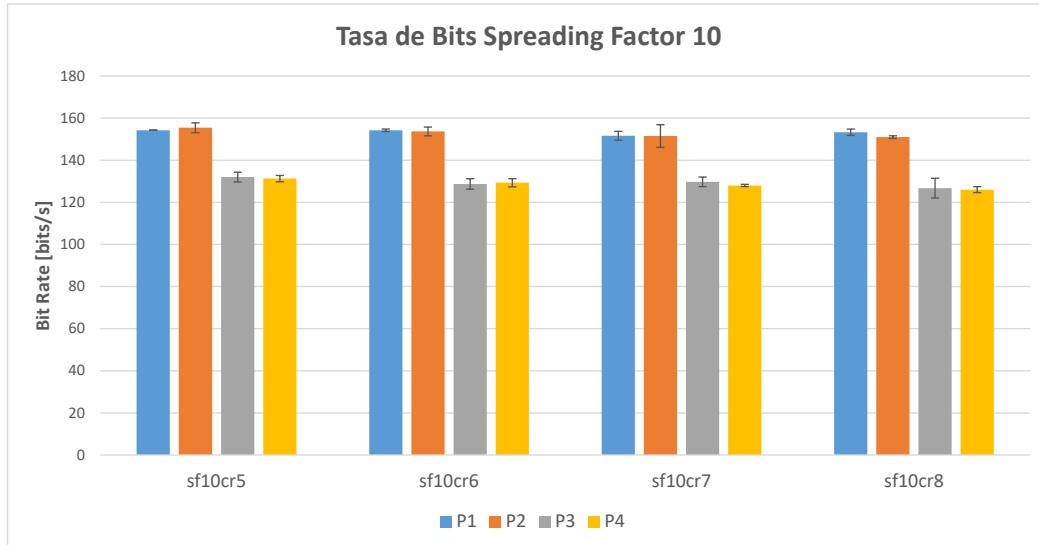


Figura A.2.11: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 10 en la zona rural.

#### A.2.2.5. Bit Rate SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.12.

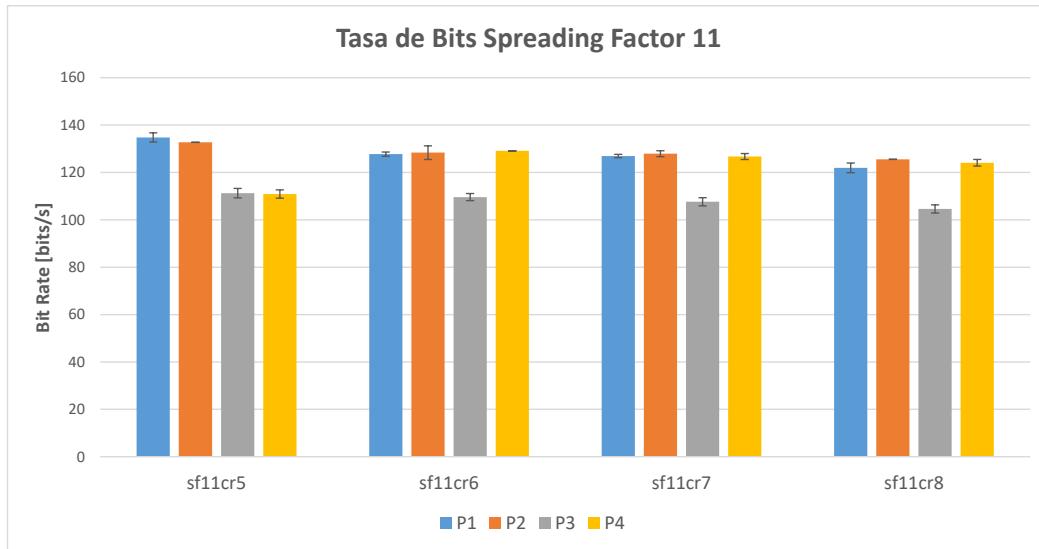


Figura A.2.12: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 11 en la zona rural.

#### A.2.2.6. Bit Rate SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.13.

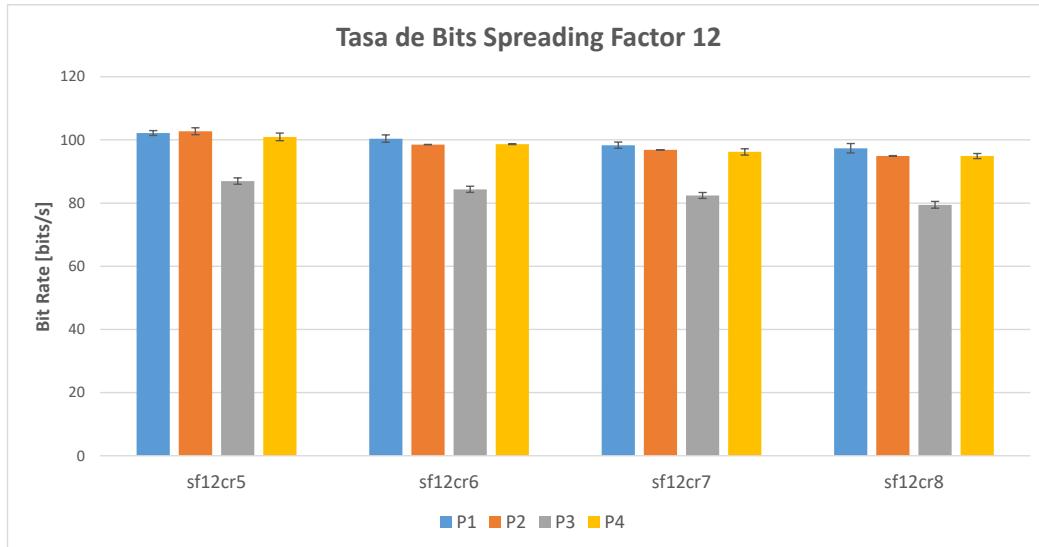


Figura A.2.13: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 12 en la zona rural.

### A.2.3. RSSI

#### A.2.3.1. RSSI SF7.

En la Figura A.2.14 se observa que los valores de RSSI más altos son para los puntos 1 y 4, sin embargo; en el punto 4 el intervalo de confianza es muy pequeño a comparación del primer punto. En cambio, los valores de RSSI son los más bajos para los puntos 2 y 3, además los intervalos de confianza son muy variables. El resultado más llamativo es que a medida que el denominador del CR aumenta, el RSSI es mayor, entonces la señal es más fuerte.

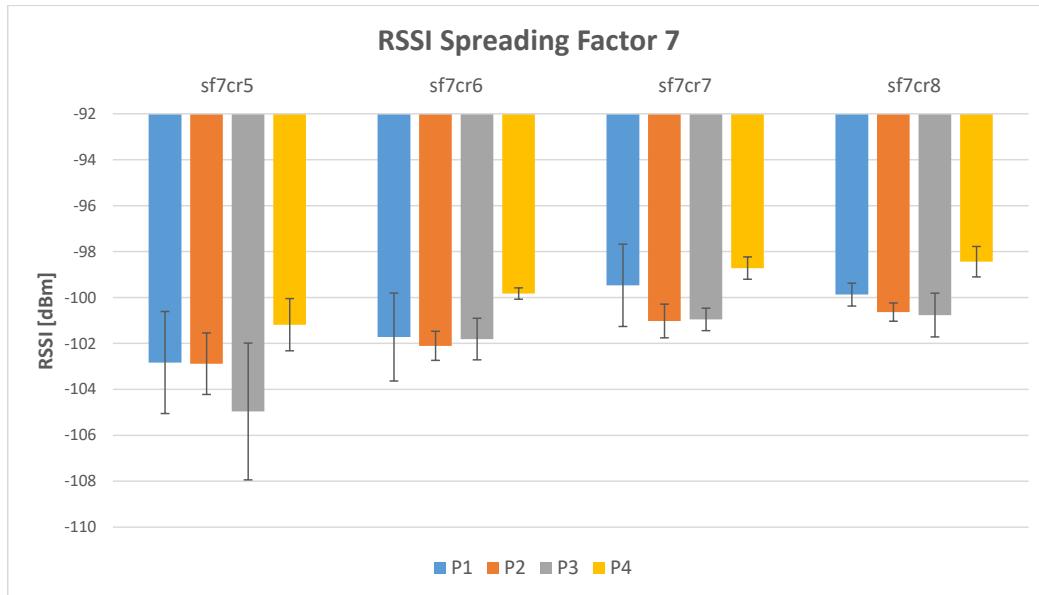


Figura A.2.14: RSSI obtenido para SF7 en la zona rural.

#### A.2.3.2. RSSI SF8.

Los resultados a partir de SF8 muestran comportamientos similares para todos los puntos, los valores mayores de RSSI son para el punto 1 y 4, los puntos 2 y 3 siguen con una potencia menor en Rx. Es llamativo el hecho de tener un RSSI mayor para el punto más alejado, sin embargo, se recuerda que el punto 4 tiene la mejor línea de vista de todos los puntos.

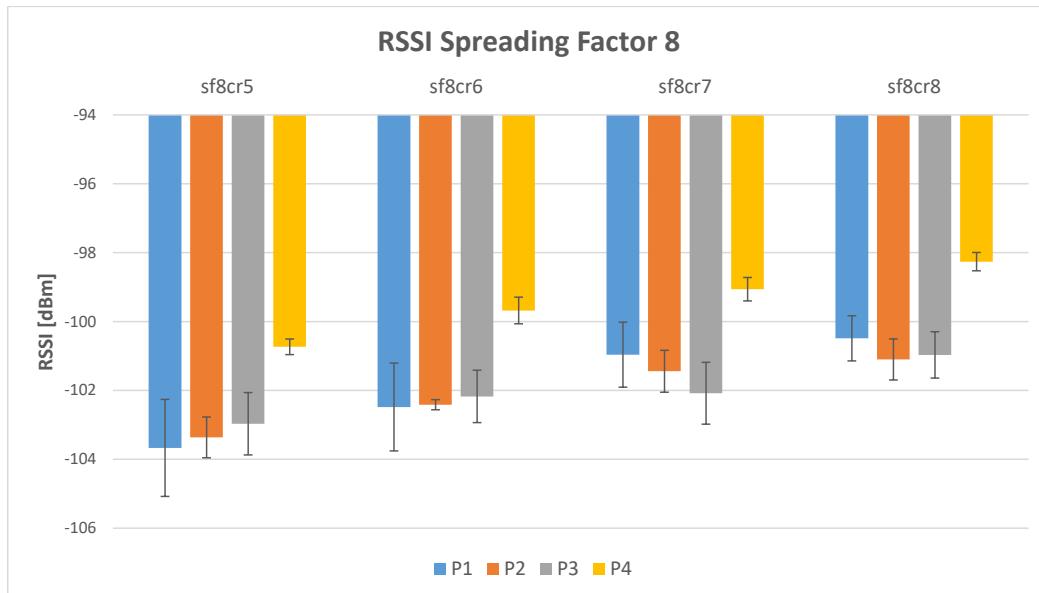


Figura A.2.15: RSSI obtenido para SF8 en la zona rural.

