

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**Diseño de una red inalámbrica de sensado remoto con aplicación en un escenario de selva baja**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE LAS TELECOMUNICACIONES**

**AUTOR**

Kevin Rodolfo Zegarra Chávez

**ASESOR**

Darwin Auccapuri Quispetupa

**Lima, noviembre del 2020**

## Resumen

El presente trabajo se centra en el diseño y análisis de una red inalámbrica de sensado remoto para un escenario específico: el proyecto “Monitoreo de balances hídricos usando redes de sensores inalámbricos para estimaciones de productividad en bosque amazónico y cultivos leñosos perennes costeros”, del FONDECYT.

En el primer capítulo se explica la problemática que implica el escenario de selva baja caracterizada por la presencia de vegetación. Se explica cómo se ven afectadas las ondas que se propagan ante la presencia de vegetación y cómo existe una dependencia de la frecuencia de la señal propagada. Asimismo, se explica la implicancia económica que genera el desplegar una red en el entorno en cuestión y los objetivos del trabajo.

En el segundo capítulo se empieza con una descripción de lo que son las redes de sensores, sus características y la diversidad de tipos de redes de sensores que existen. Luego se presentan alternativas tecnológicas que pueden ser utilizadas para desplegar redes inalámbricas de sensado. Finalmente, se elige una de las tecnologías para ser utilizada en el diseño y análisis.

En el tercer capítulo se inicia con los requerimientos iniciales, divididos en requerimientos regulatorios, de aplicación y debido al entorno. Con los requerimientos planteados, se designa un diseño de red inalámbrica de sensado remoto. Se establecen topología, arquitectura y diagrama de flujo de datos de la red inalámbrica de sensado remoto.

En el cuarto y último capítulo se realiza un análisis de la red inalámbrica, en función de ciertos parámetros relativos al espectro electromagnéticos y de las tecnologías o componentes utilizados. También se analiza el tiempo de vida autónomo de los nodos sensores en función de la capacidad de las baterías a escoger. Al final, se establecen precios de los componentes necesarios para desplegar la red.

## Dedicatoria

A mis padres que me apoyaron desde el inicio.



# Índice

## Contenido

Lista de figuras .....	v
Lista de tablas .....	vii
Introducción.....	1
Capítulo 1 .....	2
Despliegue de una red inalámbrica de sensado remoto en la selva amazónica y la problemática que implica el escenario .....	2
1.1 Escenario y definición del problema.....	2
1.2 Propagación de ondas en zonas boscosas.....	5
1.2.1 Atenuación en zonas boscosas .....	8
1.2.2 Dependencia de la frecuencia .....	10
1.3 Implicancia económica del problema .....	12
1.4 Objetivos .....	13
1.4.1 Objetivo general .....	13
1.4.2 Objetivos secundarios .....	13
Capítulo 2.....	15
Alternativas tecnológicas para el despliegue de una red inalámbrica de sensado remoto para la estación climática Tambopata .....	15
2.2 Redes de sensores .....	15
2.2.1 Diversidad de topologías .....	18
2.2 Alternativas de solución .....	25
2.2.1 LoRa.....	28
2.2.2 Zigbee.....	31
2.2.3 NB-IoT .....	34
2.2.4 5G.....	37
2.2.5 Sigfox.....	38
2.3 Justificación de la propuesta de solución .....	40
2.4 Estado del arte .....	41
Capítulo 3.....	43
Diseño de una red inalámbrica de sensado remoto para la estación climática Tambopata .....	43

3.1	Requerimientos iniciales .....	43
3.1.1	Requerimientos regulatorios.....	44
3.1.2	Requerimientos técnicos y de aplicación.....	45
3.1.3	Requerimientos debido al entorno geográfico .....	54
3.2	Diseño de la red inalámbrica de sensado remoto .....	57
3.2.1	Topología y arquitectura de la red inalámbrica.....	60
3.2.2	Diagrama del flujo de datos.....	62
Capítulo 4	.....	65
Análisis de la red inalámbrica de sensado remoto para la estación climática Tambopata .....		65
4.1	Análisis del espectro electromagnético.....	66
4.1.1	Cálculos de atenuación debido a la vegetación.....	67
4.1.2	Cálculo de la tasa de transmisión de bits .....	77
4.1.3	Cálculo de tiempo de duración de paquete .....	79
4.2	Análisis del consumo energético de la red inalámbrica.....	84
4.3	Costo aproximado de los componentes necesarios para desplegar la red inalámbrica de sensado remoto .....	88
Conclusiones	.....	90
Recomendaciones	.....	91
Bibliografía	.....	92
Anexos	.....	99
Anexo 1. Hoja de datos de la antena incluida con el shield Dragino.....		100

## Lista de figuras

Figura 1: Balance hídrico de un ecosistema forestal.....	3
Figura 2: Topología propuesta para la instalación de nodos sensores. ....	4
Figura 3: Modelo de capas del bosque. ....	5
Figura 4: Comportamiento de un rayo incidente ante un medio dispersivo.....	6
Figura 5: Trayecto directo y trayectos multicamino. ....	7
Figura 6: Potencia recibida versus distancia. ....	10
Figura 7: Variación de la atenuación con la frecuencia a diferentes locaciones. ..	11
Figura 8: Arquitectura básica de un nodo de una red inalámbrica de sensores. ...	16
Figura 9: Arquitectura de un nodo de red inalámbrica de sensores. ....	17
Figura 10: Modelo de capas de una WSN.....	18
Figura 11: Casos de usos de las tecnologías inalámbricas.....	28
Figura 12: Dos chirps con diferentes Spreading Factor S. ....	29
Figura 13: Modulación LoRa. ....	29
Figura 14: Canales presentes en LoRa.....	30
Figura 15: (a) Protocolo AODV, (b) Protocolo CSMA.....	33
Figura 16: Consumo de potencia en redes estáticas y dinámicas.....	38
Figura 17: Posicionamiento de la tecnología LoRa en términos de Rango vs. Ancho de banda. ....	41
Figura 18: Arduino UNO.....	46
Figura 19: Módulo LoRa para Arduino. ....	47
Figura 20: Reloj en tiempo real de Adafruit. ....	47
Figura 21: Sensor CS650.....	48
Figura 22: Dendrómetro DC4. ....	48
Figura 23: Baterías de níquel-metal hidruro. ....	49
Figura 24: Relación de área de sensado y área de un ejemplar de aguajal grande.	50
Figura 25: Conexiones entre componentes del nodo sensor. ....	50
Figura 26: Composición del nodo sensor. ....	51
Figura 27: Nodo recolector DLOS8. ....	52
Figura 28: Ubicación del nodo recolector, en la torre de flujos de Tambopata.....	53
Figura 29: Vista lateral de los componentes dentro del alojamiento. ....	55
Figura 30: Vista superior de los componentes dentro del alojamiento. ....	56

Figura 31: Caja de alojamiento del nodo sensor. ....	57
Figura 32: Distribución de los nodos. ....	58
Figura 33: Distancias entre los nodos sensores y el nodo recolector.....	59
Figura 34: Topología de la red de sensado inalámbrico.....	60
Figura 35: Arquitectura de la red inalámbrica de sensado remoto. ....	61
Figura 36: Flujo de datos de general.....	62
Figura 37: Flujo de datos entre el cliente y el servidor. ....	63
Figura 38: Disposición de los nodos y las distancias entre estos.....	68
Figura 39: Atenuación para $A=0.38$ , $B=0.18$ y $d=142.675$ metros.....	71
Figura 40: Atenuación para $A=0.38$ , $B=0.39$ y $d=142.675$ metros.....	71
Figura 41: Máxima distancia posible entre la parcela de nodos sensores y el nodo recolector. ....	75



## Lista de tablas

Tabla 1: Constantes A, B y C dependiendo del tipo de vegetación.....	9
Tabla 2: Aplicaciones de las WSN y sus objetivos.....	19
Tabla 3: Algunos tipos de topología de redes inalámbricas de sensores.....	21
Tabla 4: Comparación entre los tipos de topologías.....	22
Tabla 5: Protocolos de comunicación de redes inalámbricas de sensores.....	24
Tabla 6: Comparación de tipos de redes inalámbricas.....	25
Tabla 7: Comparación de tecnologías inalámbricas.....	27
Tabla 8: Especificaciones técnicas de Zigbee.....	32
Tabla 9: Evolución de las categorías UE para MTC/IoT.....	35
Tabla 10: Revisión de las tecnologías LoRa, Sigfox, NB-IoT y GPRS.....	36
Tabla 11: Distancias entre los nodos sensores y el nodo recolector.....	59
Tabla 12: Valores de las distancias según la disposición de los nodos.....	68
Tabla 13: Atenuación por vegetación cuando los nodos se encuentran al mismo nivel del suelo.....	69
Tabla 14: Atenuación por vegetación cuando el nodo recolector se encuentra a 30 metros.....	70
Tabla 15: Atenuación por vegetación cuando el nodo recolector se encuentra a 40 metros.....	70
Tabla 16: Pérdidas totales por atenuación y espacio libre para los tres casos planteados.....	72
Tabla 17: Potencia de recepción en el nodo recolector para todos los nodos de la red inalámbrica en el caso dónde los nodos se encuentran a la misma altura.....	74
Tabla 18: Comparación de atenuación por vegetación usando diferentes tecnologías inalámbricas.....	76
Tabla 19: Tasas de transmisión de bits cuando varia la tasa de codificación.....	77
Tabla 20: Valores de tiempos de preámbulo, tiempo de la data, y tiempo en el aire para el escenario del presente diseño.....	81
Tabla 21: Posibles intervalos de transmisión para diferentes ventanas de recepción.....	83
Tabla 22: Consumo aproximado de un nodo sensor durante una comunicación.....	86
Tabla 23: Tiempo de autonomía de un nodo sensor dependiendo de la capacidad de su batería.....	86

Tabla 24: Consumo aproximado de un nodo sensor usando un transceptor Zigbee para Arduino..... 87

Tabla 25: Precio de los componentes necesarios para desplegar la red inalámbrica de sensado remoto..... 89



## Introducción

Con el paso de las últimas décadas, se hace cada vez más notable la importancia de mantener a nuestros ecosistemas estables, con el fin de contrarrestar los efectos negativos de la contaminación ambiental y el calentamiento global. Un ecosistema bien conservado será productivo, y este permitirá que los organismos vivos que lo habitan subsistan por más tiempo. Para que un ecosistema se mantenga en buen estado, es necesaria una constante vigilancia que permita conocer sus cambios durante el tiempo; es por ello que en la actualidad se hace uso de redes inalámbricas para el monitoreo de los ecosistemas en cuestión. Su funcionamiento se basa en el uso de sensores estandarizados, que se conecten a una red que permita enviar la data de los sensores a un nodo recolector para su estudio.

En el presente trabajo se propone el diseño de una red inalámbrica de sensado remoto haciendo uso de la tecnología LoRa, cuyas principales características son el bajo consumo de energía requerida para transmitir y el alcance extendido que logra. El diseño tiene que considerar la problemática que implica el entorno de selva baja, en la estación climatológica Tambopata, que se caracteriza por su alta densidad de vegetación.

Primero, se expondrá la problemática presente en cuanto a la transmisión inalámbrica en zonas de vegetación densa. Se detallará el problema de la obstaculización y el efecto que producen en las ondas electromagnéticas. Luego, se revisarán alternativas de tecnologías inalámbricas que podrían ser soluciones al problema planteado, para tener un entendimiento de los diferentes acercamientos que se pueden tomar hacia la solución del problema. Siguiendo con el desarrollo de la tesis, se propondrá un diseño de una red inalámbrica de sensado remoto para el escenario descrito previamente, haciendo el uso de LoRa. Finalmente, se realizará un análisis del diseño planteado en el capítulo anterior. El objetivo principal de esta tesis es la obtención de un diseño de la red mencionada anteriormente, y a partir de esto realizar un análisis imparcial del mismo.



## Capítulo 1

### **Despliegue de una red inalámbrica de sensado remoto en la selva amazónica y la problemática que implica el escenario**

En el presente capítulo se expondrá las dificultades encontradas al querer desplegar una red inalámbrica en un escenario de selva baja, cómo es la estación climática Tambopata, cuál es la base teórica de dichas dificultades, la implicancia económica presente y los objetivos de la tesis.

#### **1.1 Escenario y definición del problema**

El proyecto Monitoreo de balances hídricos usando redes de sensores inalámbricos para estimaciones de productividad en bosque amazónico y cultivos leñosos perennes costeros, financiado principalmente por el CONCYTEC-FONDECYT, requiere hacer uso

de una red inalámbrica para lograr la conexión de sensores para transmitir información específica para estimar el balance hídrico de una zona[1].

El balance hídrico es la relación de componentes de agua que ingresan y salen de un ecosistema u organismo vivo, y que afecta el comportamiento y productividad de los mismos. Se compone de parámetros que incluyen principalmente a la evapotranspiración y la precipitación, que a su vez son calculados en base de variables más específicas cómo se muestra en la Figura 1[2].

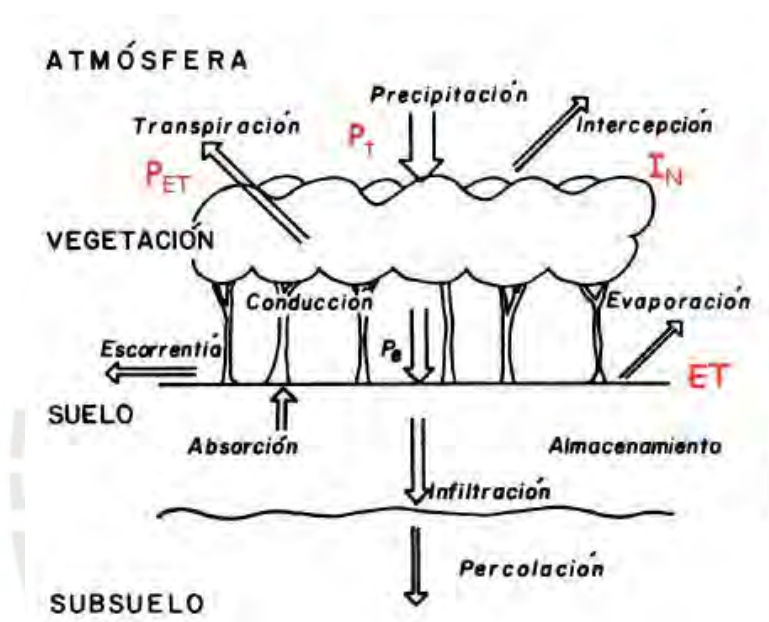


Figura 1: Balance hídrico de un ecosistema forestal.

Fuente: [3].

Una manera de estimar el balance hídrico de un ecosistema, es medir el volumen de agua en el suelo (conocido cómo disponibilidad instantánea de agua en el suelo) y la variación en el diámetro de árboles, que indica la demanda de evapotranspiración. Estos parámetros deberán ser medidos mediante dos tipos de sensores: dendrómetros digitales, que miden la variación del diámetro de árboles, y de sensores de contenido volumétrico de agua. Esta información deberá ser enviada a un punto de recolección de datos, para que luego sea procesada con fines de estudio[4]. Asimismo, se ha definido un área dónde se ubicarán los sensores, denominada cómo parcela. También se ha dispuesto de una distancia de 50 metros entre la parcela y el punto de recolección de

datos, que será llamado nodo recolector. En la Figura 2 se muestra una disposición general de los elementos.

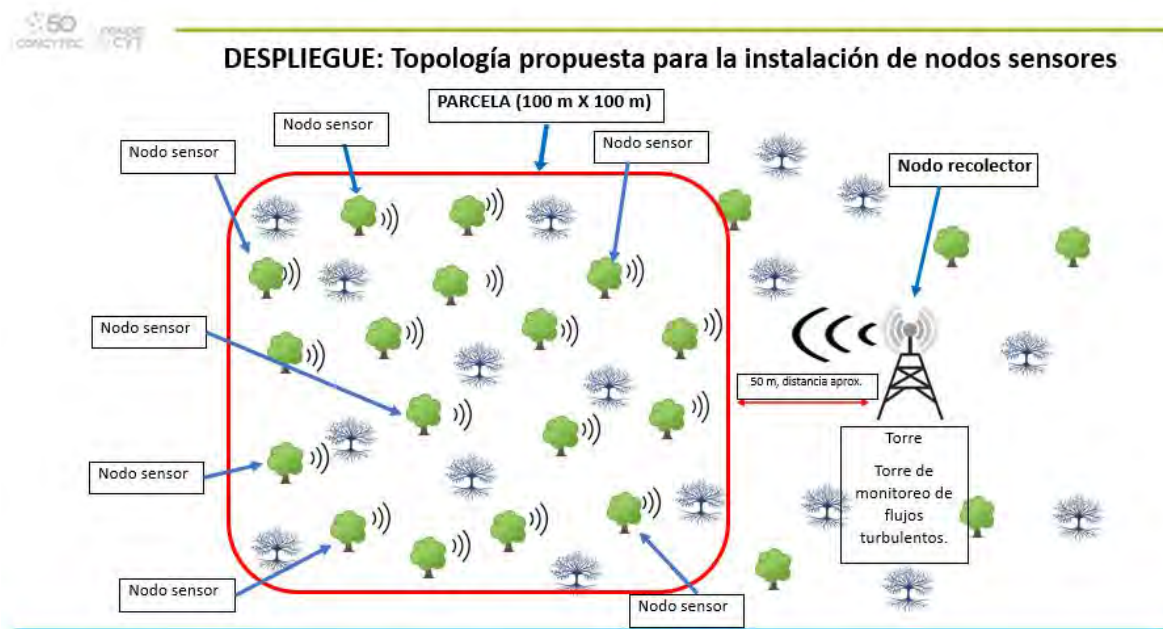


Figura 2: Topología propuesta para la instalación de nodos sensores.

Fuente: [4].

El principal problema a tratar en el desarrollo del presente trabajo es la atenuación que sufren las ondas electromagnéticas en zonas con vegetación. Un estudio del año 2003 presentado de manera conjunta por el Instituto de Radioingeniería y Electrónica y la Academia Rusa de Ciencias, muestra que existen modelos para describir la atenuación de las ondas electromagnéticas debido a elementos vegetativos basados en el cálculo teórico o experimental de la constante dieléctrica de las plantas; sin embargo, aún persisten problemas sin solucionar, principalmente a causa de la cantidad extensa de tipos de vegetación existente. Cada tipo de vegetación puede tener un modelo de constante dieléctrica diferente para las bandas de 100 a 10000 MHz de frecuencia[5]. Una referencia más reciente publicada en el Asian Journal of Scientific Research el año 2018, proporciona un modelo básico de las 4 capas de una zona boscosa que afectan el comportamiento de las ondas electromagnéticas[6]. A continuación, en la Figura 3 se mostrará el modelo mencionado.

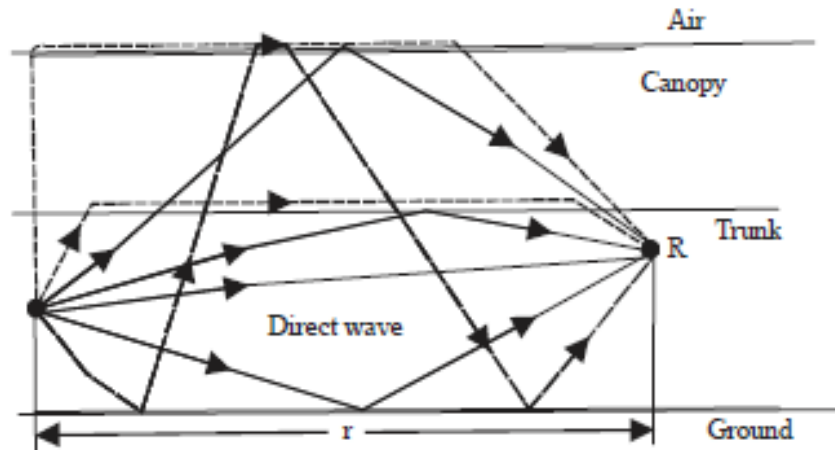


Figura 3: Modelo de capas del bosque.

Fuente: [6].

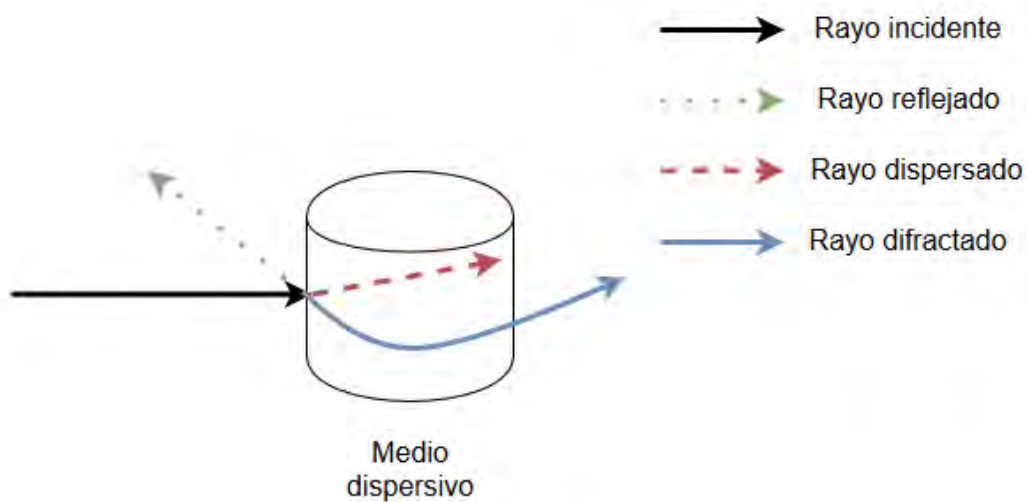
Cómo se observa en la figura anterior, las 4 capas que afectan a las ondas electromagnéticas son el suelo, los troncos, las copas de los árboles y el aire. En el siguiente subcapítulo de la presente tesis se tendrá el entendimiento del comportamiento de las ondas en este entorno.

## 1.2 Propagación de ondas en zonas boscosas

El comportamiento de las ondas electromagnéticas en zonas boscosas se ve afectado por la gran cantidad de obstáculos presentes, que en gran mayoría vienen a ser árboles de distintas especies. Cada uno de estos árboles representa independientemente una fuente de distorsión del comportamiento de la onda electromagnética viajera, que en consecuencia sufre efectos como la reflexión, refracción y difracción. Los efectos mencionados son producto del encuentro de la onda con un obstáculo, que en nuestro caso viene a ser un medio dispersivo, es decir un medio cuyos parámetros afecten a la propagación de la onda sean función de la frecuencia de dicha onda[7][8]. Para graficar de manera más adecuada el comportamiento de las ondas, se grafica la dirección de propagación en forma de un rayo. Esta dirección de propagación es la misma que la dirección del vector de Poynting, cuya ecuación viene dada por (1)[9].

$$S(t) = E(t) \times H(t) \quad (1)$$

A el valor  $S(t)$  se le conoce como vector de Poynting instantáneo, y sus unidades son  $\text{Watts/m}^2$ . Este vector es perpendicular a las direcciones de la intensidad de campo eléctrico  $E(t)$  y de la intensidad de campo magnético  $H(t)$ . Por consiguiente, se puede representar a la onda electromagnética viajera como un rayo con la misma dirección que el vector de Poynting[9][10]. En la Figura 4 se muestran algunos de los efectos que sufren las ondas electromagnéticas, representadas por rayos, cuando inciden sobre medios dispersivos.



*Figura 4: Comportamiento de un rayo incidente ante un medio dispersivo.*

Fuente: Adaptado de [7].

Debido a que las señales emitidas por un transmisor dentro de una zona con vegetación sufrirán cambios en sus trayectorias debido a los efectos mencionados previamente, la señal recibida por el receptor será una combinación de distintas componentes. Esto da origen a lo que se conoce como multicamino, que es el resultado de más de un camino de componentes entre los nodos transmisor y receptor. El efecto multicamino dependerá entonces del entorno en dónde se encuentren los dispositivos de transmisión y recepción, ya que los elementos del entorno mencionado son los que crean los distintos caminos que siguen las señales emitidas[11]. En la Figura 5 se representa el efecto multicamino en un entorno que cuenta con obstáculos como árboles y montañas, que generan los caminos alternos al camino directo, que será explicado a continuación.

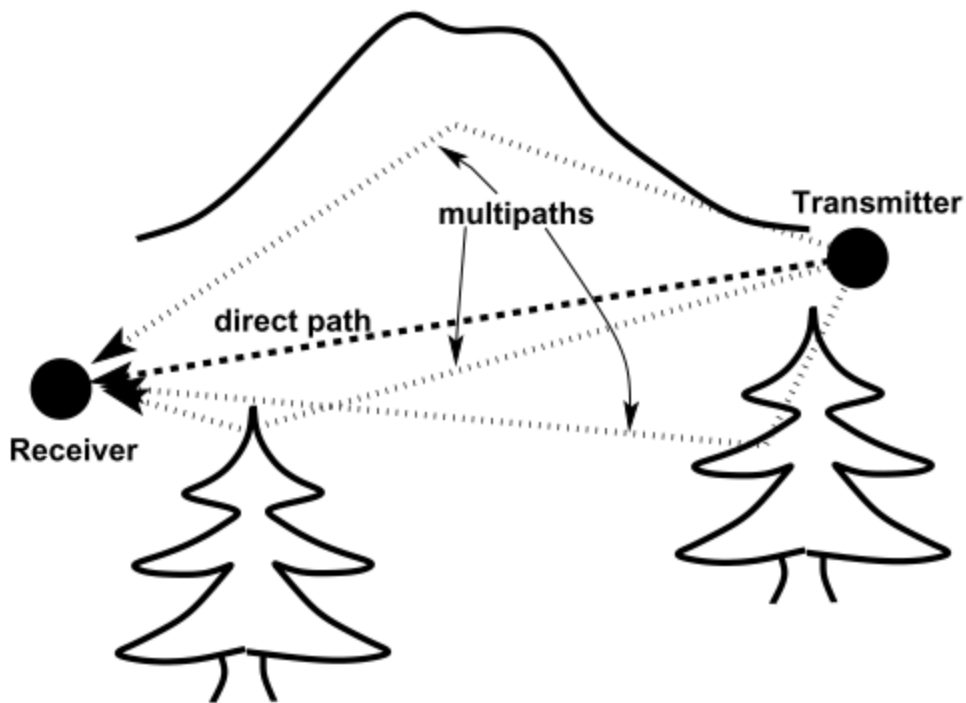


Figura 5: Trayecto directo y trayectos multicamino.

Fuente: [12].

Cómo se aprecia, entre el transmisor y receptor además de los trayectos multicamino también existe un camino directo, esto ocurre cuando no hay un obstáculo que impida la visualización extremo a extremo y se denomina LOS por sus siglas en inglés *Line of Sight*. En caso de que existe un obstáculo que no permita la visibilidad entre los puntos de ubicación del transmisor y receptor, se denomina a esta característica del escenario cómo *No Line of Sight* o NLOS. Para ambos casos existen modelos matemáticos que buscan aproximarse al comportamiento multicamino, y se basan en los tipos de componentes de dichos casos. En el escenario con LOS hay una componente directa que tendrá mayor influencia en la sumatoria total todos los componentes provenientes de los diferentes trayectos. En el caso de NLOS, en cambio, no existe dicha componente directa que se diferencie de las demás que llegan a través de diferentes caminos. Se entiende entonces que ambos casos son mutuamente excluyentes. El impacto que tiene el tipo de escenario se puede apreciar, por ejemplo, cuando se estudia el caso de redes móviles ultra densas; en estos sistemas se observa que cuando existe línea de vista la

cobertura de las celdas celulares es mayor al caso contrario que no cuenta con línea de vista[13][14].

Para nuestro caso de estudio, al encontrarnos dentro de un escenario con alta densidad de vegetación debido a la cantidad de árboles presentes, se considerarán cómo modelos teóricos a los dedicados al caso sin línea de vista o NLOS.

### 1.2.1 Atenuación en zonas boscosas

La atenuación en zonas con alta densidad vegetativa (diversos tipos de plantas y árboles) tiene dos componentes principales: la atenuación por cada obstáculo en sí mismo y la atenuación por los diferentes caminos que toma una señal. La UIT propone una recomendación que aproxima el valor de la atenuación en zonas boscosas para una comunicación entre dos terminales, uno dentro de una zona boscosa y otro fuera. Este valor de atenuación es dependiente del tipo de vegetación y de la profundidad a la que se encuentra el terminal dentro de la vegetación, y su ecuación viene dada por (2)[15]:

$$A_{ev} = A_m \left[ 1 - e^{-\frac{d\gamma}{A_m}} \right] \quad (2)$$

En esta ecuación se busca calcular una atenuación excesiva debido a la presencia de vegetación  $A_{ev}$ , en función de tres parámetros: la longitud  $d$  del recorrido de la onda electromagnética dentro de la vegetación en metros, la atenuación característica del tipo de vegetación dentro de trayectos cortos  $\gamma$  en decibelios por metro; y finalmente un valor de atenuación máxima denominado  $A_m$ , que es calculado experimentalmente para tipos de vegetación y distancias  $d$  diferentes.

En base a la recomendación UIT-R de atenuación debido a la vegetación, se han realizado múltiples experimentaciones para visualizar cómo cambia o cómo se puede adaptar mejor la ecuación (2) expuesta previamente. Un trabajo realizado en Colombia, por alumnos de la Universidad Nacional de Colombia, hace uso de diferentes

aproximaciones de la ecuación (2) para casos de vegetación con hojas y sin hojas. Estas se muestran en las ecuación (3) a continuación[16]:

$$L = Af^B d^C \quad (3)$$

En la ecuación anterior,  $L$  representa las pérdidas en decibelios al recorrer una distancia  $d$  metros, y los valores de  $A$ ,  $B$  y  $C$  son constantes empíricas que varían de la siguiente manera:

Tabla 1: Constantes A, B y C dependiendo del tipo de vegetación.

	A	B	C
Vegetación con hojas	0.37	0.18	0.59
Vegetación sin hojas	0.39	0.39	0.25

Fuente: Adaptado de [16].

Estos valores demuestran que la atenuación depende del tipo de vegetación que atraviesa la señal electromagnética, si esta vegetación presente hojas o no afecta el valor de las pérdidas. Siguiendo con el análisis de la atenuación, y basándonos en la ecuación (2), se puede observar que hay un factor exponencial en el cálculo. Existe evidencia que puede comprobar este comportamiento, cómo un trabajo realizado en la India por el *PES Institute of Technology*, en el cual se demuestra que hasta cierta distancia una señal transmitida a través de vegetación presenta una caída exponencial en potencia. Luego de dicha distancia, que para el experimento es de 500 metros aproximadamente, la potencia de la señal empieza a tener un comportamiento lineal horizontal, es decir entorno a un valor constante[17]. En la Figura 6, se muestra lo anteriormente mencionado, en un gráfico potencia versus distancia.

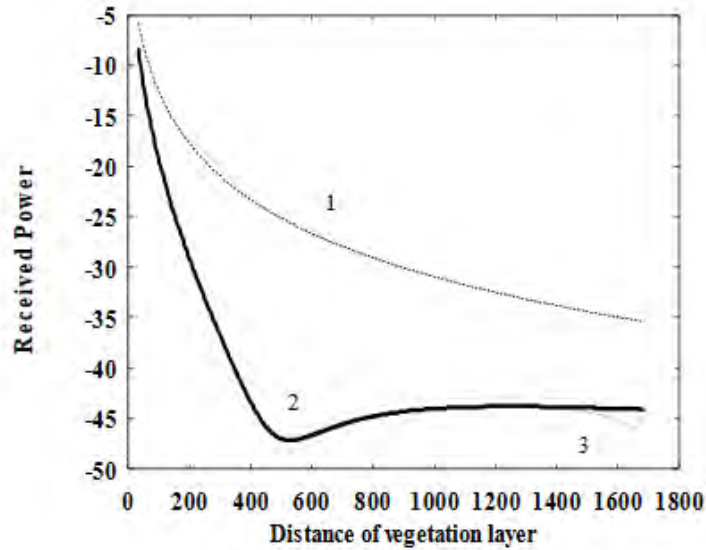


Figura 6: Potencia recibida versus distancia.

Fuente: [17].

Es importante resaltar que el resultado obtenido previamente no corresponde a una generalización exacta del comportamiento de la señal electromagnética, sino que es para un caso específico establecido en el estudio. Sin embargo, dicho resultado permite visualizar el factor exponencial de la ecuación (2) y a su vez brinda una idea de cómo la distancia a la cual se recibe la señal es un ítem importante. Hasta el momento no se ha hecho mención en el parámetro de la frecuencia, cuyo valor tiene un impacto importante en la atenuación de la señal. A continuación, se explicará cómo este parámetro influye en la atenuación debido a la vegetación.