#### A.2.3.3. RSSI SF9.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.16.

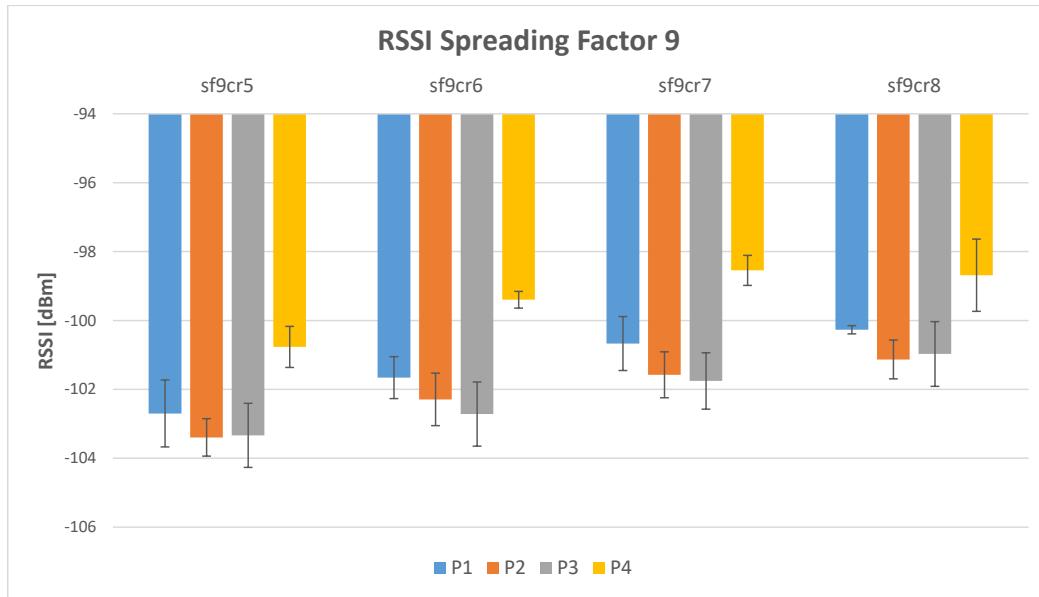


Figura A.2.16: RSSI obtenido para SF9 en la zona rural.

#### A.2.3.4. RSSI SF10.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.17.

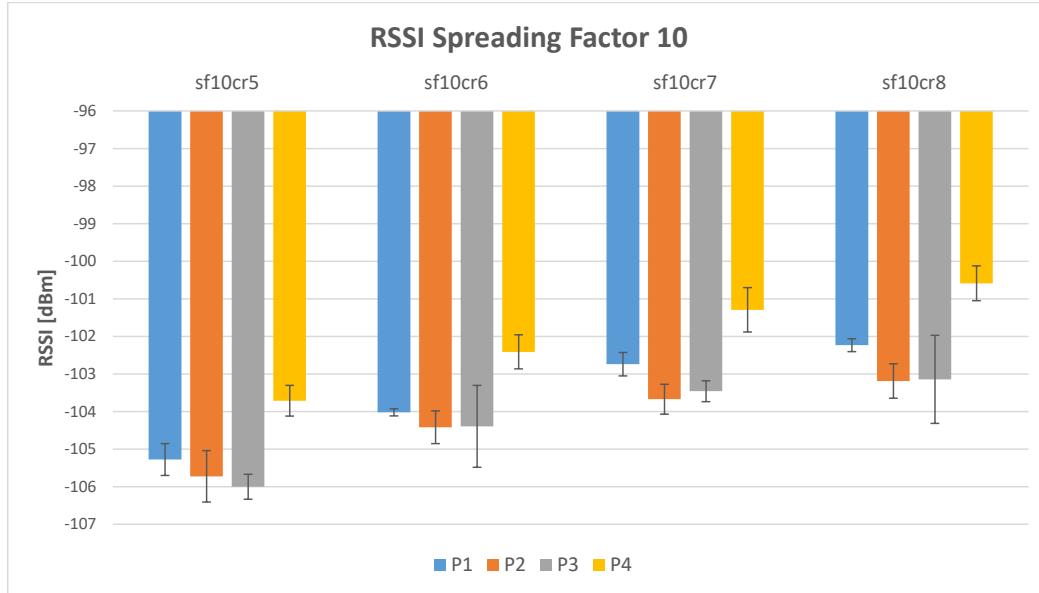


Figura A.2.17: RSSI obtenido para SF10 en la zona rural.

#### A.2.3.5. RSSI SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.18.

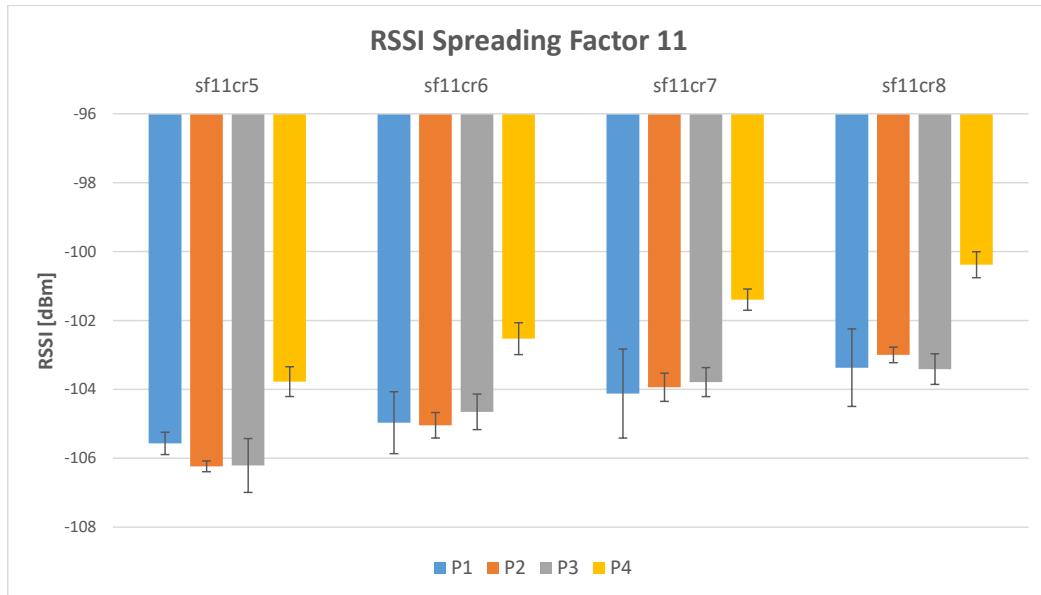


Figura A.2.18: RSSI obtenido para SF11 en la zona rural.

#### A.2.3.6. RSSI SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.19.

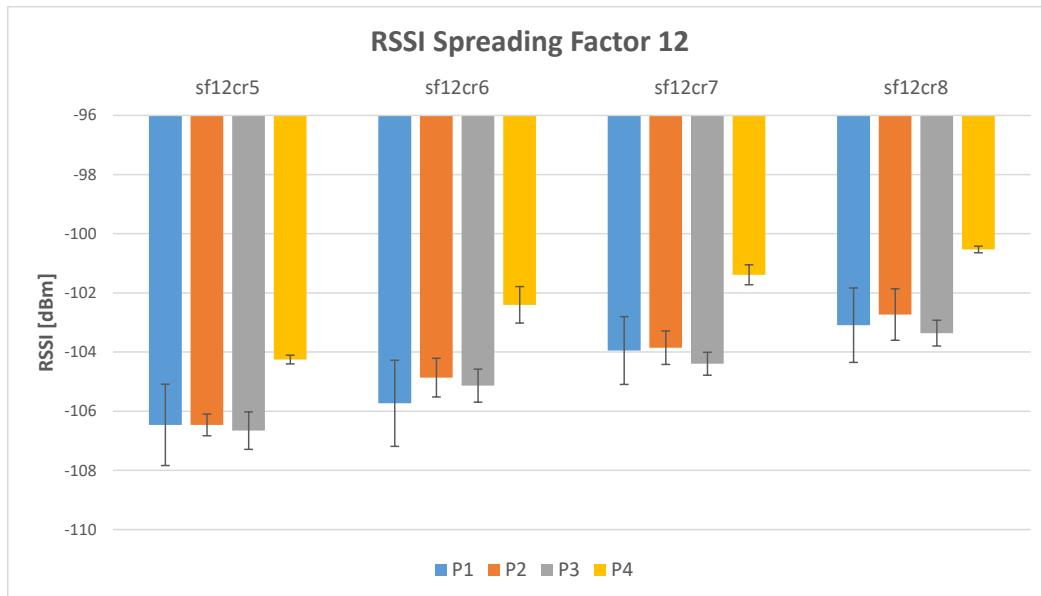


Figura A.2.19: RSSI obtenido para SF12 en la zona rural.

### A.2.4. Delay

#### A.2.4.1. Delay SF9.

En la Figura A.2.20 se observan los valores de retraso promedio para SF9 con sus distintas combinaciones. Los resultados del *delay* con respecto al CR presentan un ligero incremento a medida que el denominador de CR aumenta. Sin embargo, el retraso por cada punto no sigue ninguna tendencia.

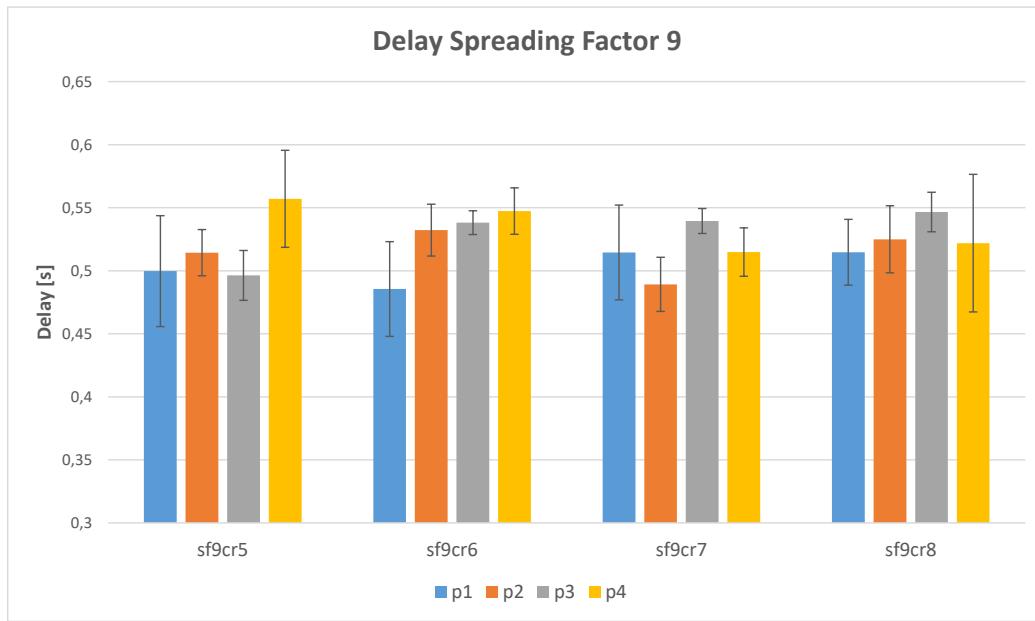


Figura A.2.20: Delay obtenido para SF9 en la zona rural.

#### A.2.4.2. Delay SF10.

En este caso es mucho más evidente como aumenta el *delay* a medida que incrementa el denominador del CR, lo cual corresponde con la teoría, ya que un CR mayor representa un ToA más grande, lo que afecta directamente al retraso de los paquetes. En comparación con SF9, SF10 muestra una tendencia muy clara de mayor *delay* en los puntos más lejanos. Los siguientes resultados presentan un comportamiento muy similar a SF10.