### 1.2.2 Dependencia de la frecuencia

En el subcapítulo anterior, se inició con la ecuación (2) para realizar un breve análisis de la atenuación presente por la vegetación. En dicha ecuación existe un factor  $A_m$ , que como se mencionó varía de acuerdo al tipo de vegetación presente. En este factor es dónde está incluida la frecuencia, y es por ello que este factor tiene una propia fórmula que varía con la frecuencia y presenta otros parámetros que, a partir de mediciones, son calculados. La ecuación (4) muestra cómo varía el factor  $A_m$  [15].

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (4)$$

Los valores  $A_1$  (en decibelios) y  $\alpha$  (número real), son hallados de manera experimental. A partir del valor de  $A_m$ , hallado empíricamente y variando la frecuencia, se pueden calcular  $A_1$  y  $\alpha$ .

Sobre la atenuación a diferentes frecuencias se han realizado diversos estudios que comprueban las variaciones presentes. En este segmento, se darán a conocer dos estudios en los cuales se experimenta con transmisión a través de vegetación a diversas frecuencias. El primer estudio, realizado para la conferencia *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, se simuló una transmisión satelital haciendo uso de una aeronave controlable a 200 metros de altura, con frecuencias de azimut de recepción variables entre  $20^\circ$  y  $90^\circ$ . Las frecuencias utilizadas para la comunicación fueron de 2, 3, 5 y 6.5 GHz. Se confirmó que a mayor frecuencia, la atenuación se incrementaba [18]. En la Figura 7 se mostrará cómo se dio esta variación en atenuación.

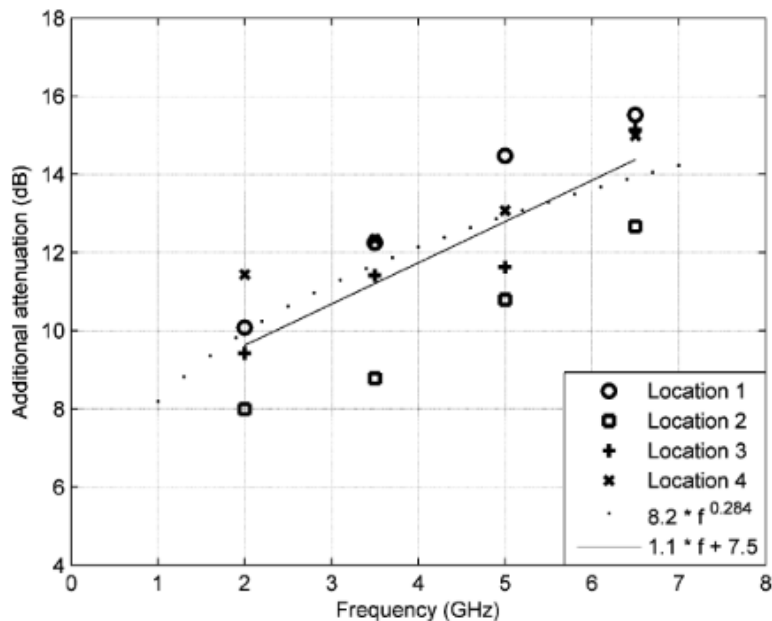


Figura 7: Variación de la atenuación con la frecuencia a diferentes locaciones.

Fuente: [18].

Se observa que el comportamiento de la variación de atenuación dependiendo de la frecuencia se asimila a una recta en ascenso.

El segundo estudio, presentado en el *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, se basa en las frecuencias de 920 MHz y 2.4 GHz. En este caso, se realizó la transmisión haciendo uso de diferentes protocolos de comunicación (debido a las diferentes frecuencias) y se movió el receptor desde una distancia de 4.6 metros hasta 50 metros del transmisor. Se hicieron pruebas tanto a 1.56 metros de altura como a 3.50 metros de altura, y la altura del receptor también fue variando entre estos dos valores. Asimismo, las ondas electromagnéticas tuvieron polarizaciones lineales horizontal y vertical. Se concluyó que la atenuación para ambas frecuencias sigue la misma tendencia para la altura de 1.56 metros, cabe resaltar que en esta zona la presencia de hojas era menor que a la altura de 3.50 metros. Sin embargo, a la altura de 3.50 metros la atenuación en la banda de 2.4 GHz fue mayor que a la de 920 MHz. Además, para la banda de 2.4 GHz la atenuación fue mayor para la polarización lineal horizontal que para la polarización lineal vertical; en la banda de 920 MHz ocurrió lo contrario[19].

Se puede concluir de la teoría, confirmada por los estudios mostrados, que la frecuencia influye considerablemente en la atenuación de ondas electromagnéticas en zonas con vegetación.

### **1.3 Implicancia económica del problema**

El principal desafío económico que nos enfrenta el problema, son los costos de la implementación de una red de sensores. Lo que se busca con la red mencionada es recolectar información periódicamente, de manera automatizada, con el fin de reducir al mínimo la presencia de personas implicadas en el proceso de recolección y consecuente procesamiento de dicha información. Es por ello que todo se reduce a los costos de los componentes, la implementación y el mantenimiento de la red.

Los costos mencionados anteriormente dependen directamente de características de la red a implementar; características como el tamaño de la red (el número de nodos

recolectores de información), el tipo de aplicación de la red, el tipo de sensores que se implementarán y el mantenimiento que requieren los sensores y nodos transmisores[20]. Dado que en nuestro caso los sensores se desplegarán en una parcela de 100 x 100 metros, se hará uso de 10 nodos sensores. Los datos que proporcionarán los sensores son principalmente: temperatura ambiente, volumen de los árboles, permitividad, humedad, entre otros que se irán añadiendo dependiendo del diseño (por ejemplo, un identificador de cada nodo). Los precios de estos sensores pueden variar y no son conocidos ya que aún no se han definido. Finalmente, el mantenimiento será periódico y se definirá el tiempo del periodo de revisión con los ingenieros a cargo del proyecto. Este puede considerarse un costo posterior a los mencionados previamente.

## **1.4 Objetivos**

Este subcapítulo se centrará en definir qué es lo que se espera obtener del presente trabajo, de manera general y con los objetivos puntuales que conllevan.

### **1.4.1 Objetivo general**

Se espera realizar el diseño de una red inalámbrica de sensado remoto, que pueda cumplir con lo requerido para la obtención de información de parámetros climáticos en un entorno con alta densidad de vegetación y haciendo uso de la tecnología LoRa. Dicho diseño se pondrá en análisis en el capítulo 4 del presente trabajo.

### **1.4.2 Objetivos secundarios**

- Se espera tener conocimiento de todas las alternativas tecnológicas presentes para posibles soluciones al problema. Conocer dichas alternativas permitirá compararlas, de acuerdo a ciertos parámetros, con la tecnología utilizada para el diseño, la cual será LoRa.

- Establecer una metodología de análisis del diseño, que a su vez permita comparaciones en algunos puntos del análisis con las otras alternativas mencionadas.
- Realizar un análisis del tiempo de autonomía de la red inalámbrica de sensado remoto dependiendo de los componentes de los nodos. Además, se espera contar con un estimado del costo de todo el equipamiento necesario para desplegar la red inalámbrica.





## Capítulo 2

### **Alternativas tecnológicas para el despliegue de una red inalámbrica de sensado remoto para la estación climática Tambopata**

En el presente capítulo se darán a conocer las diferentes alternativas tecnológicas para redes inalámbricas de sensores, partiendo desde la definición de una red de sensores y los tipos que existen. De las alternativas mostradas, se escogerá una para realizar el diseño de una red de sensado remoto en el siguiente capítulo. Asimismo, se explicará el motivo de la elección y el estado del arte de la tecnología a usar.

#### **2.2 Redes de sensores**

Las redes inalámbricas de sensores (conocidas mundialmente por sus siglas en inglés WSN) son un conjunto de nodos que se comunican entre sí mediante señales inalámbricas. Dichos nodos están compuestos, necesaria y principalmente, por uno o

más sensores y un transceptor. La principal característica de un nodo perteneciente a una WSN es que es limitado tanto en memoria como en capacidad computacional. Esto es debido a que la información que recibe de los sensores no demanda espacio de memoria ni capacidad computacional alta para ser procesada[21].

Si se visualiza a un nodo cómo un sistema, existirían cuatro subsistemas principales que conforman al nodo:

- Subsistema sensor: Conformado por el sensor o los sensores.
- Subsistema de poder: Se encarga de proveer la energía para que el nodo pueda operar en su totalidad, es la fuente de poder para el funcionamiento del nodo.
- Subsistema computacional: Conformado por controlador y la memoria. Es el subsistema principal puesto que aquí se procesa la información recibida o por enviar.
- Subsistema de comunicación: Conformado por el transmisor y receptor. Por lo general es un dispositivo con ambas funcionalidades, un transceptor[22].

A continuación, se mostrarán diagramas de arquitecturas básicas de un nodo perteneciente a una red inalámbrica de sensores.

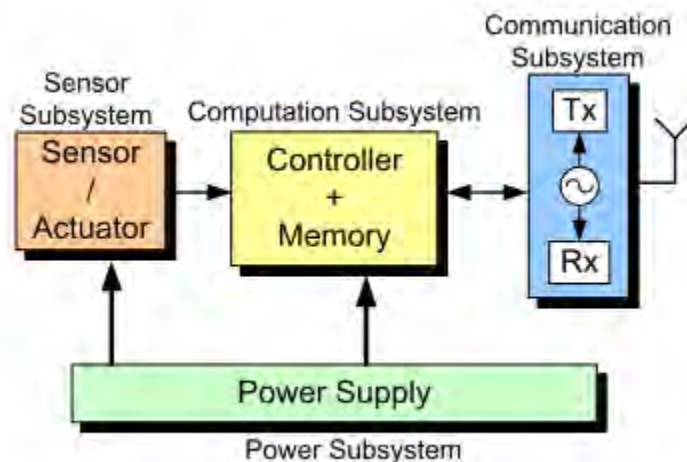


Figura 8: Arquitectura básica de un nodo de una red inalámbrica de sensores.

Fuente: [22].

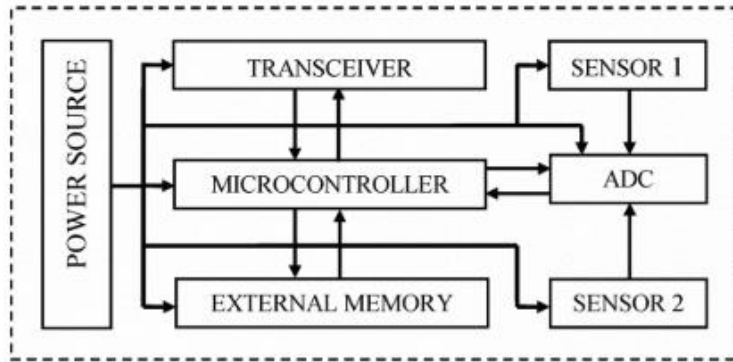


Figura 9: Arquitectura de un nodo de red inalámbrica de sensores.

Fuente: [23].

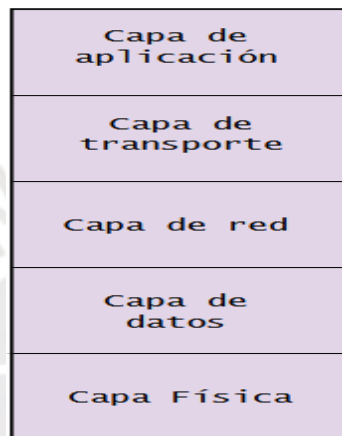
En la Figura 9, se puede apreciar los mismos subsistemas explicados previamente, pero distribuidos de manera diferente. Se toma como bloques separados el controlador y la memoria, además de tener presente un bloque *ADC*, que viene a ser un conversor análogo digital; un conversor análogo digital es requerido cuando el sensor produce datos análogos, de ser un sensor digital el conversor no sería necesario. Finalmente, existen tipos de nodos según su función en la red y según la topología de red, estos serán descritos posteriormente.

Dejando de lado al nodo, es hora de entrar en detalle de cómo funciona una red inalámbrica de sensores de manera completa. Para ello, se tiene que detallar el modelo de capas que presenta una red inalámbrica de sensores, a la cual también denominaremos WSN a partir de ahora. Una WSN tiene una estructura de capas basada en el modelo OSI, pero con modificaciones para hacerla más compacta. Desde el primer nivel hacia el último las capas son:

- Capa física: En esta capa están definidas las frecuencias de operación, cómo se genera la frecuencia de la señal portadora, la detección, la modulación y la encriptación.
- Capa de datos: Responsable principalmente del mecanismo de control de acceso al medio (MAC por sus siglas en inglés) y corrección de errores.
- Capa de red: Se hace cargo del enrutamiento de las tramas de datos.

- Capa de transporte: Se encarga de la comunicación entre aplicaciones o procesos.
- Capa de aplicación: Responsable del tramo final de comunicación hacia el usuario, y dependiendo de la aplicación de la WSN puede tener diferentes utilidades[24][25].

En la Figura 10 se muestra el modelo de capas de una WSN.



*Figura 10: Modelo de capas de una WSN.*

Fuente: Adaptado de [25].

Diferentes tecnologías inalámbricas hacen uso de diferentes protocolos en cada capa, esto debido a que las aplicaciones que hacen uso de dichas tecnologías tienen diferentes características, así como los escenarios en dónde se establecen las WSN; algunas de estas aplicaciones se explicarán posteriormente. En este mismo capítulo y para cada tipo de tecnología mencionada como alternativa de solución, se darán detalles de que protocolos usan para las diferentes capas del modelo de capas de una WSN.

### **2.2.1 Diversidad de topologías**

Para adentrarnos en el tema de diversidad de topologías de redes inalámbricas de sensores, primero se tienen que conocer las aplicaciones de estas redes. Dependiendo

de la aplicación, los requerimientos para una WSN pueden variar. En la actualidad existen diversos tipos de aplicación; que se pueden dividir en gran escala en aplicaciones para la industria, aplicaciones para el día a día de la sociedad y aplicaciones medioambientales. Por ejemplo, en la industria tenemos el caso de las aplicaciones agrícolas, que principalmente buscan el mantenimiento y protección de los campos de cultivos. En el día a día tenemos aplicaciones de vigilancia y automatización de funcionalidades en edificios. Por último, pero no menos importante, las aplicaciones ambientales acogen aplicaciones de monitoreo y protección de animales en diversos hábitats[26].

El impacto que tiene cada aplicación varía dependiendo del campo en el que se encuentre, por ejemplo, la preservación de la flora y fauna puede verse beneficiada con el monitoreo constante del hábitat en el cual se encuentra. Los objetivos de estas aplicaciones se describirán a continuación, en la Tabla 2, dónde se muestra diferentes aplicaciones para diferentes sectores y una breve descripción del objetivo de cada una.

Tabla 2: Aplicaciones de las WSN y sus objetivos.

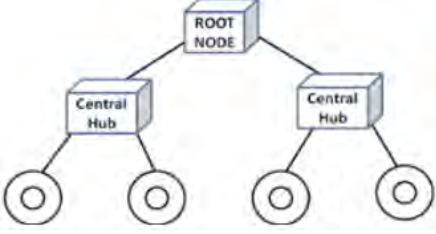
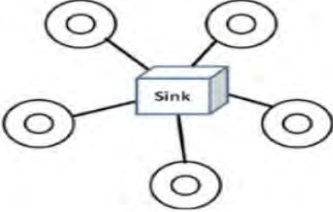
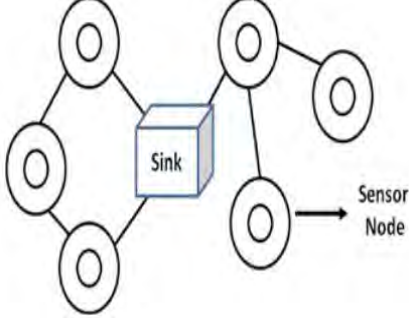
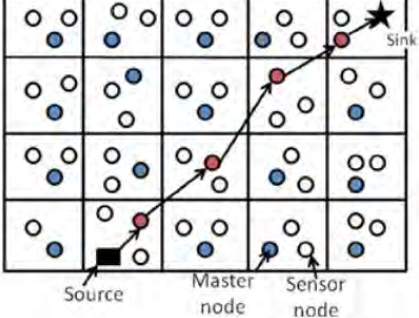
Aplicación	Objetivo
Agricultura de precisión	Asegurar un ambiente óptimo para las actividades de cultivo.
Monitoreo ambiental	Prevención de desastres naturales, cómo por ejemplo inundaciones, incendios forestales, fugas de gas, etc.
Monitoreo de vehículos	Parqueo inteligente, prevención de tráfico.
Monitoreo en hospitales	Prevenir fatalidades en pacientes en riesgo, mediante el monitoreo de signos vitales.
Edificios inteligentes	Automatizar algunas funcionalidades de los edificios.
Seguridad y vigilancia	Detección temprana de amenazas en algún entorno.
Monitoreo de vida salvaje	Protección de la fauna y de su entorno, al mismo tiempo monitoreo de su calidad de vida.

Fuente: Adaptado de [27].

Las diferentes aplicaciones mostradas no tienen el mismo tamaño (es decir número de nodos) ni cubren la misma área, es por ello que existen diferentes tipos de topología de redes inalámbricas de sensores. Cada tipo de topología tiene ventajas y desventajas respecto a las otras en cuanto a parámetros de la red WSN, incluso algunos de ellos guardan relación directa con otros. Por ejemplo, si se usan potencias de transmisión que aseguren un margen de recepción correcto, pero limitado, se puede prolongar el tiempo de vida de la red. Existen modelos que permiten establecer ciertos modos de comportamiento de la red que permitan eficiencia en términos de energía[28]. Sin embargo, hay que partir de la topología para elegir el modelo que mejor se adapte a la WSN.

El tipo de topología de una red inalámbrica de sensores más básico es el llamado Tipo Bus, en donde todos los nodos comparten el mismo canal para el envío de mensajes en difusión amplia; es decir si un nodo transmisor A quiere comunicarse con un nodo receptor B, todos los demás nodos de la red pueden recibir el mensaje, pero sólo el nodo B lo procesa. En este tipo de topología tan básico se sufren consecuencias como posible congestión de tráfico en la red[29]. Es por ello que a continuación, en la Tabla 3 se resumirán algunas otras topologías de red que más se adecuen al escenario del presente trabajo.

Tabla 3: Algunos tipos de topología de redes inalámbricas de sensores.

<p>Tipo árbol</p>	<p>Se definen tres niveles de nodos, en dónde el primer nivel pertenece al <i>Root Node</i>. Este nodo recibe sólo mensajes de los nodos del segundo nivel, los <i>Central Hub</i>, los cuales funcionan como receptores de los nodos de tercer nivel.</p>	
<p>Tipo estrella</p>	<p>Un nodo central o <i>Sink</i> se comporta como único receptor de los demás nodos.</p>	
<p>Tipo malla</p>	<p>Se define un nodo central, o <i>Sink</i>, que es el receptor principal de los mensajes de los nodos sensores. Sin embargo, dichos nodos sensores pueden enviar sus mensajes a nodos adyacentes para llegar hacia el nodo central. Existen diversos caminos para llegar al nodo central.</p>	
<p>Tipo cuadrículas</p>	<p>Se definen cuadrículas, en las cuales se establece la topología estrella para cada cuadrícula. El nodo central de cada cuadrícula se llamará <i>Nodo Maestro</i>, y se comunica con los otros <i>Nodos Maestros</i> de las diferentes cuadrículas para enviar el mensaje hacia un nodo <i>Sink</i> del total de cuadrículas.</p>	

Fuente: Adaptado de [29].

Cómo se ha podido observar, las topologías son variables. Por consiguiente, cada topología tendrá diferentes valoraciones respecto a los parámetros que caracterizan a una WSN. En la Tabla 4, se pueden observar cinco topologías que fueron mencionadas previamente y sus valoraciones en función de algunos parámetros.

Tabla 4: Comparación entre los tipos de topologías.

	Bus	Árbol	Estrella	Malla	Cuadrícula
Tipo de camino	Único	Único	Único	Múltiples	Múltiples
Fallas en el nodo	Alto	Alto	Alto	Bajo	El menor de todos
Balanceo de carga	Menor	Mayor que el tipo bus	Menor que el tipo árbol	Alto	El mejor de todos
Congestión del tráfico	Alto	Alto	Alto	Bajo	El más bajo
Radio de recepción de paquetes	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	El más alto
Consumo de energía	Alto	Alto	Alto	Bajo	El más bajo
Tiempo de vida de la red	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	El más alto
Confiabilidad de la red	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	El más alto

Fuente: Adaptado de [29].

Si bien la tabla hace una comparación sencilla de parámetros tomando en cuenta uno con otro, puede brindar una base para futuras comparaciones más elaboradas. Dependiendo de la aplicación a la cual está destinada la WSN, uno podría establecer uno de los parámetros mostrados como principal. Por ejemplo, en un estudio hecho en la Universidad de Massachusetts Dartmouth en donde se ponen en comparación tres topologías diferentes (una tipo mesh, otra tipo árbol y una de tipo cuadrícula modificada) basa sus valoraciones cuatro parámetros: la confiabilidad como parámetro principal, la latencia, la escalabilidad y la eficiencia energética[30].

Haciendo un repaso, diversas aplicaciones de las redes inalámbricas de sensores requieren diferentes tipos de topología. A partir de los diferentes tipos de topología, por consecuencia existen diferentes tipos de comunicación entre los nodos pertenecientes a una WSN. El principal objetivo de establecer una topología específica, y consiguientemente un tipo de comunicación entre nodos, es aplazar el tiempo de vida de la red. Usualmente, y como se explicó anteriormente, en las redes inalámbricas de sensores existen limitaciones de los nodos en cuanto a capacidad computacional y energía. Es por ello que, para mantener la capacidad de transmisión de un nodo estable, hay que asegurarnos que la comunicación entre dicho nodo y el nodo central de la red (previamente denominado *Sink*) sea la óptima para la red. Diferentes métodos de comunicación entre nodos han sido desarrollados a través de los años, basados en algoritmos matemáticos. Cada método de comunicación puede ser usado en uno o más tipos de topologías[31].

A continuación, se presenta la Tabla 5, en donde se detallan algunos tipos de comunicación entre nodos pertenecientes a una WSN

Tabla 5: Protocolos de comunicación de redes inalámbricas de sensores.

Protocolo	Descripción
Transmisión directa	Los sensores transmiten la información directamente hacia el nodo central. Los nodos más alejados del nodo central pierden energía más rápido.
Mínima transferencia de energía	Se eligen nodos que actúan como intermedio entre nodos más alejados y el nodo central.
Agrupamiento	Se divide la totalidad de nodos en grupos, cada grupo tiene asignado un nodo maestro el cuál se comunica hacia el nodo central.
Agrupamientos adaptables de baja energía	Funciona como el agrupamiento, pero el rol del nodo central es compartido por varios nodos del mismo grupo para evitar el consumo energético de un solo nodo.
Elección estable	Similar al protocolo de agrupamientos adaptables de baja energía, pero en este caso el rol de nodo central cambia de acuerdo a la energía de cada nodo, para mantener la energía de todos los nodos cercanos.
Enrutamiento basado en agrupamientos jerárquicos	Se divide la totalidad de nodos en grupos, cada grupo tiene una jerarquía de nodos propia (es decir cada nodo puede tener dos o más niveles de nodos). Los grupos se comunican entre ellos mediante su nodo de mayor nivel.
Algoritmos genéricos	Se desarrollan algoritmos genéricos de comunicación entre nodos que cumplan los objetivos que el desarrollador desee.

Fuente: Adaptado de [31].

A partir de la información detallada sobre las redes inalámbricas de sensores, se pueden empezar a cubrir las diferentes tecnologías inalámbricas que podrían solucionar el problema inicial planteado.

## 2.2 Alternativas de solución

Las alternativas de solución que se mostrarán en el presente capítulo son usadas en diferentes tipos de redes inalámbricas. Las redes inalámbricas también pueden ser diferenciadas por la cobertura (en términos de distancias) que tienen, es por ello que primero se darán a conocer algunas de estas diferenciaciones para luego poder entender en qué lugar encajan las tecnologías. Primero partiremos con una división que describe la empresa Cisco en uno de sus artículos web, en la Tabla 6[32].

Tabla 6: Comparación de tipos de redes inalámbricas.

Tipo	Cobertura	Performance	Estándares	Aplicaciones
Red inalámbrica de área personal (WPAN)	Dentro del alcance de una persona	Moderada	Bluetooth, IEEE 802.15	Reemplazan periféricos cableados
Red inalámbrica de área local (WLAN)	Dentro de un edificio o un campus	Alta	IEEE 802.11, Wi-Fi, HiperLan	Extensión móvil de redes cableadas
Red inalámbrica de área metropolitana (WMAN)	Dentro de una ciudad	Alta	IEEE 802.16, Algunos estándares propietarios, WIMAX.	Conexión inalámbrica entre casas, negocios con Internet
Red inalámbrica de área mundial (WWAN)	Alrededor del mundo	Baja	Redes celulares	Acceso móvil a Internet desde áreas fuera de las urbanas conectadas.

Fuente: [32].

Cómo se puede visualizar en la tabla previa, dependiendo de la cobertura existen diferentes protocolos y revisiones IEEE asignados a cada tipo. A su vez, las aplicaciones que hacen uso de estas revisiones y protocolos varían desde el reemplazo de periféricos hasta la comunicación con personas a grandes distancias. Sin embargo, en términos de performance algunas son más desarrolladas que otras, por lo cual se pueden presentar inconvenientes con alguna tecnología si no es usada en el entorno para el cuál fue desarrollada. Es por ello que la correcta elección de una tecnología inalámbrica para el establecimiento de una red de sensores es de suma importancia, y es lo que se hará en el presente capítulo.

Así también, existen otros puntos a considerar para hacer la elección de la tecnología a utilizar para el despliegue de una red inalámbrica de sensado remoto. Una red de sensores típica se caracteriza por tener una baja tasa de bits, debido a que la información a ser transmitida se limita a sólo datos que registra el/los sensor(es); además de también ser eficiente en términos de energía, ya que se hace uso de bajos niveles de potencia para transmitir a medianas y grandes distancias[33]. Por consiguiente, lo que se requiere es de un tipo de red que abarque un área de medianas proporciones y que permita un tráfico eficiente en términos de energía, sin poner énfasis en la tasa de bits. Los tipos de redes inalámbricas LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) ofrece la posibilidad de conectar dispositivos a distancias largas y tasas de bits bajas. Las principales características de este tipo de red es la gran eficiencia energética, ya que requiere de bajos niveles de potencia de transmisión, y las grandes distancias que logra alcanzar[34].

En la Tabla 7 se mostrará una distribución diferente a la anterior de tipos de redes inalámbricas y tecnologías pertenecientes a cada tipo.

Tabla 7: Comparación de tecnologías inalámbricas.

	Bajo y medio rango	LPWAN	Redes celulares
Uso máquina-máquina	70 %	5 %	25 %
Pros	Bien establecidos en edificios y negocios	Bajo consumo de energía, bajos costos	Alto nivel de cobertura y alta tasa de datos
Contras	Alcance y baterías limitados	Baja tasa de transmisión de datos, algunas tecnologías son emergentes	Alto requerimiento de potencia, costos altos de implementación
Aplicaciones	Casas inteligentes, periféricos	Redes de sensores, ciudades inteligentes, monitoreo industrial	Telefonía celular y aplicaciones celulares que hagan uso de datos
Principal fuente de ingresos	Venta de hardware	Depende del proveedor	Subscripciones a operadores
Tecnologías clave	Wi-Fi, Bluetooth	NB-IoT, LoRaWan, Sigfox.	5G

Fuente: [34].

Con la información expuesta previamente, podemos empezar a observar que tipo de tecnología inalámbrica es más conveniente para el establecimiento de la red del presente trabajo. Por ejemplo, dentro de las LPWAN, se mencionan tres tecnologías en específico: LoRa y LoRaWAN, tecnologías y estándares de LoRa Alliance fundada por Semtech; el operador de redes global Sigfox y la tecnología NB-IoT de la organización 3GPP. Cada una de estas pueden adecuarse a distintos usos y escenarios[35]. Asimismo, pueden ser comparadas con las tecnologías pertenecientes a las redes móviles. En la Figura 11 se mostrarán algunas aplicaciones de estas tecnologías en comparación a las redes móviles existentes y en desarrollo.











Speed	1Mbit/s+	~100kbit/s	<10kbit/s
Example technology	4G	2G, LTE-M	LoRa, SIGFOX, NB-IoT
Spectrum	Licensed	Licensed	Licensed or unlicensed
Example use cases	 Smart phone  Connected car  CCTV	 Smart grid  Smart watch  High value object tracking	 Low value object tracking  Smart meter  Smart parking  Smart street lights

Figura 11: Casos de usos de las tecnologías inalámbricas.

Fuente: [35].

Con la información reciente sobre los tipos de redes inalámbricas según su cobertura, podemos empezar a ver tecnologías inalámbricas que se acomoden mejor a nuestro caso. Por lo cual, ahora se presentarán cuatro tecnologías que podrían solucionar el problema planteado inicialmente.

### 2.2.1 LoRa

LoRa es el tipo de modulación de las señales inalámbricas, definida en la capa física de una red inalámbrica de sensores. El objetivo principal de LoRa con su tipo de modulación es lograr un largo rango de alcance, mientras el consumo de potencia se mantiene bajo. La modulación LoRa está basada en lo que se conoce como técnica de *Chirp Spread Spectrum*, la cuál es la causa de alcanzar largos rangos de transmisión[36].

Se le conoce cómo a *chirp* a la señal de cambio de frecuencia desde una frecuencia mínima  $f_{min}$  a una frecuencia máxima  $f_{máx}$  en un determinado periodo de tiempo. LoRa hace uso de dos tipos de *chirp*, uno de subida y otro de bajada. La señal *chirp* presenta

parámetros como: el ancho de banda  $B$  definido por la diferencia de frecuencias  $B = f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}$ , una frecuencia central  $f_0$ , y el *Spreading Factor* que es definido como la inversa del tiempo que dura un *chirp*[37]. En la Figura 12 se muestran estos parámetros de una señal *chirp*.

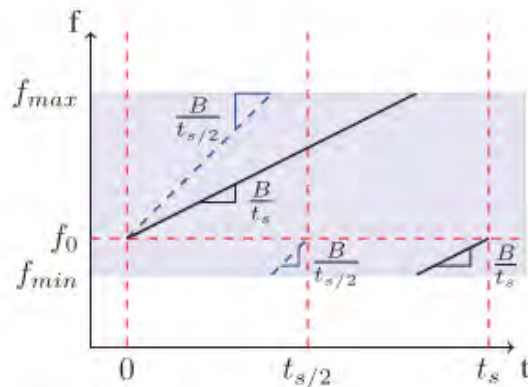


Figura 12: Dos chirps con diferentes Spreading Factor  $S$ .

Fuente: [37].

Cómo se puede observar si el *Spreading Factor* es mayor, es decir la línea tiene una pendiente más inclinada hacia la derecha, entonces la representación de un bit ocupa más tiempo; en el caso contrario mayor cantidad de bits serán transmitidos. Una señal modulada con el protocolo LoRa luce como se muestra en la Figura 13.

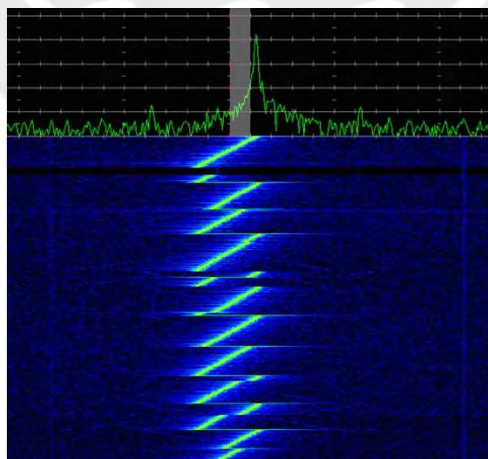


Figura 13: Modulación LoRa.

Fuente: [38].

Es importante recalcar que LoRa también tiene otras especificaciones referentes a la capa física, cómo por ejemplo que bandas de frecuencia usa, el número de canales, las potencias máximas de transmisión aceptadas, etc. En Norte América (usadas también en Latinoamérica), están definidas las siguientes:

- Banda ISM desde los 902 MHz hasta los 928 MHz.
- 64 canales de subida de 125 kHz desde los 902,3 MHz hasta los 914,9 MHz. Adicionalmente existen 8 canales de subida de 500 kHz desde los 903 MHz hasta los 914,9 MHz cada 1,6 MHz.
- 8 canales de bajada de 500 kHz desde los 923,3 MHz hasta los 927,5 MHz.
- La potencia máxima de transmisión es 30 dB aunque la mayoría de dispositivos presentan una potencia de transmisión alrededor de los 20 dB[39].

En la Figura 14 se muestra cómo están distribuidos los canales de LoRa.