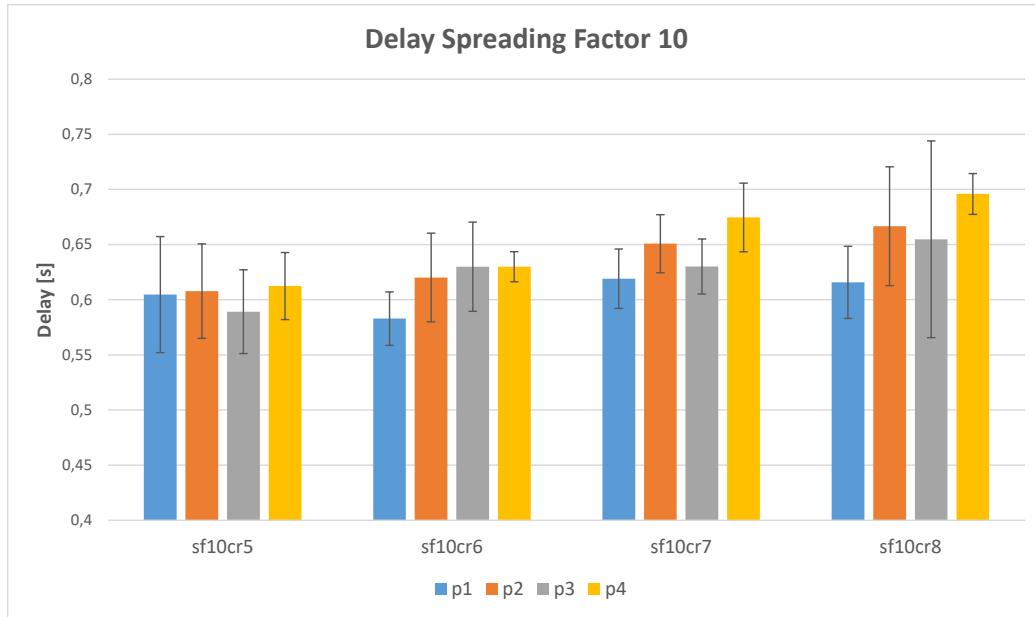


Figura A.2.21: Delay obtenido para SF10 en la zona rural.

#### A.2.4.3. Delay SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.22.

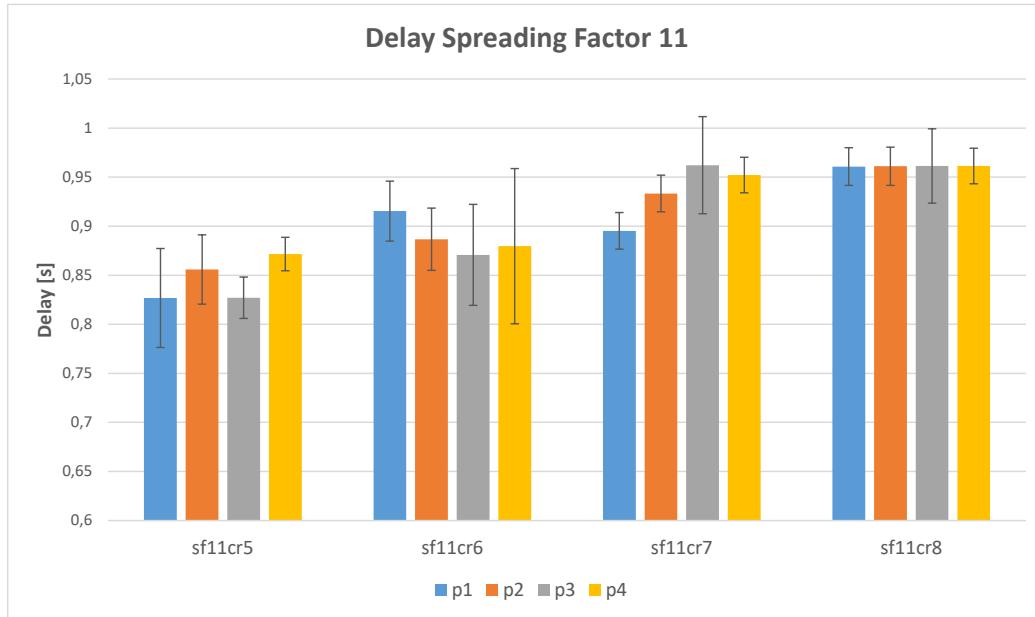


Figura A.2.22: Delay obtenido para SF11 en la zona rural.

#### A.2.4.4. Delay SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.2.23.

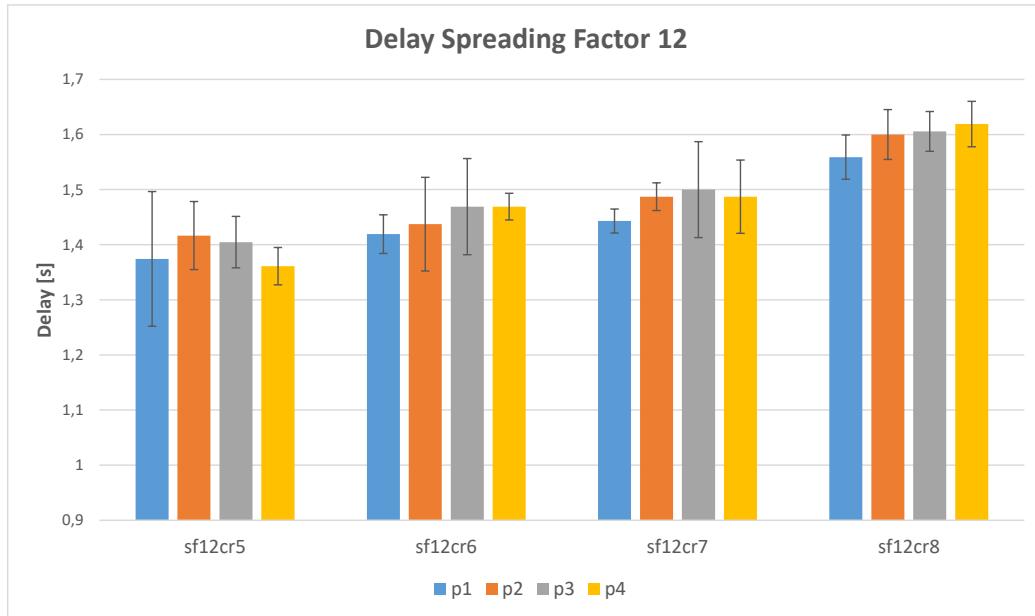


Figura A.2.23: Delay obtenido para SF12 en la zona rural.

### A.2.5. Jitter

#### A.2.5.1. Jitter SF9.

Según la Figura A.2.24, el *jitter* para SF9 aumenta a medida que el punto está más alejado. Además, se observa una ligera tendencia de aumento cuando se utiliza un denominador mayor en el CR. Los intervalos de confianza son en su mayoría pequeños, especialmente para el CR8.

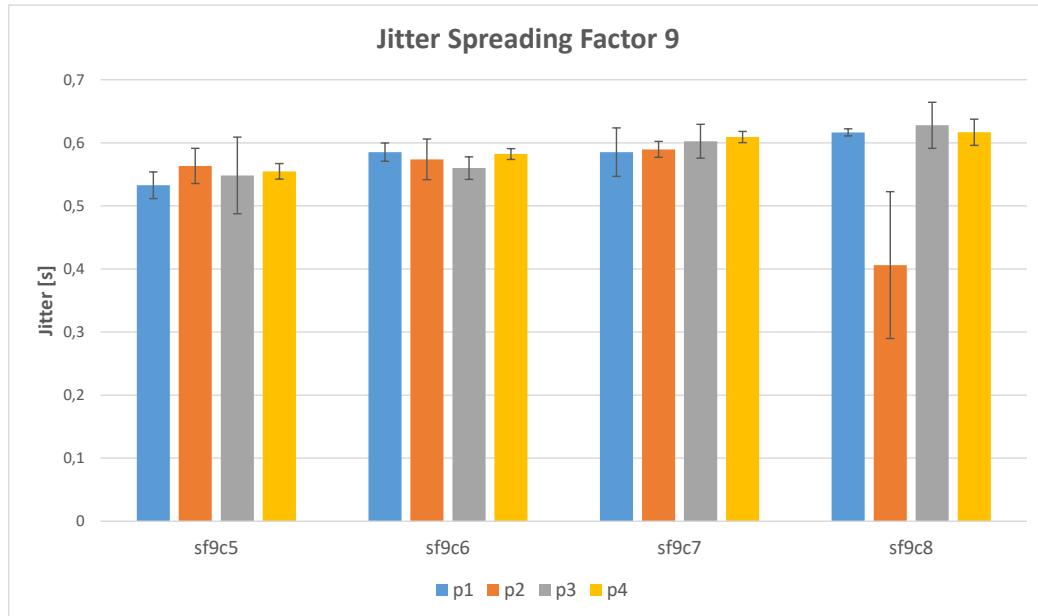


Figura A.2.24: Jitter obtenido para SF9 en la zona rural.

#### A.2.5.2. Jitter SF10.

Para SF10 no se detecta ninguna tendencia o comportamiento. Los resultados se presentan en la Figura A.2.25.

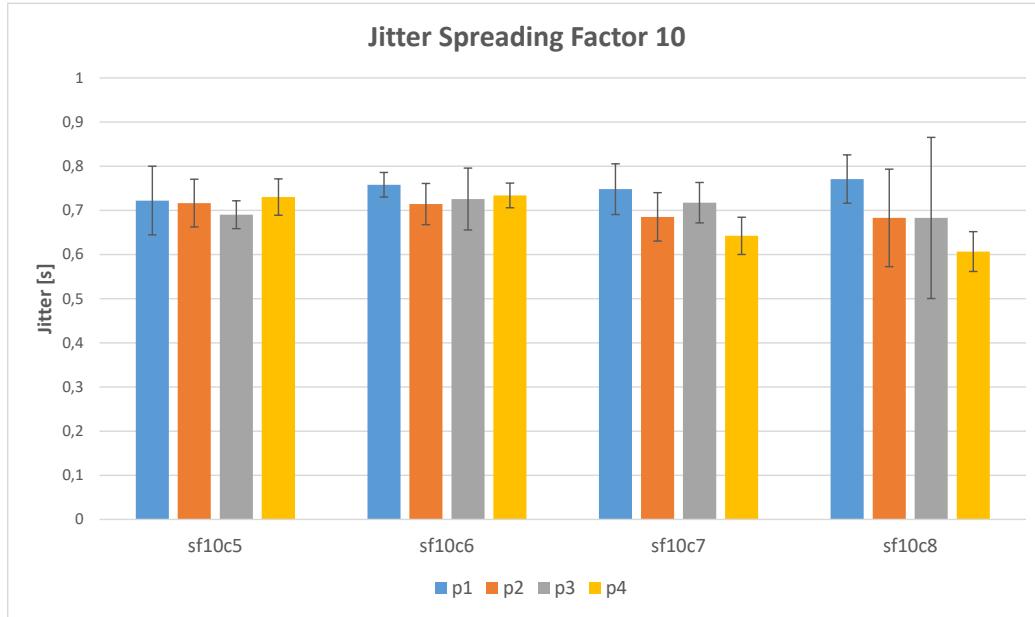


Figura A.2.25: Jitter obtenido para SF10 en la zona rural.

#### A.2.5.3. Jitter SF11.

En la Figura A.2.26 se observan los valores de *jitter* obtenidos, donde existe una clara tendencia de disminución de los valores a medida que el punto se aleja más. Además, los valores de *jitter* son bajos, lo que representa una variación mínima en los retrasos de los paquetes para SF11.

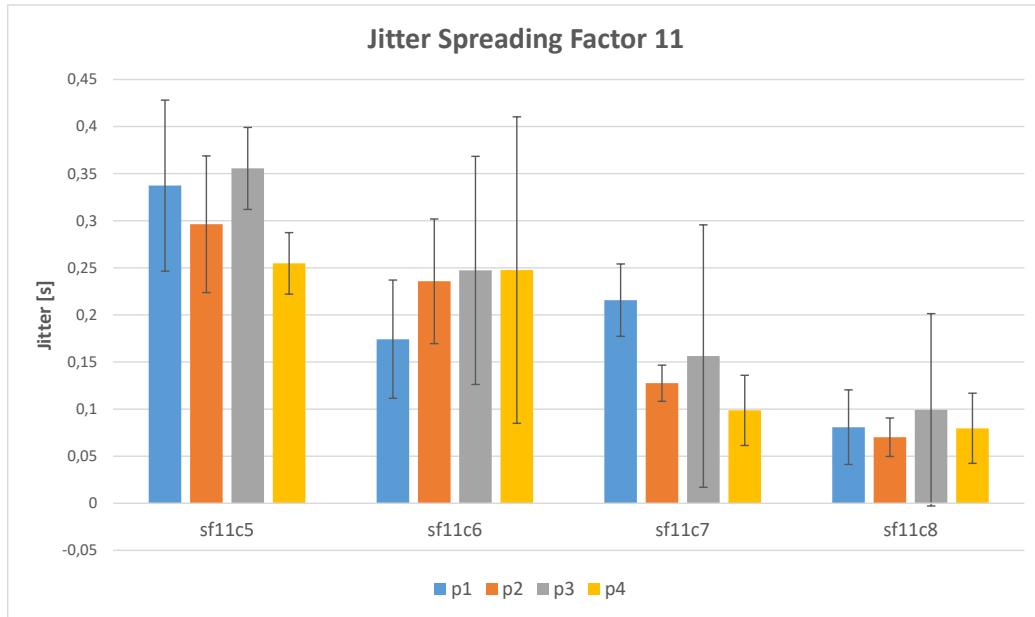


Figura A.2.26: Jitter obtenido para SF11 en la zona rural.

#### A.2.5.4. Jitter SF12.

Los resultados de la Figura A.2.27 muestran que los puntos más alejados presentan un *jitter* mayor, además los intervalos de confianza son muy pequeños. En el análisis general se explica porque todas las muestras presentan comportamientos diferentes.

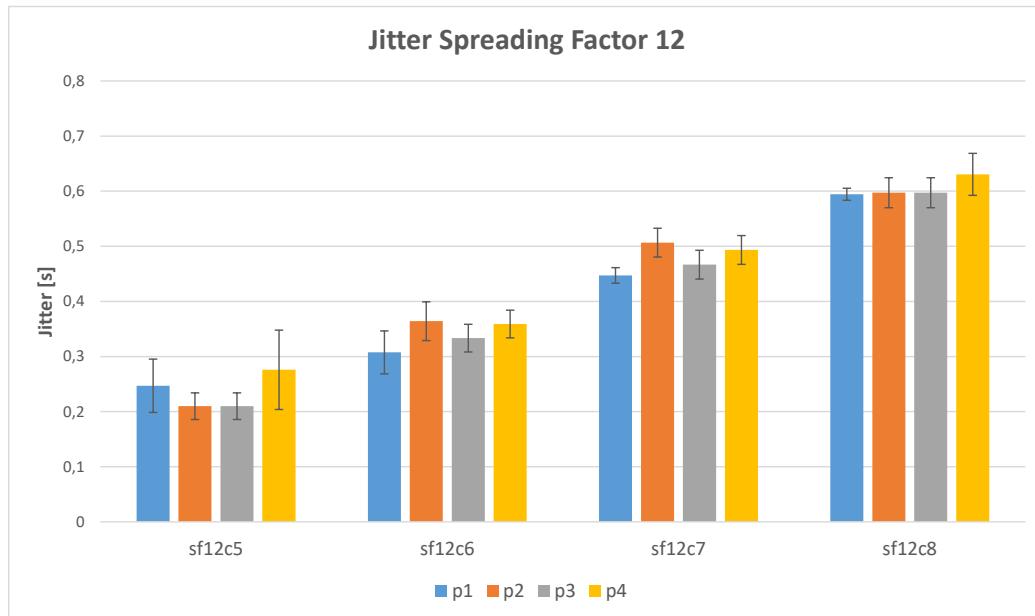


Figura A.2.27: Jitter obtenido para SF12 en la zona rural.

### A.3. Zona Alto Páramo.

#### A.3.1. PRR

##### A.3.1.1. PRR SF7.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.1.

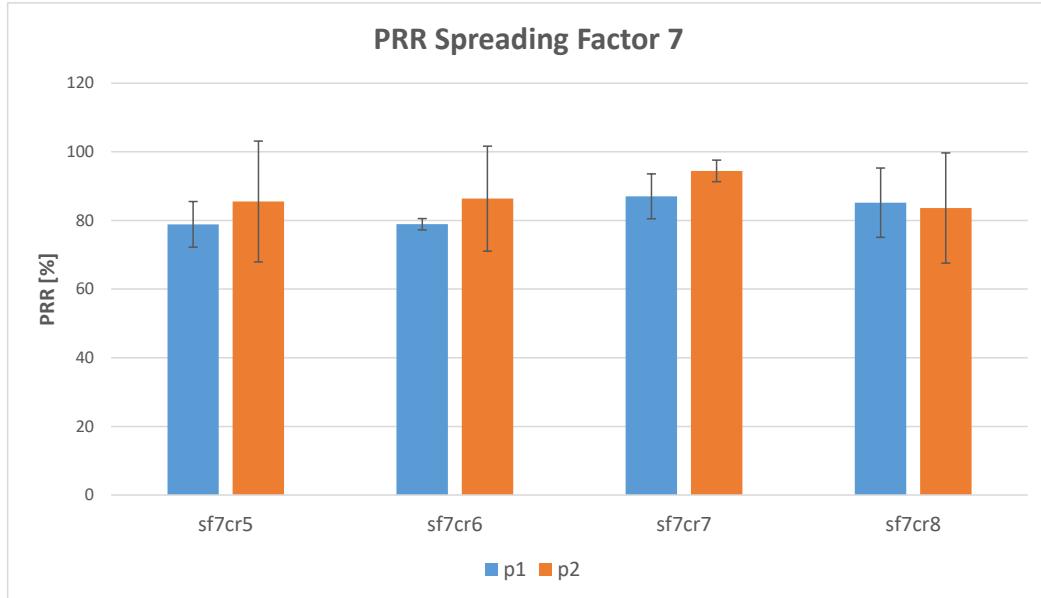


Figura A.3.1: PRR obtenido con Spreading Factor 7 en el páramo.

### A.3.1.2. PRR SF8.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.2.

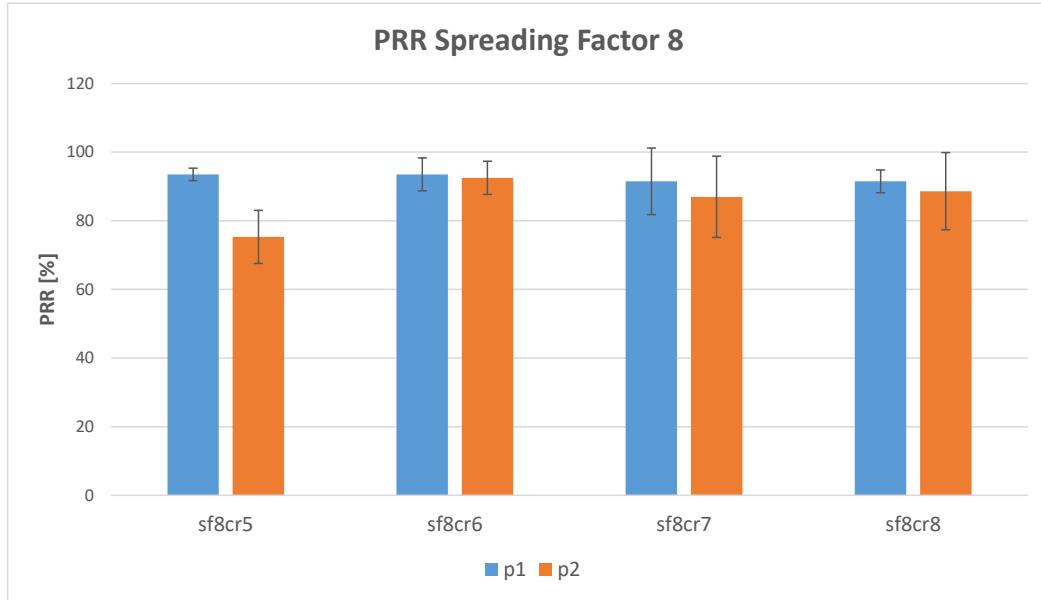


Figura A.3.2: PRR obtenido con Spreading Factor 8 en el páramo.

### A.3.1.3. PRR SF9.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.3.

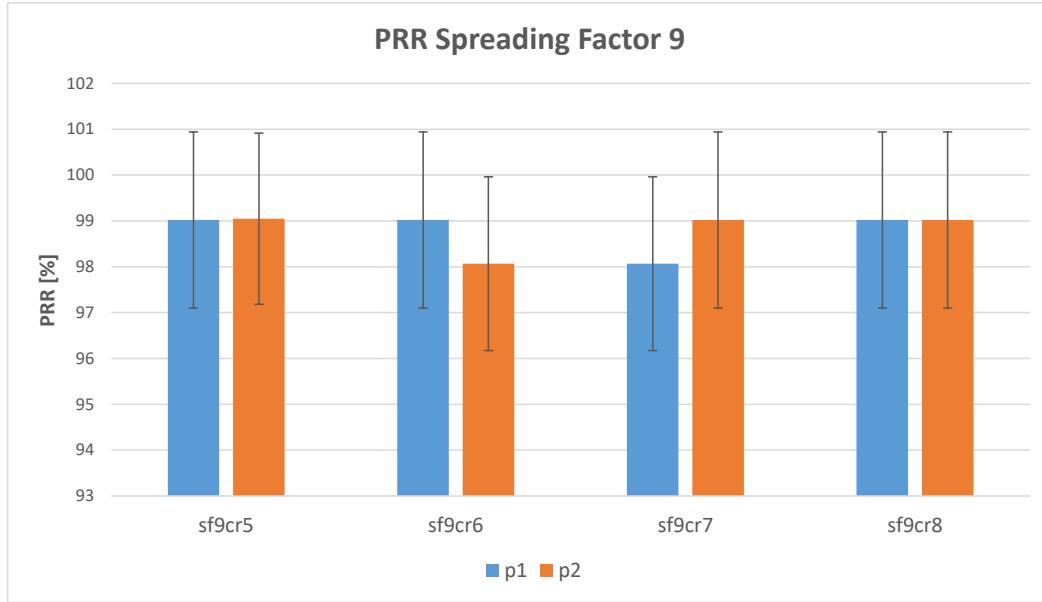


Figura A.3.3: PRR obtenido con Spreading Factor 9 en el páramo.

#### A.3.1.4. PRR SF10.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.4.



Figura A.3.4: PRR obtenido con Spreading Factor 10 en el páramo.