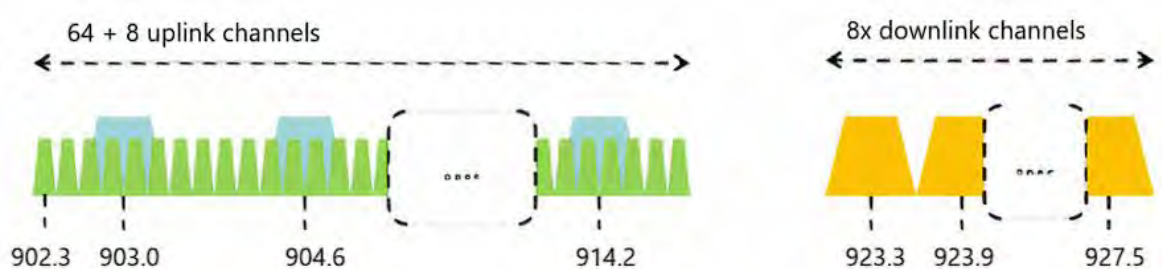


Figura 14: Canales presentes en LoRa.

Fuente: [39].

Finalmente, se describirá cuál es el método de acceso al medio que presenta LoRa. Existen tres clases en las cuales trabajan los dispositivos LoRa para comunicarse:

1. Clase A: El nodo selecciona aleatoriamente uno de los canales asignados en la configuración inicial del dispositivo cuando requiere enviar un mensaje. Al ser enviado el mensaje se abren dos ventanas de tiempo en dónde se espera una respuesta que confirme la recepción del mensaje. Dichas ventanas tienen una duración limitada.

2. Clase B: El envío de mensajes se hace igual que en la clase A, pero se usan más ventanas de tiempo para recibir una respuesta de confirmación de correcta recepción de mensaje.
3. Clase C: El envío y recepción de mensajes se hace igual que en la clase A, con las mismas dos ventanas de tiempo definidas, pero en este caso una de las dos ventanas de tiempo en dónde se espera respuesta está abierta durante un periodo más prolongado de tiempo[40].

LoRa será la tecnología con la cual se desarrollarán los capítulos 3 y 4 de la presente tesis, más adelante en el subcapítulo 2.3 se justificará la elección.

### **2.2.2 Zigbee**

El protocolo Zigbee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 que define la operación de los LR-WPAN's (*Low Rate Wireless Personal Area Network*), más concretamente especifica las capas física y MAC para las LR-WPAN's. El estándar IEEE 802.15.4 abarca más componentes, no sólo los relacionados al protocolo Zigbee. Lo que se buscó con el establecimiento del protocolo IEEE 802.15.4 es obtener transmisiones de baja tasa de datos y bajo consumo de energía para sus dispositivos en distancias relativamente cortas (principalmente dentro del hogar). Dentro de estos parámetros fue concebido Zigbee, ya que está diseñado para aplicaciones de baja potencia, bajo data rate y cobertura menor, cómo por ejemplo casas automatizadas, recolección de datos de equipos médicos y otros más[41][42].

Las características de Zigbee serán presentadas Tabla 8 a continuación.

Tabla 8: Especificaciones técnicas de Zigbee.

Banda	Frecuencia que ocupa	Número de canales	Máxima tasa de bits	Modulación
868 MHz	868 MHz – 868.6 MHz	1	20 kbps	BPSK
915 MHz	902 MHz – 928 MHz	10	40 kbps	BPSK
2.4 GHz	2400 MHz – 2483.5 MHz	16	250 kbps	O-QPSK

Fuente: [42].

Zigbee hace uso de dos modulaciones, la modulación BPSK y la O-QPSK.

- La modulación BPSK, usada en las bandas de 868 MHz y 915 MHz. Es la forma más básica de modulación en fase de una señal, en dónde se usan dos fases separadas  $180^\circ$  para representar los bits de información. Al ser la más simple es a su vez la más robusta.
- Por otro lado, en la banda de 2.4 GHz se hace uso de la modulación O-QPSK. Este tipo de modulación presenta una mejora a la modulación QPSK, en dónde se tienen 4 símbolos representados por 2 bits cada uno. Entre estos símbolos hay un cambio de fase de  $90^\circ$ , pero si cambian dos bits de estos símbolos el cambio de fase será de  $180^\circ$ , lo que introduce componentes espurias de alta frecuencia. O-QPSK permite que cuando dos bits cambien el cambio de fase se mantenga en  $90^\circ$ , gracias a que sus bits están separados por medio periodo de símbolo en vez de uno[43].

Además, Zigbee utiliza de dos protocolos adicionales en las capas de red y la capa MAC: AODV y CSMA, respectivamente.

- Protocolo AODV: protocolo reactivo permite el establecimiento de rutas sólo cuando es necesaria la transmisión de data de un nodo a otro; cuando una ruta

no se ha usado por cierto periodo de tiempo esta expira. Se hace uso de los siguientes mensajes: RREQ, que viaja a través de los nodos posibles hasta el destino en busca de este, RREP que viaja siguiendo una única ruta hacia la fuente y esta ruta se elige dependiendo del número de saltos; y finalmente RERR que indica un error de ruta.

- Protocolo CSMA: Se hacen uso de mensajes RTS (*Ready-to-Send*) y CTS (*Clear-to-Send*). Cuando un nodo quiere transmitir hacia otro, utiliza el mensaje RTS en transmisión amplia, es decir que llega a todos los nodos. El nodo destino es el que debe responder con un mensaje CTS, cuando el nodo transmisor recibe este mensaje puede empezar la transmisión[44].

Una representación gráfica de estos dos protocolos se puede visualizar en la Figura 15.

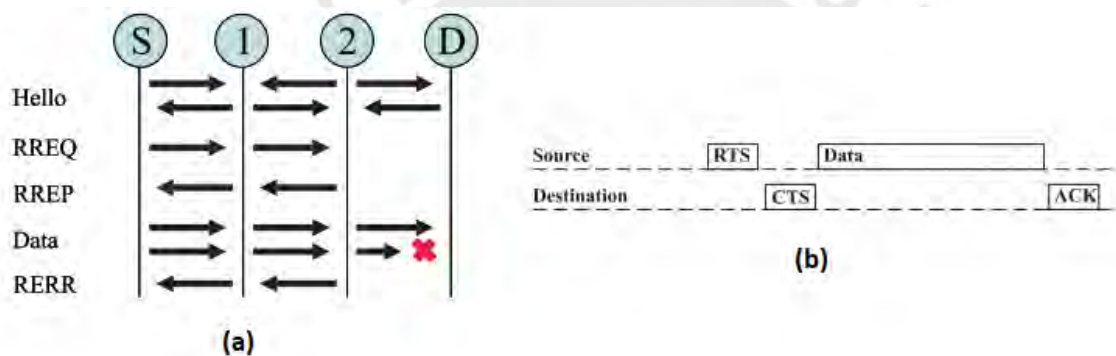


Figura 15: (a) Protocolo AODV, (b) Protocolo CSMA.

Fuente: Adaptado de [44].

Por sus características, Zigbee ha sido utilizado para implementaciones de redes de sensores alrededor del mundo. El año 2017 en la selva amazónica del Perú, más específicamente en la reserva de Allpahuayo Mishana, se estableció una red inalámbrica de cámaras con el objetivo de monitorear la diversidad de fauna en la zona. Se hizo uso de cámaras acopladas con módulos Arduino, que a su vez transmitían las imágenes captadas mediante módulos Xbee a otro módulo llamado *Sink Node*. Este nodo recibía información de 4 nodos con cámaras, dos a cada lado, de tal manera que un nodo con

cámara empleaba como máximo 2 saltos para llegar al sink node. Los sink node enviaban, también haciendo uso de módulos Xbee, la información recolectada a un vehículo aéreo no tripulado, que podría ser un dron que se mueva por la zona. De este modo cada sink node acompañado de sus 4 nodos con cámaras se consideraban como una red independiente, así se establecieron un total de 5 redes independientes en un área de 577 km<sup>2</sup>. Los resultados más resaltantes de este experimento mostraron que, en promedio: en un salto de nodo a nodo se obtuvo entre 28 y 32 kbps de transferencia de datos y entre 18 y 20 milisegundos de retraso; mientras que en dos saltos entre 3 nodos se obtuvieron entre 18 y 19 kbps de transferencia de datos y entre 40 y 60 milisegundos de retraso[45].

Otro trabajo realizado en la India el año 2018 se enfoca en el monitoreo de los sistemas de distribución eléctrica haciendo uso de módulos Xbee. Se realizó en un vecindario, definido como una NAN (por sus siglas en inglés Neighborhood Area Network), donde se hicieron uso de sensores intensidad de corriente y frecuencia de corriente eléctrica en diversos tableros eléctricos. Estos sensores enviaban su información haciendo uso de la banda de 2.4 GHz a un nodo recolector ubicado en un punto central de la NAN. En este caso, los valores de amperaje y frecuencia tuvieron que ser convertidos a valores que pudieran ser transmitidos por los módulos Xbee. A partir de este estudio del monitoreo de señales eléctricas de un vecindario, se podría realizar un sistema que gestione de manera inteligente los niveles de potencia de las señales eléctricas[46].

### **2.2.3 NB-IoT**

NB-IoT es una alternativa diferente pero que apunta a el mismo objetivo del Internet de las Cosas. Se basa principalmente en el uso la existente infraestructura de red GSM y LTE para conectar dispositivos inalámbricos. Esta tecnología opera de tres distintos modos: puede utilizar recursos de la transmisión de señales LTE, puede usar las bandas de guarda de las mismas señales o puede hacer uso de parte de la banda destinada a GSM. Al igual que las otras tecnologías para LPWAN, es eficiente energéticamente y permite la transmisión a tasas de bits bajas[47].

Desde su introducción en el 2016, NB-IoT ha ido evolucionando hasta convertirse en una opción conveniente para el despliegue de redes de sensores, tomando como parte de ella las especificaciones MTC (de las siglas *Machine Type Communication*), hasta finalmente formar parte de los estándares LTE[48]. En la Tabla 9 se puede observar cómo ha ido evolucionando esta tecnología con cada actualización.

Tabla 9: Evolución de las categorías UE para MTC/IoT.

	Release 8	Release 12	Release 13	Release 13
	Cat. 1	Cat. 0	Cat. M1	Cat. NB 1
Downlink peak	10 Mbps	10 Mbps	1 Mbps	200 kbps
Uplink peak	5 Mbps	1 Mbps	1 Mbps	144 kbps
Number of antennas	2	1	1	1
Duplex mode	Full duplex	Half duplex	Half duplex	Half duplex
UE receive bandwidth	20 MHz	20 MHz	1.4 MHz	200 kHz
UE transmit power	23 dBm	23 dBm	20 dBm	23 dBm
Complexity	100%	50%	20%	15%
Use case	Voice service for emergency in elevators, Smart Grid Management, Kids/Elderly/Pet tracking	Cat0 is the interim solution prior Cat-M. Cat0 is used for replacing Cat1, but cannot replace voice use cases	Environment monitoring, Vehicle tracking	Smart metering, Smart buildings, home automation
Availability	Available	Available	2017	2017

Fuente: [48].

En cuestión de comparaciones con otras tecnologías destinadas para las LPWAN, se ha realizado un estudio en la Universidad de Aalborg en Dinamarca, se hicieron pruebas con cuatro tecnologías con el fin de poner a prueba la cobertura y capacidad de las

mismas. Los resultados expuestos a continuación responden a experimentos que se hicieron en un campo abierto de 7805 km<sup>2</sup>. En términos de cobertura al aire libre, todas las tecnologías son eficientes en un entorno al aire libre; mientras que en espacios cerrados Sigfox y NB-IOT tienen mejor desempeño. En cuanto a colisiones y probabilidad de fallos en la entrega de los mensajes, LoRa permite 5 dispositivos por usuario con menos de 1% de probabilidad de fallo de entrega de mensaje combinado; por su lado Sigfox permite 8 y NB-IOT permite 10. Asimismo, cuando consideramos la probabilidad de bloqueo, que se define como el complemento de la probabilidad de error en la transmisión, Sigfox tiene una probabilidad de bloqueo de al menos del 2% para un usuario con 10 dispositivos IoT y LoRa tiene una probabilidad de bloqueo de al menos del 1% en el mismo escenario[49].

En el mismo estudio, se realiza una comparación de las tecnologías estudiadas. Por lo cual en la Tabla 10, se mostrarán las diferencias mostradas en el ya mencionado estudio.

Tabla 10: Revisión de las tecnologías LoRa, Sigfox, NB-IoT y GPRS.

	LoRa		Sigfox		NB-IoT release 13		GPRS	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL
Spectrum [MHz]	863-870	863-870	868.1-868.3	869.425-869.625	832-862	791-821	890-915	935-960
Tx power [dBm]	14	14-27	14	27	23	37	33	37
Modulation	Chirp spread spectrum		DBPSK	GFSK	GMSK	SC-FDMA	GMSK	GMSK
Bandwidth [kHz]	125	125	0.1	0.6	180	180	200	200
Max payload [bytes]	51	51	12	8	128	85	22	22
Scheduling	Uplink initiated (class A)		Uplink initiated		Network scheduled		Network scheduled	
MCL [dB]	154	152	158	161	164	164	144	152

Fuente: [49].

NB-IoT presenta ventajas en espacios cerrados en comparación a las otras tecnologías, pero aún puede ser utilizado en espacios abiertos, por lo que figura como alternativa de solución al problema planteado inicialmente.

## 2.2.4 5G

Actualmente de manera global, la industria de las telecomunicaciones está introduciendo a las redes 5G cómo sucesor de las ya conocidas redes 4G. Mientras que haciendo uso de las redes 4G se podía obtener un pico máximo de descarga de 100 Mbps bajo condiciones favorables, una red 5G en las mismas condiciones podría brindar velocidades[50]. La llegada de esta tecnología trae consigo nuevas posibilidades de conexión de dispositivos en áreas de gran extensión, dispositivos cómo sensores. Ericsson muestra en un estudio que las redes 5G serán utilizadas en gran parte para el despliegue de redes de sensores, destinados a áreas de oportunidad cómo la agricultura, ciudades y establecimientos inteligentes y otras utilidades. Los principales beneficios que tiene el hacer uso de las redes 5G para desplegar redes de sensores son la escalabilidad y seguridad propias del tipo de red[51].

Sin embargo, al existir tipos de redes inalámbricas de sensores, también existen casos en dónde 5G es apropiado y otros en donde no. Un estudio hecho por Abdullah Said Alkalbani, de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Buraimi compara el uso de 5G en dos tipos de redes inalámbricas de sensores: las redes estáticas y las redes dinámicas. Las redes estáticas están compuestas por un número fijo de nodos y un solo nodo *Sink*. Los nodos se comunican hacia el *Sink* mediante saltos entre nodos, usualmente tienen la topología tipo malla. Por otro lado, las redes dinámicas presentan nodos móviles, lo que permite mayor cobertura. Haciendo uso del mismo número de nodos y estableciendo los dos tipos diferentes de redes, se midieron tres parámetros: precisión, consumo de energía y tamaño promedio de camino. Se concluyó que el mejor desempeño fue obtenido mediante la red dinámica. El parámetro decisivo fue el consumo de energía, en dónde la red dinámica tuvo valores menores en comparación a la red estática[52].

A continuación, la Figura 16 demuestra que las redes dinámicas tuvieron mejor performance que las redes estáticas en términos de potencia, haciendo uso de 5G.

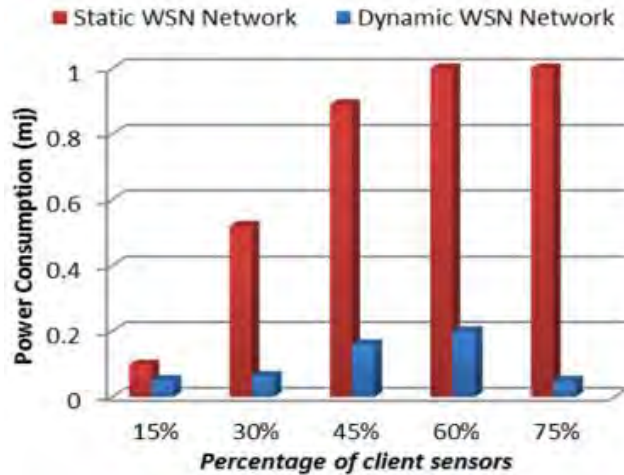


Figura 16: Consumo de potencia en redes estáticas y dinámicas.

Fuente: [52].

Finalmente, si bien la tecnología 5G es propicia para el establecimiento de ciertos tipos de redes de sensores, no es la óptima para el caso de estudio. Esto debido a que las redes de sensores pensadas para ser desplegadas mediante 5G son de un gran número de nodos y que se extienden en zonas muy amplias, como para el caso de Internet de las Cosas Masivo (MIoT por sus siglas en inglés). Para estos casos existen protocolos de enrutamiento ya mencionados, cómo el de Agrupamientos adaptables de baja energía, que permiten un funcionamiento más óptimo de la red[53].