#### A.3.1.5. PRR SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.5.

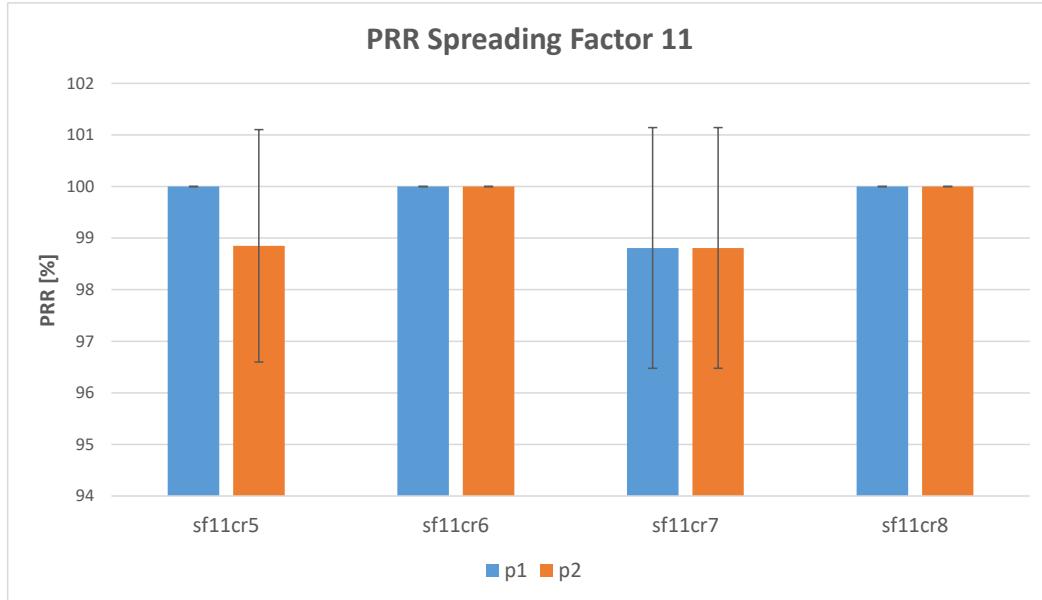


Figura A.3.5: PRR obtenido con Spreading Factor 11 en el páramo.

#### A.3.1.6. PRR SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.6.

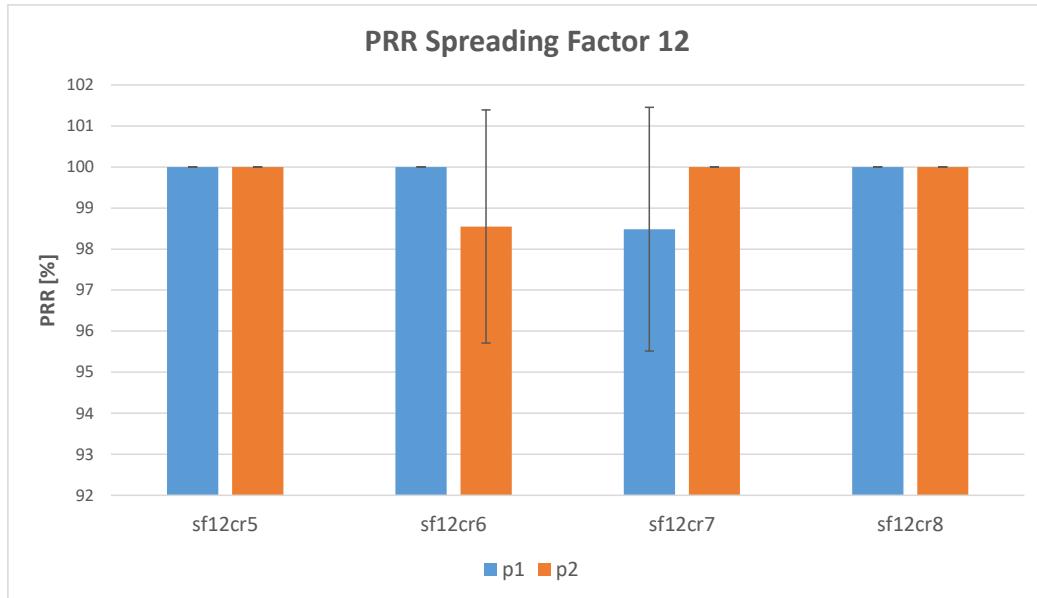


Figura A.3.6: PRR obtenido con Spreading Factor 12 en el páramo.

### A.3.2. Bit Rate

#### A.3.2.1. Bit Rate SF7.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.7.

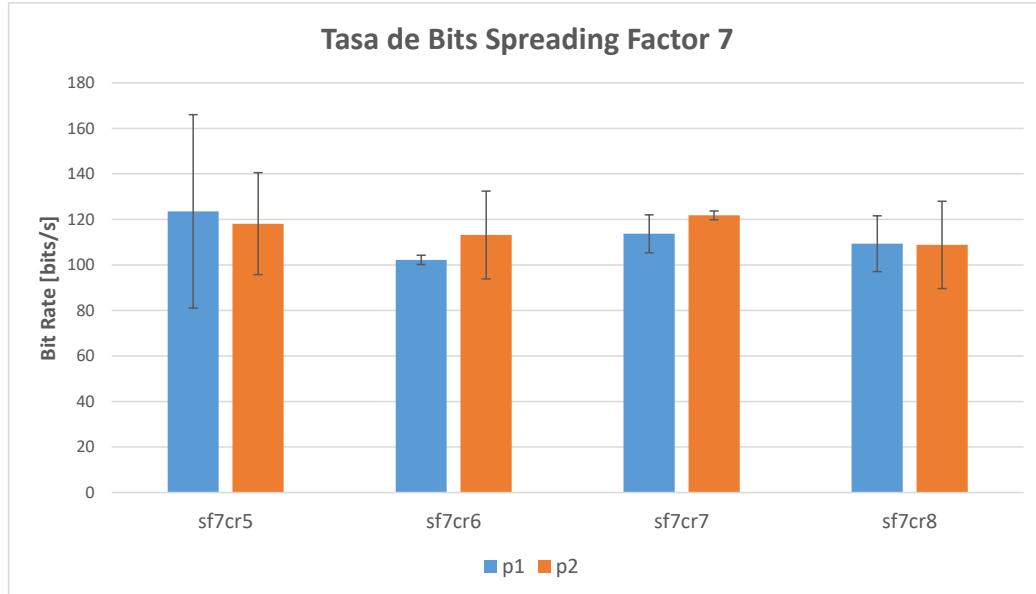


Figura A.3.7: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 7 en el páramo.

### A.3.2.2. Bit Rate SF8.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.8.

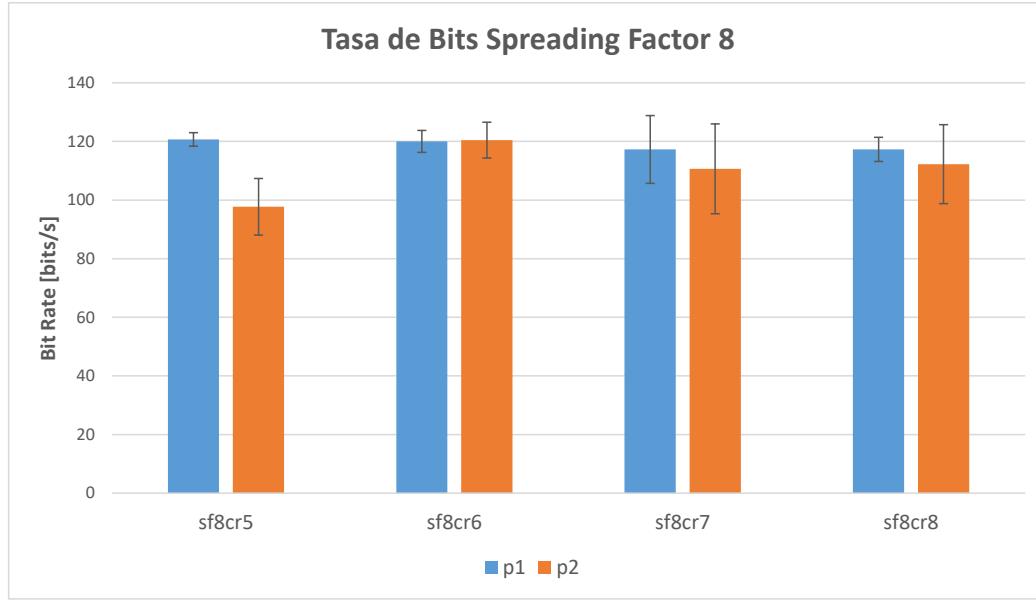


Figura A.3.8: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 8 en el páramo.

### A.3.2.3. Bit Rate SF9.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.9.

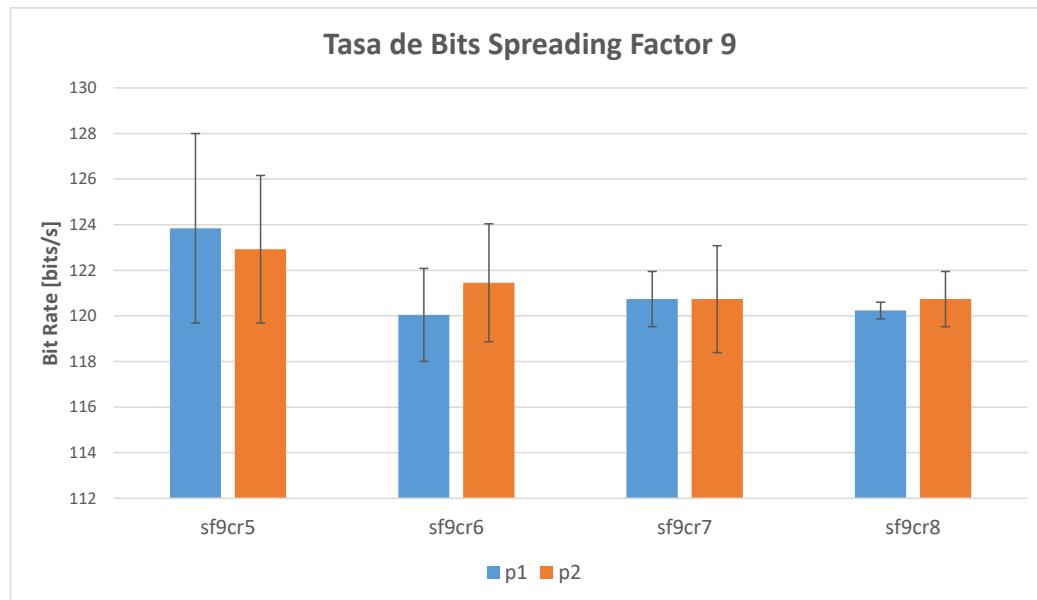


Figura A.3.9: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 9 en el páramo.

#### A.3.2.4. Bit Rate SF10.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.10.

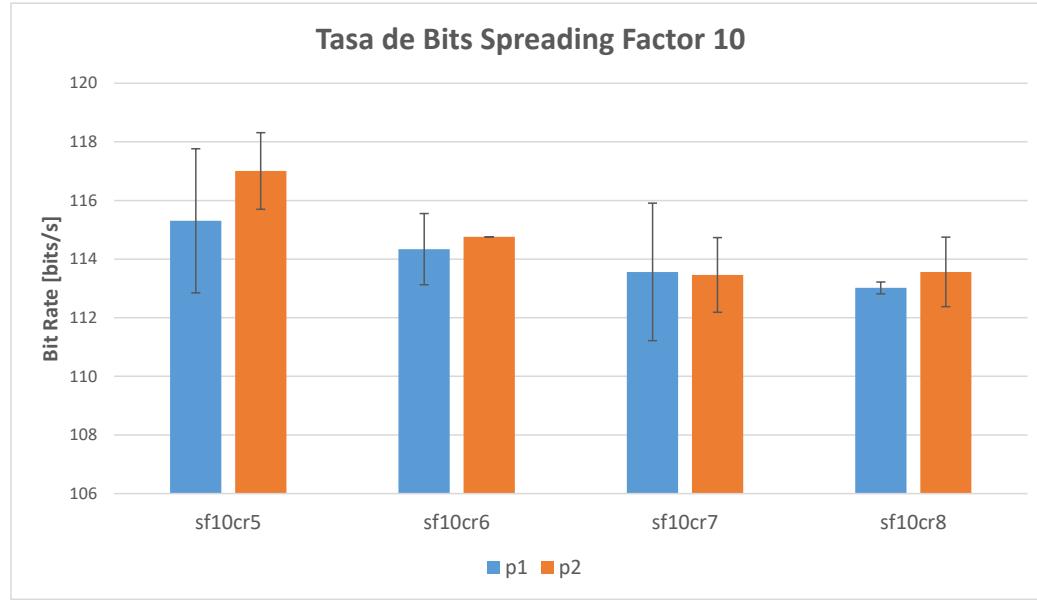


Figura A.3.10: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 10 en el páramo.

#### A.3.2.5. Bit Rate SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.11.

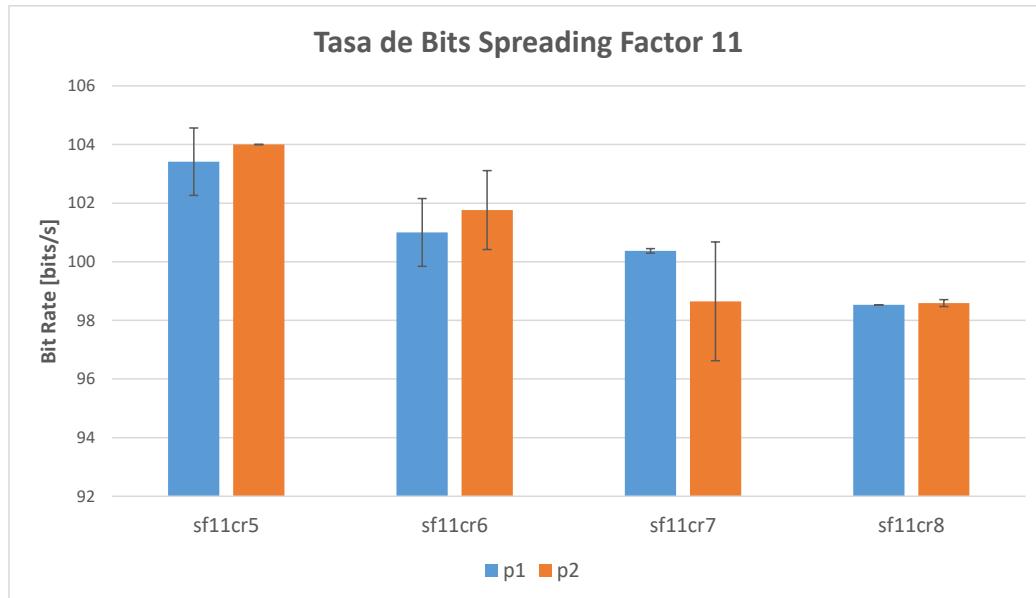


Figura A.3.11: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 11 en el páramo.

#### A.3.2.6. Bit Rate SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.12.

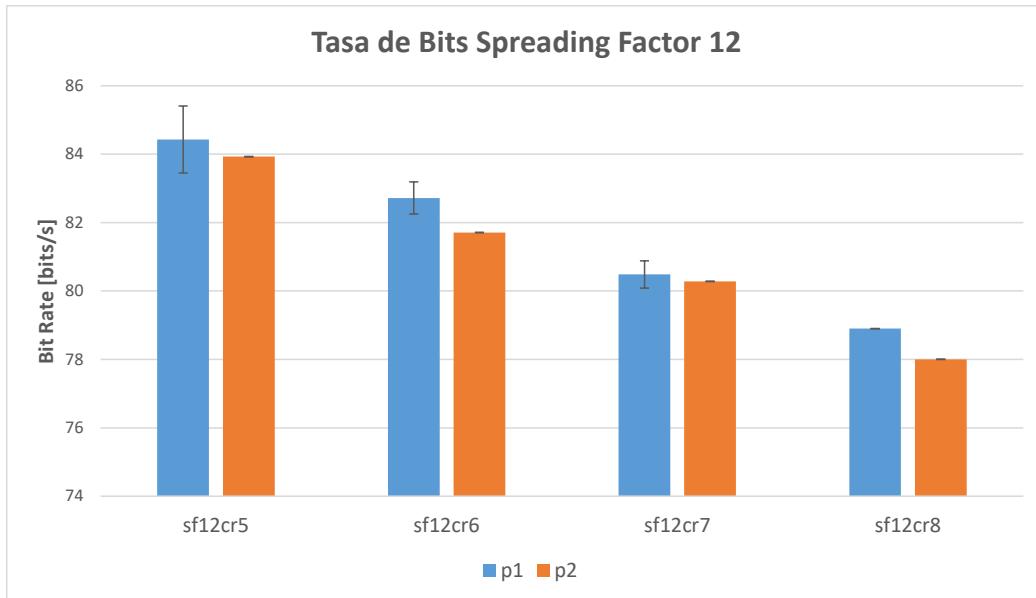


Figura A.3.12: Bit Rate obtenido con Spreading Factor 12 en el páramo.

### A.3.3. RSSI

#### A.3.3.1. RSSI SF7.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.13.

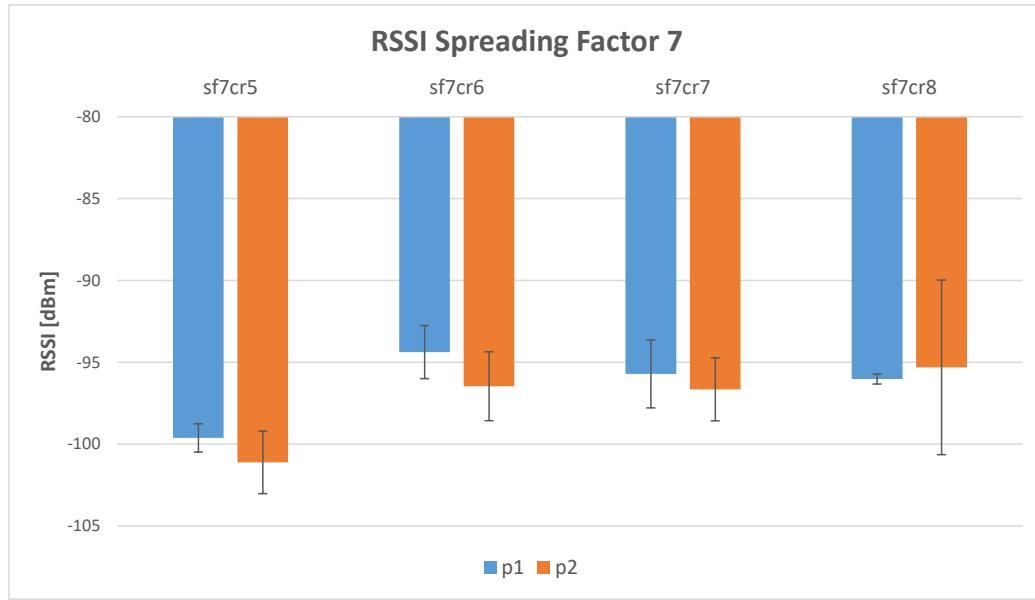


Figura A.3.13: RSSI obtenido para SF7 en el páramo.

### A.3.3.2. RSSI SF8.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.14.

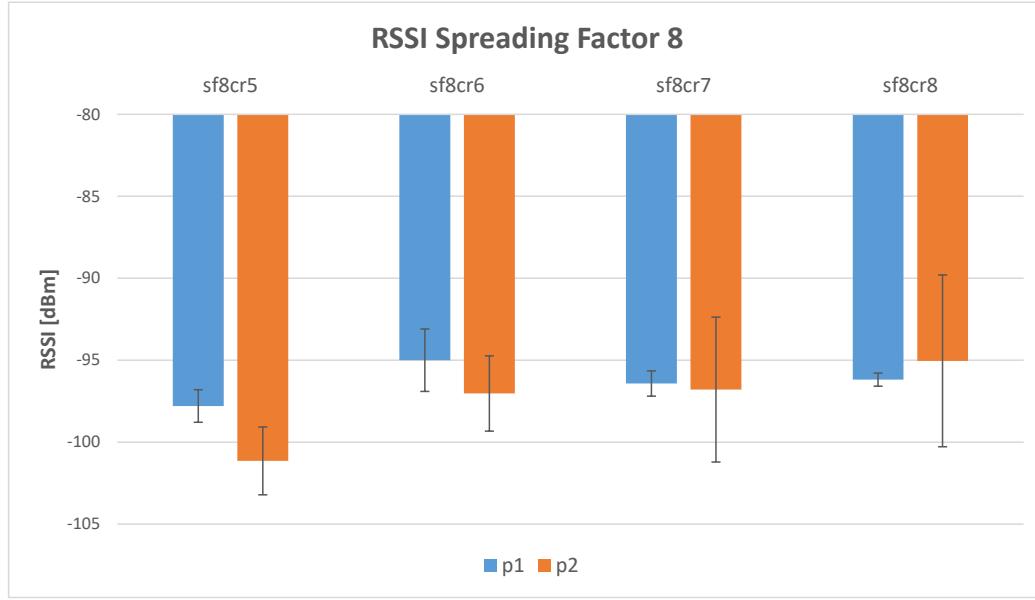


Figura A.3.14: RSSI obtenido para SF8 en el páramo.

### A.3.3.3. RSSI SF9.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.15.

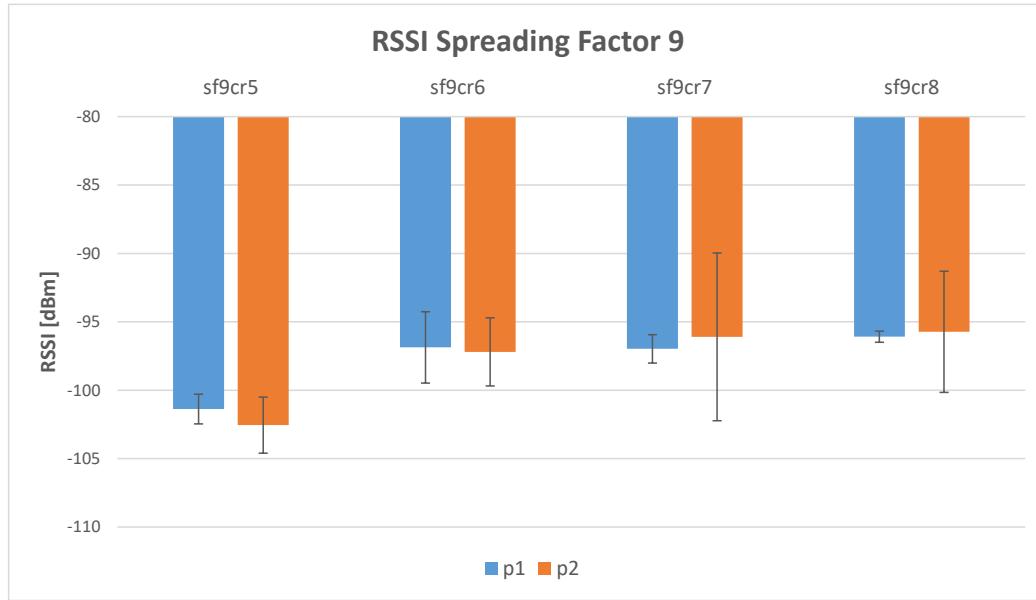


Figura A.3.15: RSSI obtenido para SF9 en el páramo.