### 2.2.5 Sigfox

Sigfox es una tecnología orientada al Internet de las cosas (“IoT” por sus siglas en inglés) que cuenta con una red propia de alcance global para el propósito de conectar dispositivos finales con servidores de aplicación, mediante estaciones bases Sigfox. Sus características principales son el bajo consumo de energía de sus dispositivos finales, alcance de comunicación de alta extensión y protocolos estandarizados propios de comunicación entre los dispositivos y servidores. La tasa de bits de Sigfox varía entre 100 y 600 bits por segundo, dependiendo de la región, y esta baja tasa de bits permite el largo alcance de la tecnología, además de otros factores cómo la potencia de recepción

en la estación base y la topografía. La tecnología Sigfox está caracterizada por los siguientes principios:

- Modulación en banda ultra estrecha (UNB) de 100 Hz, a tasas de transmisión de bits entre 100 y 600 bits por segundo.
- Acceso aleatorio al medio, el dispositivo final escoge una frecuencia aleatoria en su rango definido, y envía replicas en diferentes frecuencias y diferentes tiempos (diversidad en frecuencia y tiempo).
- Tamaño de mensaje máximo de 26 bytes cuando el tamaño de la data es de 12 bytes, máximo aceptado para las transmisiones en uplink. Para un mensaje de 12 bytes a una tasa de transmisión de bits de 100 bits por segundo el mensaje tiene un tiempo en el aire de 2.08 segundos. En el caso del downlink el tamaño máximo aceptado de data es de 8 bytes.
- Recepción cooperativa: Los dispositivos finales no están asociados a una estación base Sigfox en específico, sino envían su mensaje a cualquier estación base cercana. Este último factor se conoce como diversidad espacial. Por ello, Sigfox presenta 3 tipos de diversidad en una banda ultra estrecha, lo que se conoce como 3D-UNB[54].

Sigfox tiene frecuencias de uso definidas, denominadas bandas RC que están enumeradas y varían por región. En Perú se hace uso de la banda RC4, que hace uso de los 920.704 MHz hasta los 920.896 MHz para los mensajes de uplink y de los 922.204 MHz hasta los 922.396 MHz para los mensajes de downlink. Asimismo, en Perú se puede usar una tasa de transmisión de bits de 600 bits por segundo, y una potencia de transmisión máxima de 24 dBm[55]. Finalmente, un factor clave en Sigfox es la cantidad de mensajes que un dispositivo puede transmitir por hora. Un dispositivo final conectado a la red Sigfox puede transmitir sólo 36 segundos por cada hora, que para un mensaje con 12 bytes de data significa una capacidad máxima de 6 mensajes transmitidos por hora con un tiempo en el aire de 2.08 segundos[54].

### 2.3 Justificación de la propuesta de solución

A partir de lo planteado previamente, se espera poder hacer uso de la tecnología LoRa para establecer el diseño de una red inalámbrica que permita la conectividad de sensores que se detallarán luego. Las limitaciones básicas de las redes inalámbricas vienen a ser la alta latencia debido a la congestión de los recursos de espectro de frecuencia de los cuales se hacen uso, la dificultad que implica la integración de los sensores y el cómo se realiza el acoplamiento de estos con los transmisores, y finalmente que el software para simular redes inalámbricas es limitado. La tecnología LoRa, permite la transferencia de información a largas distancias con una transmisión de datos pequeña, debido al bajo consumo de potencia que requiere[56].

Una característica que diferencia a la tecnología LoRa de las otras es la técnica de modulación propia que utiliza; la modulación LoRa, la cuál es la principal razón de las largas distancias que puede recorrer. Además, presenta una gran ventaja al poder ser utilizada en un entorno con un nivel de ruido que podría afectar a la señal si se hiciera uso de otra tecnología[57].

Las redes inalámbricas de sensores, cómo se mencionó previamente, no requieren de una gran cantidad de ancho de banda ya que la información que transportan es pequeña. A costa del reducido ancho de banda, se logran grandes distancias, cómo muestra la Figura 17 en dónde se presenta una gráfica que posiciona a LoRa en términos de rango alcanzado versus ancho de banda.

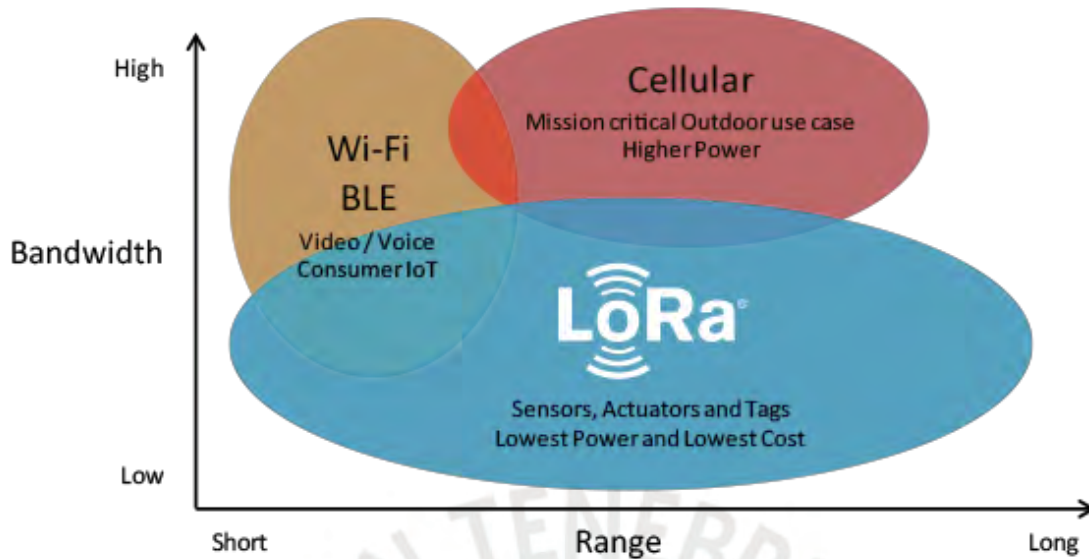


Figura 17: Posicionamiento de la tecnología LoRa en términos de Rango vs. Ancho de banda.

Fuente: [36].

## 2.4 Estado del arte

En cuanto a la actualidad de la tecnología LoRa, se han realizado estudios que permiten análisis de sus parámetros y su desempeño, incluso comparándolo con otras tecnologías.

El año 2019 en Indonesia, en la Facultad de Computación de la Universidad Telkom, se observó cómo diferentes valores para el parámetro *Spreading Factor* de la modulación que utiliza LoRa, mencionada anteriormente, varía el rango de alcance de los dispositivos para escenarios de zonas rurales. Se colocaron 5 nodos a 100, 240, 530, 820 y 980 metros del nodo central o nodo *Sink*. Para cada nodo se utilizaron valores de *Spreading Factor* desde el 7 hasta el 12, y se observó en los primeros dos nodos la potencia de recepción de la señal variaba cómo máximo 3 dB en relación de una con otra. Para los tres nodos siguientes y más alejados, dicha potencia variaba cómo máximo 1 dB en relación de una con otra. En estos tres nodos es dónde el valor de la relación señal a ruido aumentó y se mantuvo entre -6 dB y -10 dB, mientras que para los primeros dos

nodos este valor fue mayor a 0. Se concluyó que el máximo alcance puede ser logrado haciendo uso de un *Spreading Factor* de 12 a 980 metros del nodo central[58].

Un estudio que compara a la tecnología LoRa con Zigbee, fue realizado en la India también el año 2019. Se hizo uso de los protocolos LoRa y Xbee para comunicar bicicletas electrónicas. En esta ocasión se hizo uso de un módulo inalámbrico LoRa, el RN2903, para transmitir data desde una bicicleta en movimiento a un servidor vía enlaces inalámbricos cuando la bicicleta se encuentra lejana a este. Para el caso contrario, cuando la bicicleta estaba cercana al servidor se enviaba la información mediante un módulo Xbee. En este caso, se propuso cambiar la tasa de transferencia de información progresivamente; se empezó con 1200 bps, luego con 4800 bps y finalmente con 9600 bps. Haciendo uso de ambos protocolos, se transmitieron exitosamente un total de 1072 paquetes de 1 byte al servidor; sin embargo, sólo el módulo LoRa logró que se recibieran todos los paquetes en el servidor para todos los casos de tasas de transferencia de información. Haciendo uso del módulo Xbee, se recibieron 986, 583 y 285 paquetes para las tasas de 1200, 4800 y 9600 bps respectivamente. Se pudo concluir que LoRa tuvo un mejor desempeño, además de contar con un mejor alcance que Xbee. Es importante volver a recalcar que el tamaño del paquete fue de 1 byte, puede darse el caso de que al tratarse de paquetes más pesados el desempeño de cada protocolo varíe[59].



## Capítulo 3

### **Diseño de una red inalámbrica de sensado remoto para la estación climática Tambopata**

En este capítulo se empezará enlistando los requerimientos del proyecto, dichos requerimientos abarcan dispositivos a utilizar, número de nodos de la red, que variables deberán ser medidas, periodicidad del muestreo, bandas de frecuencia a utilizar y características vegetativas de la zona. A partir de los requerimientos, se propondrá una topología de red, que será detallada a nivel lógico, funcional y geográfico. Dicha red será analizada en el capítulo 4 de la presente tesis.

#### **3.1 Requerimientos iniciales**

Los requerimientos iniciales para el desarrollo del diseño de la red inalámbrica de sensado remoto, son los propuestos en el proyecto Monitoreo de balances hídricos usando redes de sensores inalámbricos para estimaciones de productividad en bosque

amazónico y cultivos leñosos perennes costeros, mencionado en el primer capítulo de este documento. Estos requerimientos son principalmente los dispositivos a utilizar, el número de nodos, que información se desea recolectar y el área que se debe cubrir. Asimismo, cómo se sabe la locación donde se instalará la red, se podrán conocer características del entorno; las características del entorno comprenden el tipo de vegetación y el ambiente, lo que es muy importante en el análisis del espectro electromagnético que se realizará en el capítulo siguiente. Finalmente, a partir de la elección de la tecnología LoRa, se mencionará la reglamentación del uso de las bandas de frecuencia en las cuales operará la red.

### **3.1.1 Requerimientos regulatorios**

En base a la elección de la tecnología LoRa, se tienen bandas de uso en distintas regiones del mundo. Como se mencionó en el capítulo 2 de esta tesis, en Latinoamérica se hace uso de la banda de 915 MHz, que comprende desde los 902 MHz hasta los 928 MHz. Las otras bandas destinadas para el uso de LoRa varían dependiendo de las regiones, como por ejemplo en parte de Europa se usa la banda de 433 MHz[39]. Para seleccionar que banda de operación será la escogida para el diseño de la red inalámbrica es necesario consultar con el reglamento vigente peruano referente al espectro electromagnético, dicho documento es el PNAF (Plan Nacional de Atribución de Frecuencias).

De acuerdo al Plan Nacional de Atribución de Frecuencias:

- En la página 62, punto 23, se indica que la banda de 915 MHz es considerada una banda ICM. Las bandas ICM están destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas. Según el reglamento del estado: “los servicios de radiocomunicaciones que operen en estas bandas deben aceptar cualquier tipo de interferencia proveniente de dichas bandas”.
- La banda de 433 MHz no está definida, sino que está contenida en la banda de 435 MHz, destinada a radiolocalización[60].

Por lo tanto, el despliegue de una red inalámbrica de sensores en nuestro país que haga uso de la tecnología LoRa deberá darse en la banda de 915 MHz.

### **3.1.2 Requerimientos técnicos y de aplicación**

En esta sección se hará mención del equipamiento con el que se debe contar en los nodos, tanto los sensores como el receptor, y datos básicos de estos.

Los parámetros que serán sensados son:

- Temperatura del suelo
- Contenido de agua volumétrico en el suelo, para este parámetro y el de temperatura del suelo existe un sensor que monitorea ambos, detallado más adelante.
- Variación de diámetro de troncos, se requiere un dendrómetro.

Adicionalmente, serán enviados como parámetros al nodo recolector el estado de la batería, el identificador del nodo sensor y la hora de envío de la información. Por lo que finalmente serán 6 parámetros que se enviarán al nodo recolector. Además, se deberá repartir 10 nodos sensores en la parcela designada. En principio en el proyecto está definido un periodo de muestreo de 5 minutos, es decir cada 5 minutos los nodos enviarán su información al recolector, sin embargo, en el capítulo de análisis se podrá comprobar si es posible dependiendo de ciertos parámetros de la información. Asimismo, el nodo recolector se deberá instalar en la torre de flujos de Tambopata, de la cual la parcela deberá encontrarse a 50 metros de distancia.

En función a lo descrito anteriormente, se hará uso de los siguientes dispositivos que se encuentran en el mercado.

#### **3.1.2.1 Nodo sensor**

El equipamiento del nodo sensor estará compuesto por los siguientes elementos:

- Arduino UNO: Es el microcontrolador que permitirá la conexión entre los sensores y el módulo de transmisión[61].



*Figura 18: Arduino UNO.*

Fuente: [61].

- Módulo de LoRa para Arduino: Dispositivo encargado de la transmisión inalámbrica de datos. Es compatible con el Arduino UNO, y su componente más importante es el transceptor RFM95W. Este transceptor nos brindará características de la transmisión, que serán utilizados en la etapa de análisis de la red[62]. El módulo viene con una antena, cuya información está adjunta en el Anexo 1.



Figura 19: Módulo LoRa para Arduino.

Fuente: [62].

- Reloj en tiempo real: Para la temporización del envío de información se hará uso de un reloj en tiempo real de Adafruit, compatible con el Arduino UNO[63].

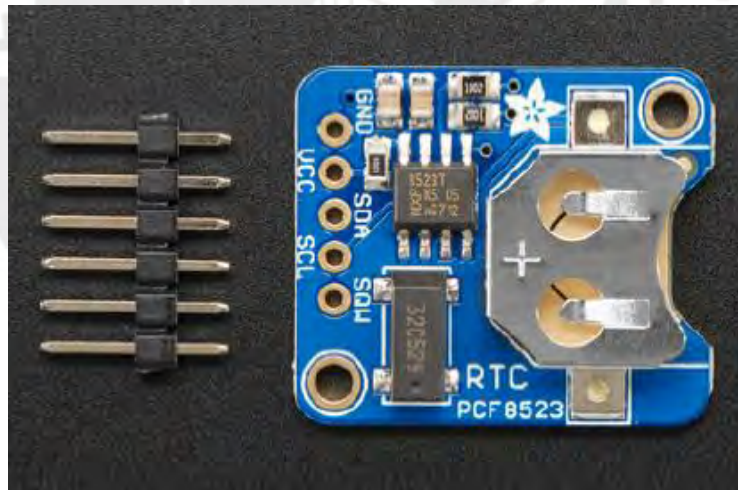


Figura 20: Reloj en tiempo real de Adafruit.

Fuente: [63].

- Sensor CS650: Sensor de la compañía Campbell Scientific, del cual se obtiene el contenido de agua volumétrico en el suelo, la temperatura del suelo, y los

parámetros de permitividad y conductividad electromagnéticas del suelo. Se conecta al Arduino mediante los puertos SDI[64].

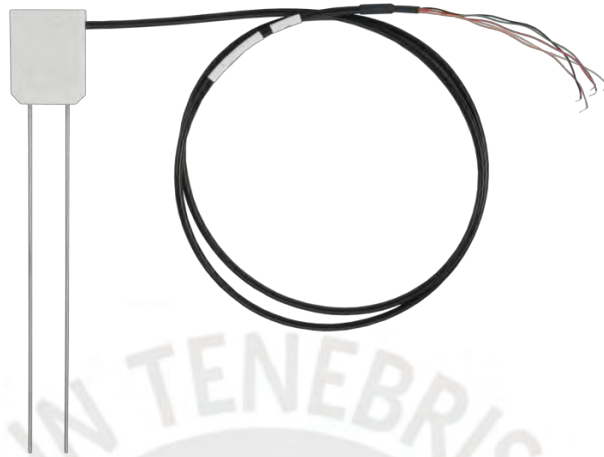


Figura 21: Sensor CS650.

Fuente: [64].

- Dendrómetro DC4: Para la medición de la variación del volumen del tronco de los árboles, se hace uso del dendrómetro DC4 de la empresa Ecomatik. Se conecta al Arduino mediante los puertos análogos, puesto que envía información de esta manera, y puede recibir energía del puerto de 5V del Arduino[65].