#### A.3.3.4. RSSI SF10.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.16.

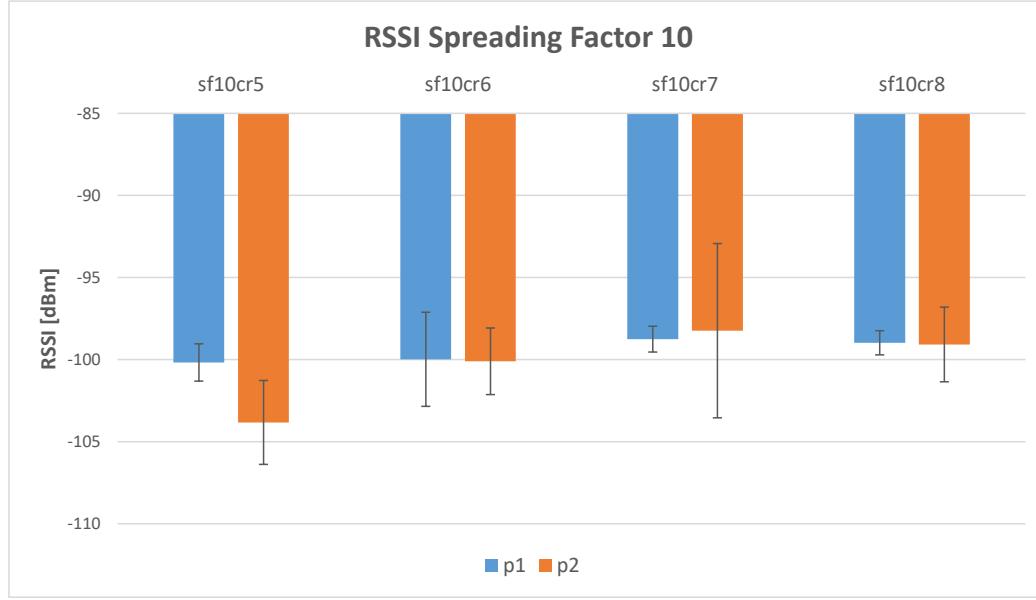


Figura A.3.16: RSSI obtenido para SF10 en el páramo.

#### A.3.3.5. RSSI SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.17.



Figura A.3.17: RSSI obtenido para SF11 en el páramo.

#### A.3.3.6. RSSI SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.18.

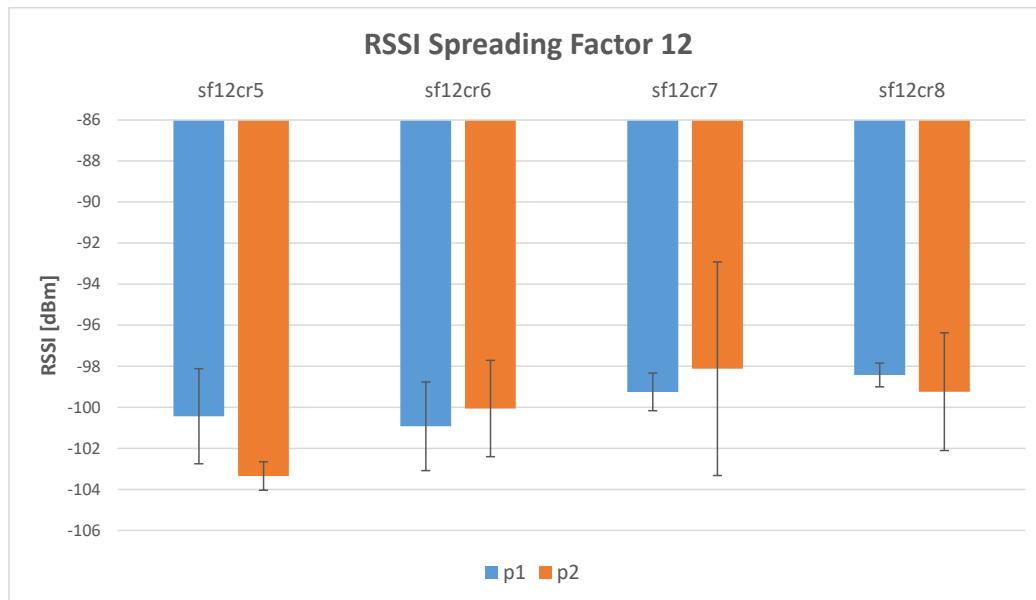


Figura A.3.18: RSSI obtenido para SF12 en el páramo.

### A.3.4. Delay

#### A.3.4.1. Delay SF9.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.19.

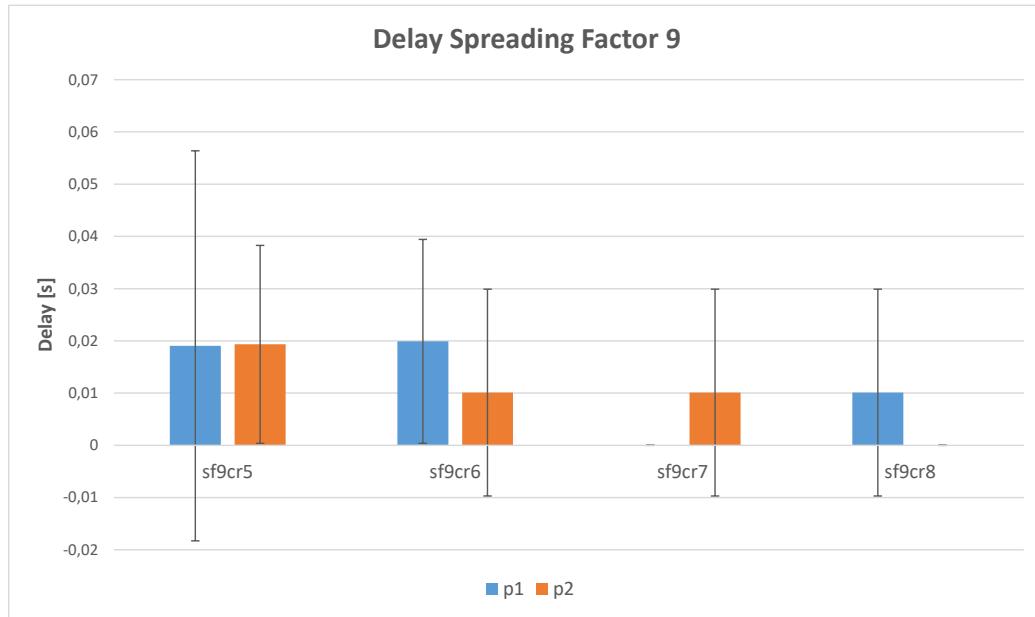


Figura A.3.19: Delay obtenido para SF9 en el páramo.

#### A.3.4.2. Delay SF10.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.20.

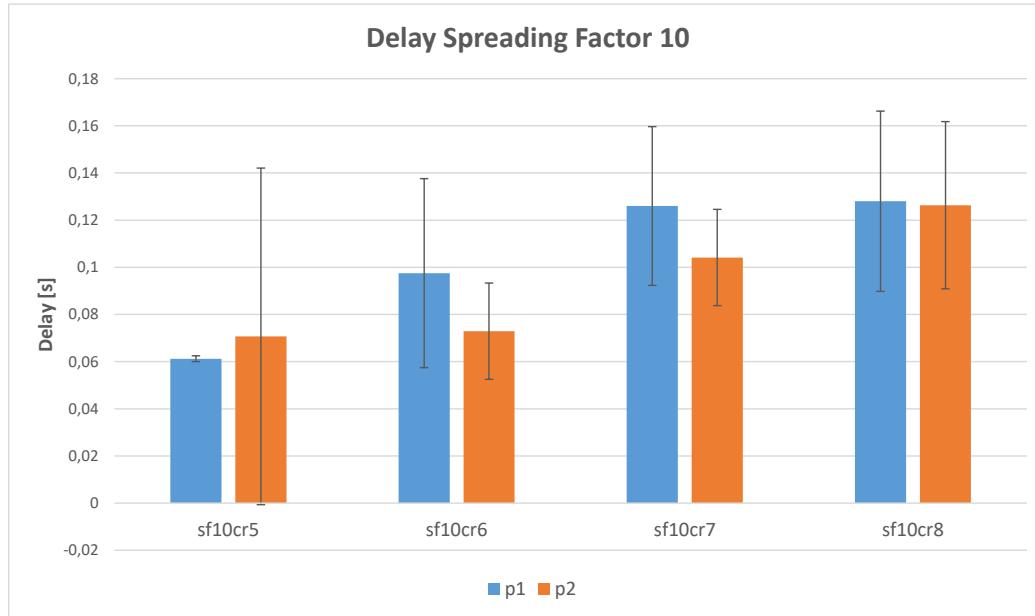


Figura A.3.20: Delay obtenido para SF10 en el páramo.

#### A.3.4.3. Delay SF11.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.21.

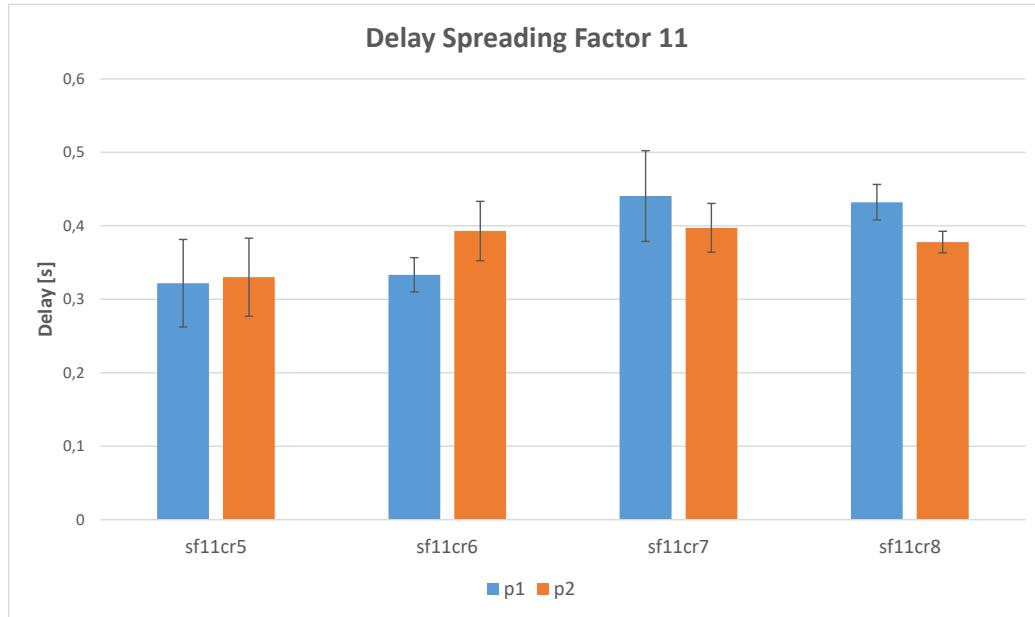


Figura A.3.21: Delay obtenido para SF11 en el páramo.

#### A.3.4.4. Delay SF12.

Los resultados se presentan en la Figura A.3.22.