Figura 22: Dendrómetro DC4.

Fuente: [65].

- Batería de níquel-metal hidruro recargable: Cada nodo requiere de una fuente de energía recargable, para minimizar los costos. Se considerará para el diseño inicial un modelo de la marca Tenergy, con capacidad de 2000 mAh a un voltaje de 12 V. Cabe resaltar que el modelo presentado a continuación permite conectividad con distintos tipos de conexiones de voltaje, para poder alimentar a los componentes necesarios[66].



*Figura 23: Baterías de níquel-metal hidruro.*

Fuente:[66].

Es posible que en el análisis de energía se requiera de otras baterías con mayor capacidad, por lo que también se pueden considerar los siguientes modelos:

- Batería de níquel-metal hidruro recargable de Tenergy, a 12 V y capacidad de 10000 mAh[67].
- Batería de níquel-metal hidruro recargable de Tenergy, a 12 V y capacidad de 13000 mAh[68].

Uno de los factores a tener en cuenta en la composición final del nodo sensor es el número de sensores de contenido de agua volumétrico que serán requeridos. Se sabe que cada sensor tiene un área de sensado efectiva de 260 cm<sup>2</sup> a través de sus dos varillas, cada una con un área de sensado efectiva circular de radio de 7.5 cm[64].

Asimismo, el diámetro máximo promedio de un ejemplar de aguajal es de 60 cm[69].Por ende, para tener un valor más exacto del contenido de agua volumétrico, se hará uso de 4 sensores CS650. A continuación, en la Figura 24, se mostrará la relación entre las áreas de sensado usando 4 sensores CS650 y el área máxima que podría tener un ejemplar de aguajal.

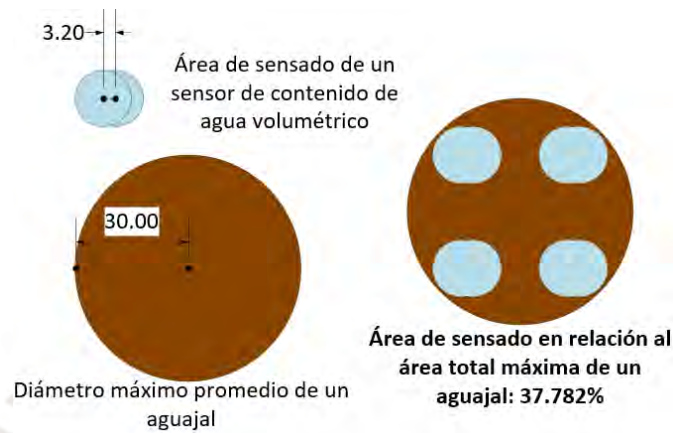


Figura 24: Relación de área de sensado y área de un ejemplar de aguajal grande. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo conocimiento de los componentes individuales, a continuación, se mostrará un esquemático de las conexiones entre dichos componentes.

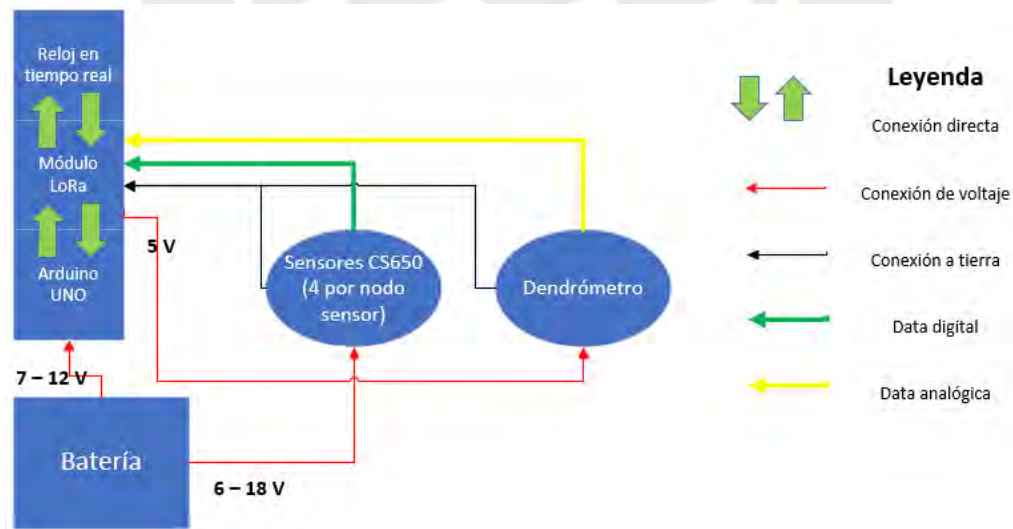


Figura 25: Conexiones entre componentes del nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

Con lo expuesto previamente, a continuación, en la Figura 26 se mostrará una ilustración que representaría cómo estarían dispuestos los componentes del nodo sensor instalados en un ejemplar de aguajal.

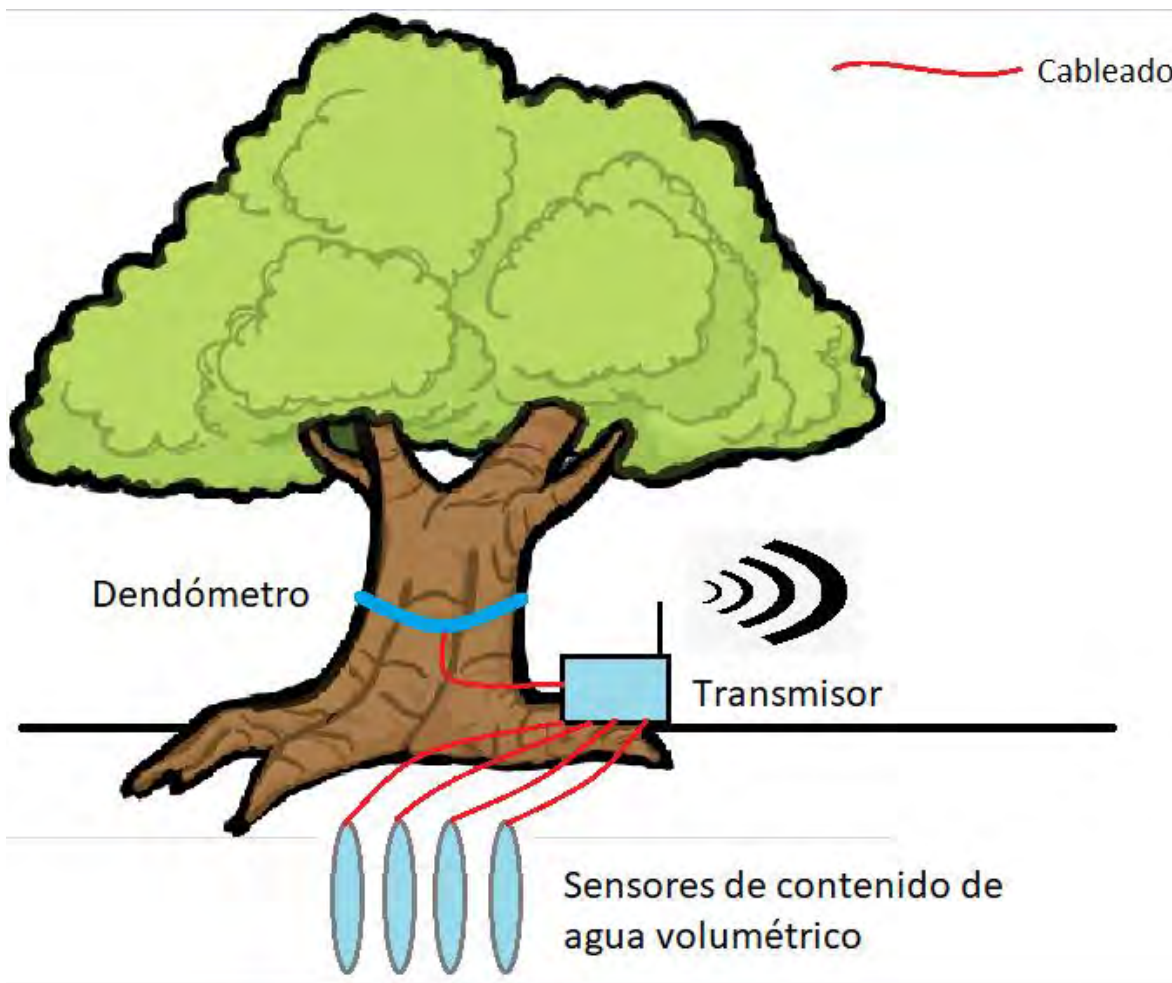


Figura 26: Composición del nodo sensor.

Fuente: Adaptado de [4].

### 3.1.2.2 Nodo recolector

El nodo recolector es el encargado de recibir la información que envía cada nodo sensor, a su vez deberá almacenar dicha información de manera local y poder retransmitirla hacia Internet para su visualización desde cualquier terminal que tenga acceso a Internet. Será considerado, para el diseño y análisis de la red en este trabajo,

equipamiento de la empresa Dragino que cumpla con las funciones mencionadas y que sea adecuado para el entorno de la red.

El equipo en cuestión, es la pasarela DLOS8, fabricada por la Dragino. Esta cuenta con las siguientes características principales:

- Diseñado específicamente para un entorno al aire libre.
- Permite la demodulación en paralelo de 10 comunicaciones.
- Tiene preconfiguradas todas las bandas de frecuencia de las cuales hace uso LoRa, esto incluye la banda de 915 MHz que será utilizada en el presente diseño.
- La conexión a Internet la puede realizar mediante WiFi, Ethernet (puerto RJ45 con protocolo PoE de 10/100 M) y redes celulares 3G o 4G. Además, cuenta con un puerto USB para la gestión del equipo.
- Voltaje de operación de 12 V a 24 V, con 1 A de corriente.
- Sensibilidad de  $-140$  dBm, este dato será usado luego en el análisis de la red[70].



*Figura 27: Nudo recolector DLOS8.*

Fuente: [70].

El nodo recolector estará ubicado en la torre de monitoreo de gases invernaderos, en el cual operan grupos de investigación la PUCP, en Madre de Dios. Dicha torre cuenta con infraestructura adecuada para el alojamiento de este nodo[4].



*Figura 28: Ubicación del nodo recolector, en la torre de flujos de Tambopata.*

Fuente: [4].

La altura a la que se encuentra el nodo recolector aún no está definida, pero las opciones de posicionamiento son las siguientes:

- A la misma altura que los nodos transmisores.
- A una altura superior a la de la vegetación, en la torre de flujos, a un máximo de 40 metros de altura, ya que la torre tiene una altura de 40 metros[1].

En el análisis del espectro, en el capítulo posterior, se concluirá que posicionamiento es el más conveniente.

En cuanto a estándares de protección, el dispositivo DLOS8 cuenta con el protección IP65[70], lo que indica que es totalmente hermético ante el polvo y protegido contra chorros de agua en todas las direcciones[71]. Por otro lado, el dispositivo cuenta con un adaptador de voltaje de 100-240 V a 12 V, pudiendo ser alimentado directamente mediante una toma de corriente. La torre de flujos de Tambopata dónde será colocado el nodo recolector cuenta con un sistema de protección para equipos eléctricos del tipo pararrayos y pozo a tierra [70].

### 3.1.3 Requerimientos debido al entorno geográfico

El lugar el cuál será el entorno de la red de sensores, está ubicado en la Reserva Nacional Tambopata, en el departamento de Madre de Dios. El ecosistema boscoso de esta zona, se caracteriza por la siguiente presencia de vegetación principalmente:

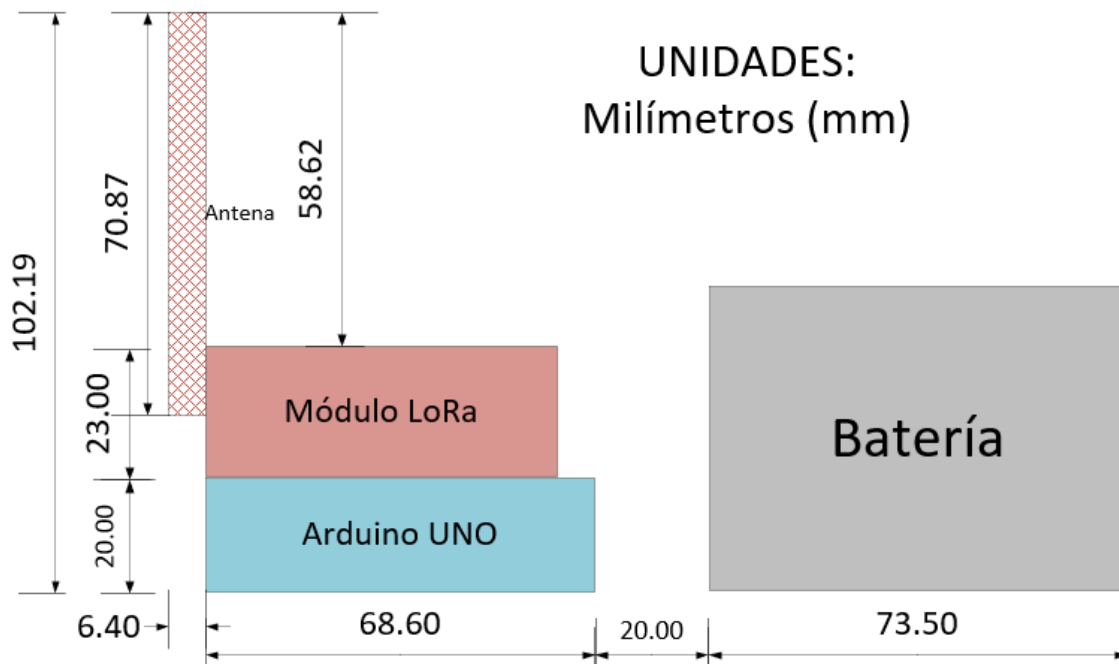
- Aguajales: Conjunto de palmeras de la especie *Mauritia flexuosa*, que crecen en tierras húmedas con presencia de agua. La altura del aguajal en la zona puede variar, llegando hasta una altura de 30 metros, siendo el promedio 20 metros, con tallos que pueden llegar a ser de 60 centímetros de diámetro.
- Pacales: Conjunto de bambúes amazónicos, comúnmente denominados pacas.
- Bosques de terrazas y de galería: Debido a la variación de altura en la zona, la vegetación a lo largo de toda la selva presenta un distinto nivel de humedad que proviene del suelo por acción de los ríos. Es por ello que existen principalmente dos tipos de bosques, de terrazas a un nivel más elevado y de galería, que se encuentran muy cercanos al nivel de los ríos. Soportan árboles de hasta 40 metros de altura.[69][72].

Adicionalmente, los principales datos de temperatura y humedad de Tambopata son los siguientes:

- La temperatura es muy variable dependiendo de la estación, en el día más caluroso del año 2019 se registró una temperatura máxima promedio de 32°C y una temperatura mínima promedio de 21°C. Por otro lado, en el día con menor temperatura del año se registró una temperatura mínima promedio de 18°C y una máxima promedio de 30°C.
- El día menos húmedo presentó un porcentaje de humedad de 67% y el día más húmedo un porcentaje de humedad de 100%. Los días más húmedos en casi la totalidad presentaron lluvia.
- La precipitación también varía enormemente dependiendo de la estación, en el día con lluvia más ligera se registró 41 milímetros de lluvia total (o 1.7983 milímetros por hora) y el día con lluvia más fuerte se registró un total de 295 milímetros de lluvia total (o 12.2917 milímetros por hora)[73].

Los valores mencionados podrían ser utilizados posteriormente en el análisis de la red, al revisar su impacto en la propagación de señales. Los aguajales representan la vegetación de mayor altura en la zona, siendo el promedio 30 metros en los árboles más altos, por lo que se considerará una altura de vegetación total promedio de 20 metros como característica del escenario y cómo indica el SERNANP[69].

El entorno descrito previamente obliga el uso de un sistema de protección para los nodos sensores, lo que se conocerá como alojamiento del nodo sensor. El alojamiento del nodo sensor deberá encargarse de proteger al módulo transmisor y el cableado con los sensores. Por motivos de conveniencia, la batería y el módulo transmisor deberán estar juntos dentro del alojamiento, y el cableado para la transmisión de datos y de poder hacia los sensores deberán ir juntos. A continuación, se mostrarán imágenes con las dimensiones de los componentes que irán dentro del alojamiento del nodo sensor:



*Figura 29: Vista lateral de los componentes dentro del alojamiento.*

Fuente: Elaboración propia.