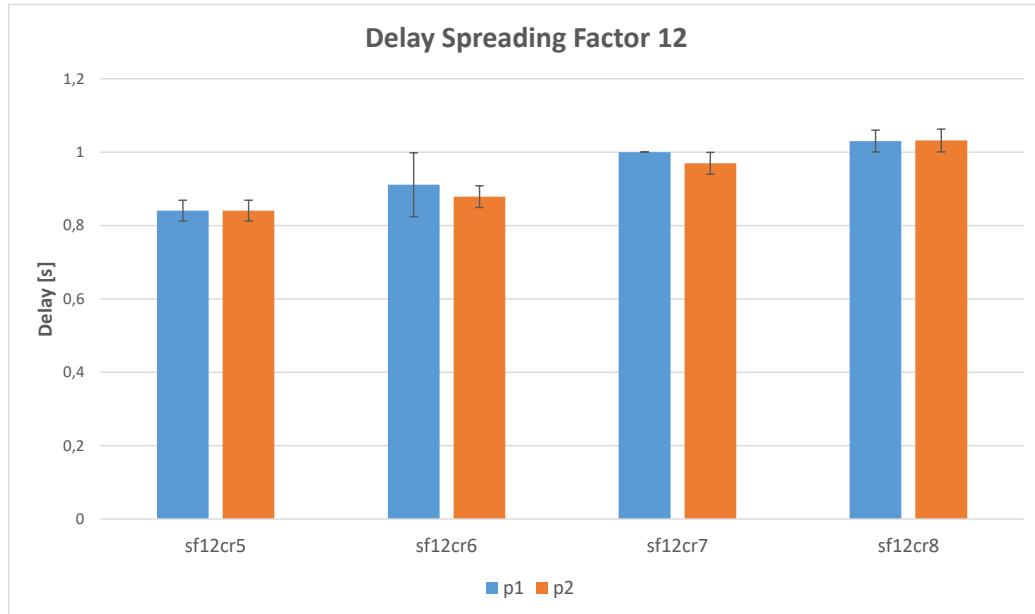


Figura A.3.22: Delay obtenido para SF12 en el páramo.

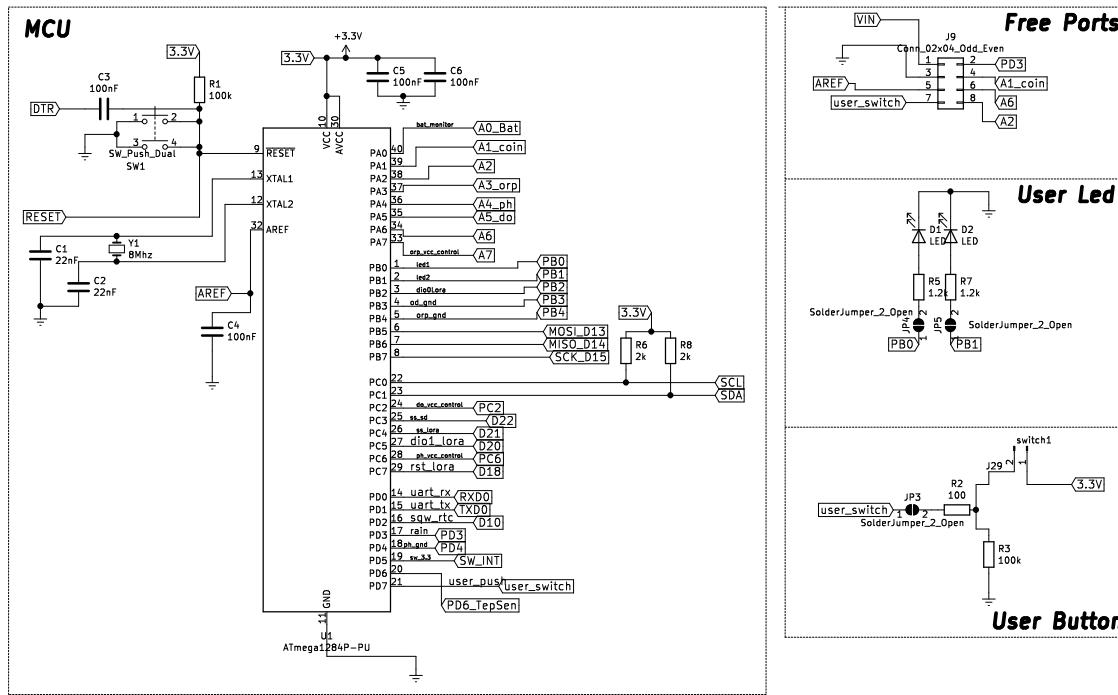
## Apéndice B

### Diseño del esquemático.

#### B.1. Introducción

En el siguiente apéndice se presenta el esquemático para la construcción de la placa de circuito impreso (PCB). Con el objetivo de facilitar el uso e instalación del prototipo, la PCB incorpora todos los módulos, sensores y componentes generales.

#### B.2. Esquemático



para la alimentación del prototipo. En relación al puerto SPI, se comunica con el módulo LoRa y la memoria micro SD, además, dichos pines se requieren para cargar programas, por tanto, estos quedaron de forma accesible. En cuanto al puerto I2C, se utilizó para la lectura del sensor de corriente y el RTC. En relación al suministro de energía, se usaron 2 reguladores de voltaje de bajo consumo, teniendo en cuenta el voltaje requerido por los elementos, dichos reguladores presentan una salida de 3.3 V.

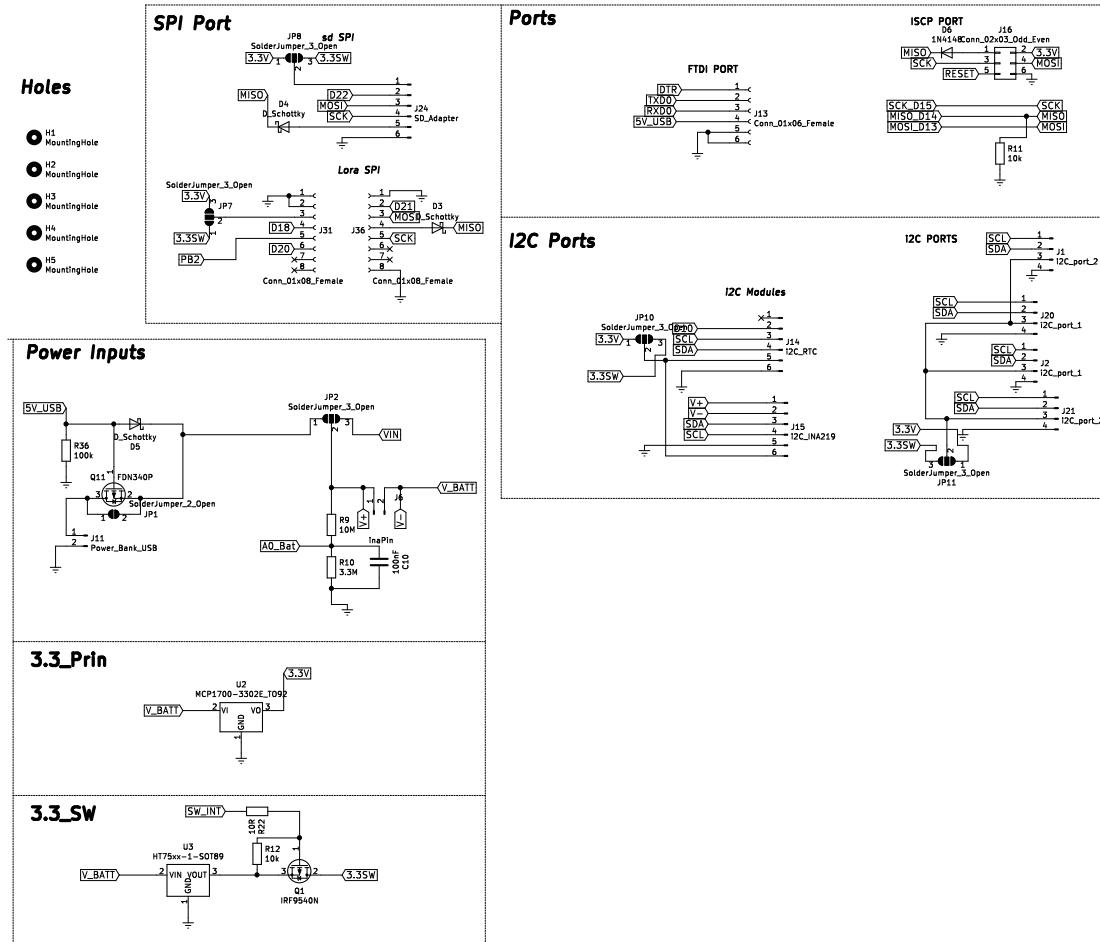


Figura B.2.3: Diseño puertos SPI, I2C y alimentación.

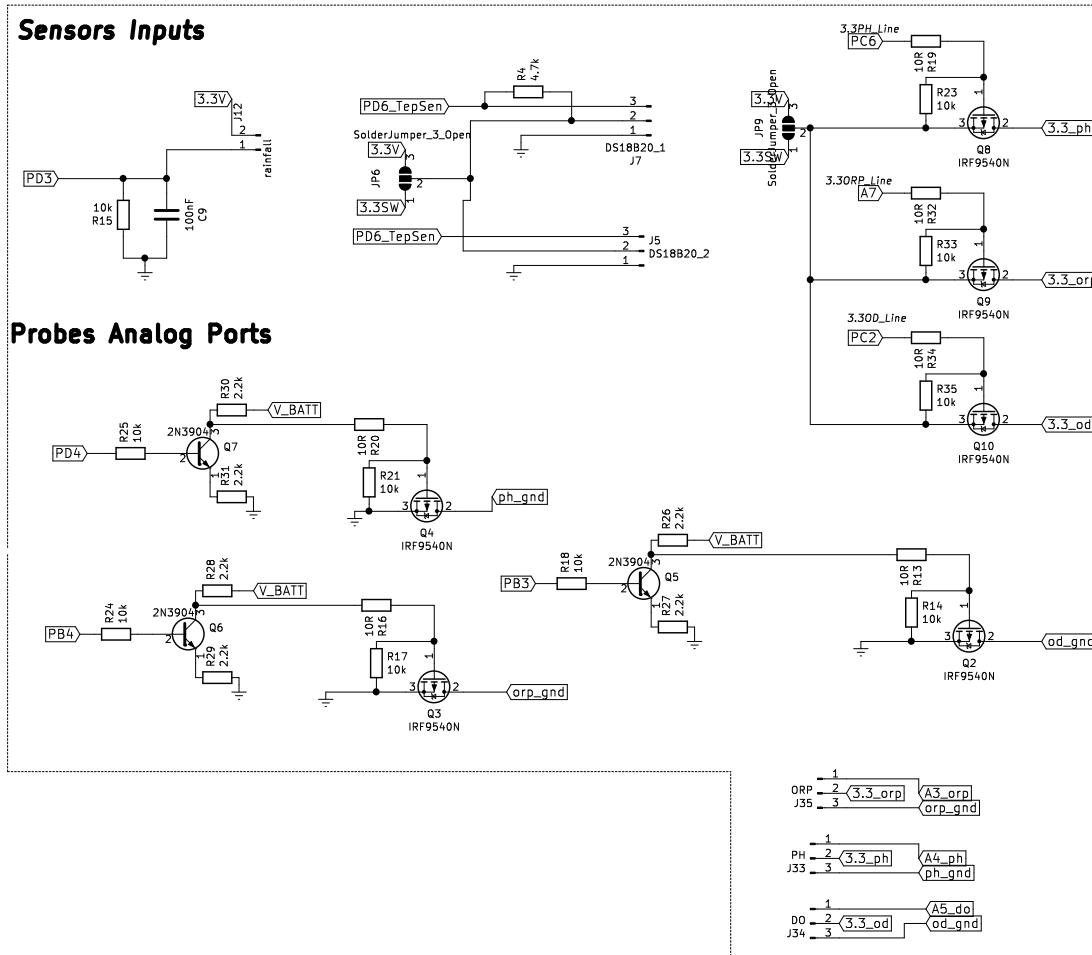


Figura B.2.2: Diseño puertos de entrada para sensores.