UNIDADES:  
Milímetros (mm)

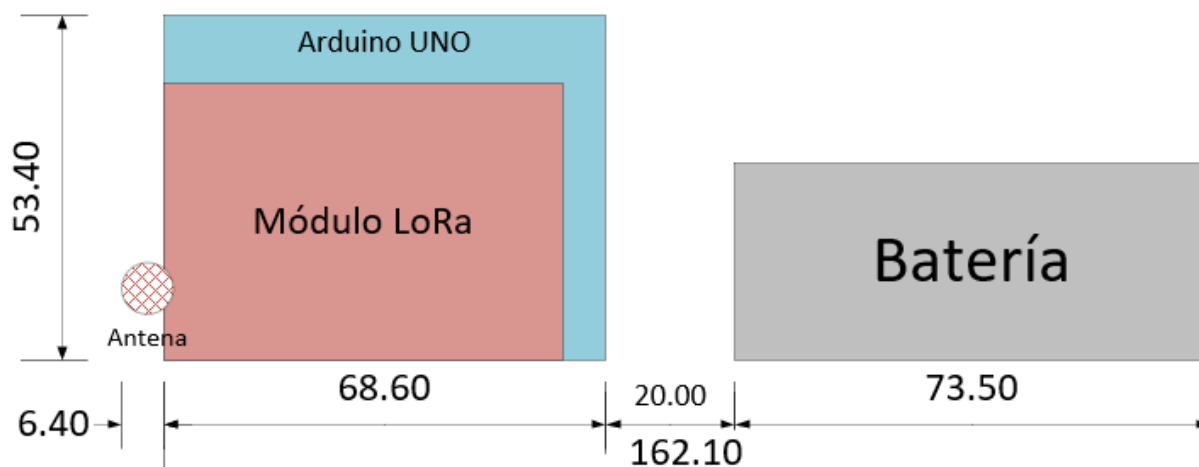


Figura 30: Vista superior de los componentes dentro del alojamiento.

Fuente: Elaboración propia.

El reloj en tiempo real está directamente conectado al Arduino UNO a través del Módulo LoRa, y sus dimensiones pueden despreciarse en comparación a los componentes ilustrados para el motivo de encontrar las medidas perimétricas de lo que sería el alojamiento del nodo sensor. En base a las figuras previas podemos concluir que el alojamiento debe ser de cómo mínimo, considerando un espacio extra de 3 mm para cada medida, de: largo de 104.19 mm, ancho de 170.50 mm y profundidad de 55.40 mm. El alto está considerando la antena de 70 mm, sin considerar la antena el alto mínimo sería de 45 mm.

Dentro del mercado, existen modelos de cajas de protección para dispositivos electrónicos que pueden ser adecuados para los componentes mostrados, que permitan salidas para los cables hacia los sensores. Uno de estos modelos es el de la empresa *RS Components*, la caja de protección RS PRO de 4 hoyos de 22.5 mm de diámetro. Este dispositivo tiene medidas internas de 47.5 mm de largo, 220.3 mm de ancho y 71 mm de profundidad[74]. La altura interna del dispositivo no permite que la antena se

mantenga adentro, pero al tener 4 hoyos en la parte superior la antena puede acomodarse a través de uno de estos, con protección adicional encima en caso de lluvias. Se presentará a continuación una imagen de la caja de protección.



*Figura 31: Caja de alojamiento del nodo sensor.*

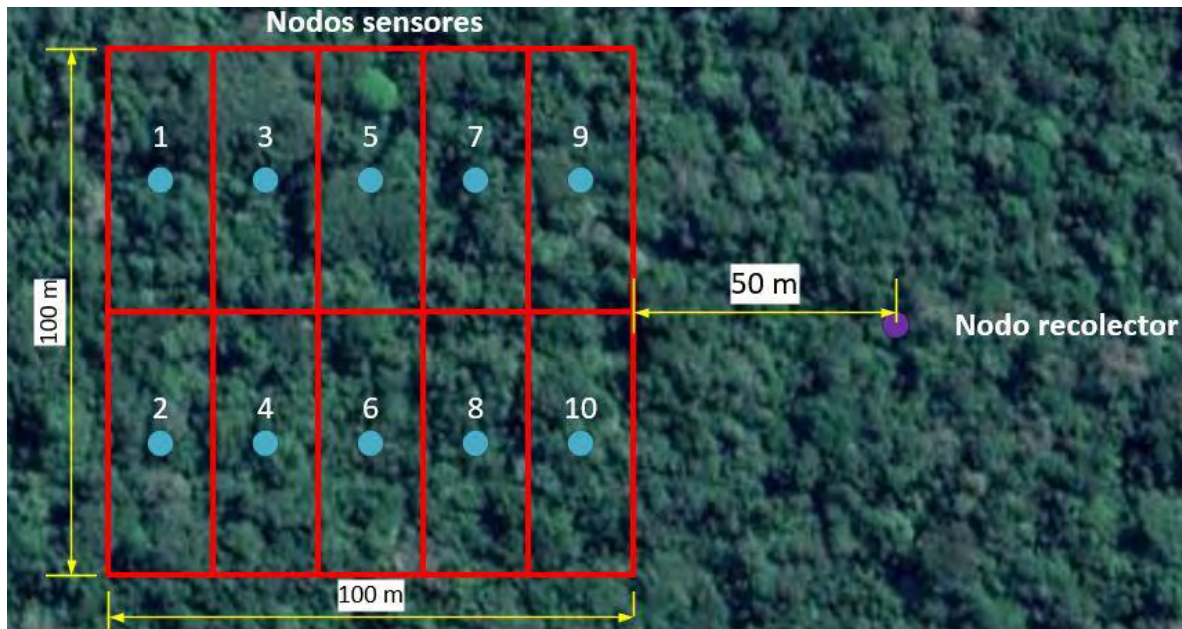
Fuente: [74].

Los hoyos, además del utilizado para el correcto posicionamiento de la antena, servirán para el cableado entre el módulo transmisor y los sensores. Cabe resaltar que cómo medida de protección del cableado se utilizarán protectores de cable plásticos, que serán incluidos más adelante en el análisis económico del diseño.

### **3.2 Diseño de la red inalámbrica de sensado remoto**

Teniendo conocimiento de los componentes presentes en la red, ahora se dará descripción de la topología, arquitectura y funcionamiento de la red de sensores. En primer lugar, se establecerá la disposición territorial de los nodos, esto en base a las dimensiones del área que se debe cubrir y el número de nodos. Cómo fue definido previamente, son 10 nodos sensores que deben repartirse dentro de una parcela con

área de 10000m<sup>2</sup>[4]. Debido a que no hay regla previa que defina la distribución de los nodos, se realizará de manera geométrica, dividiendo la parcela en 10 partes y colocando los nodos sensores en el centro de cada parte. En la Figura 32, se mostrará la distribución mencionada.



*Figura 32: Distribución de los nodos.*

Fuente: Elaboración propia.

En base a la distribución mostrada previamente, se calculan las distancias entre los nodos sensores y el nodo recolector. Se mostrarán la Figura 33 y la Tabla 11, que mostrarán las medidas halladas.

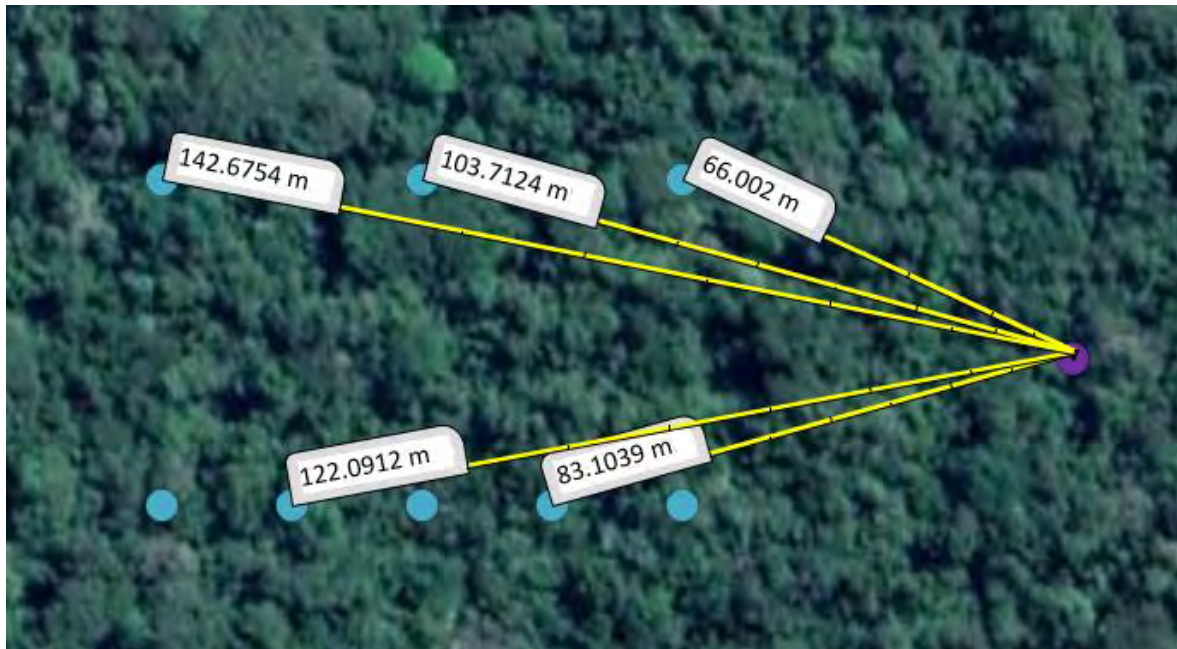


Figura 33: Distancias entre los nodos sensores y el nodo recolector.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Distancias entre los nodos sensores y el nodo recolector.

Nodos	1 y 2	3 y 4	5 y 6	7 y 8	9 y 10
Distancia (m)	142.6754	122.0912	103.7124	81.1039	66.002

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo conocimiento del número de nodos y el área que se cubrirá, se puede hacer una elección más conveniente del tipo de topología que tendrá la red. Cabe recalcar que los datos de distancias hallados previamente serán utilizados en el análisis de la red. A continuación, se describirán la topología, arquitectura y funcionamiento de la red inalámbrica de sensores.

### 3.2.1 Topología y arquitectura de la red inalámbrica

En base al número de nodos y el área de cobertura, se hará elección de elegir la topología tipo estrella para el despliegue de la red. En esta topología, están definidos solamente los dos tipos de nodos mencionados hasta el momento: los nodos sensores son conocidos como clientes y el nodo recolector es conocido como servidor[29]. Asimismo, cómo se mencionó en previamente, el nodo servido deberá almacenar la información de manera local y reenviarla a Internet para su acceso remoto. Es por ello que el nodo recolector cumple también la función de pasarela de la red. A continuación, se mostrará el diseño de la topología de la red inalámbrica local en la Figura 34.

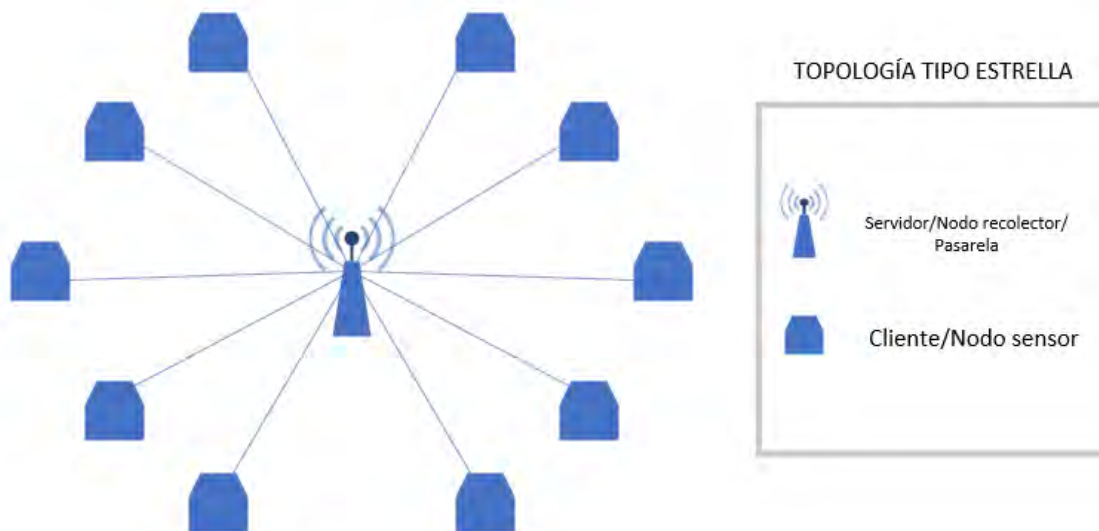


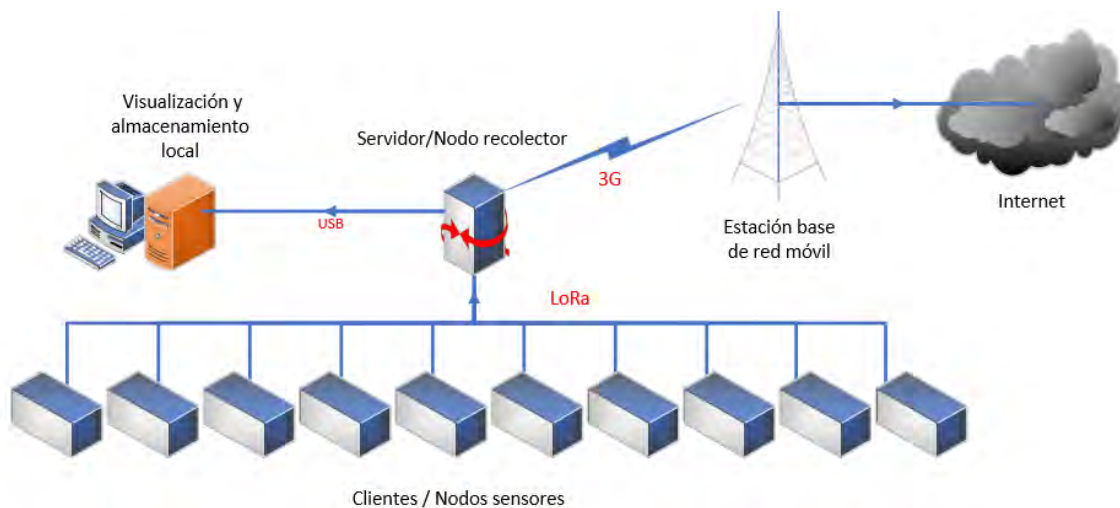
Figura 34: Topología de la red de sensado inalámbrico.

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se aprecia en la figura, cada nodo sensor tiene una comunicación directa con el nodo recolector, por lo que se puede asegurar que sólo existe un camino de comunicación entre los dos diferentes tipos de nodos. No existe ninguna comunicación entre nodos sensores, por lo que un paquete con información se generará en un nodo

sensor y llegará a ser procesado en el nodo recolector, sin pasar por ningún nodo intermedio.

En cuanto a la arquitectura que tendrá la red inalámbrica de sensado, tendrá el esquema de la Figura 35, en dónde se muestran los componentes locales de la red y externos para el acceso remoto a la información.



*Figura 35: Arquitectura de la red inalámbrica de sensado remoto.*

Fuente: Elaboración propia.

En la figura previa, se muestra cómo la comunicación entre los nodos sensores o clientes y el nodo recolector o servidor se hace mediante el uso del protocolo LoRa, cuyas bandas de uso y ancho de banda fueron definidas anteriormente. A su vez, el servidor cumple dos funciones:

- En primer lugar, enviar la información recolectada a un equipo de almacenamiento local mediante su puerto USB. Dicho puerto también es usado para la gestión del equipo.
- En segundo lugar, cumplir la función de una pasarela. El dispositivo elegido, cómo fue mencionado, puede conectarse a la red móvil ya que posee un espacio para colocar una SIM Card[70].

Luego que la información es enviada a la estación base, esta puede ser enviada a Internet para que cualquier persona que tenga acceso a la plataforma que sea utilizada pueda ver la información de manera remota.

Finalmente, las bandas de frecuencia usadas en la comunicación entre los nodos sensores y el nodo recolector tendrán impacto en el análisis del espectro electromagnético del capítulo 4 de la presente tesis.

### 3.2.2 Diagrama del flujo de datos

Es importante para el análisis posterior de la red inalámbrica definir cómo se va a dirigir la información desde el nodo sensor hacia los demás componentes posteriores a dicho nodo. En primera instancia, se deben definir todos los involucrados desde el sensor hasta el usuario final, que se encuentra fuera de la zona en dónde está ubicada la red inalámbrica. Es por ello que se hará uso de una gráfica de flujo de datos, mostrado a continuación en la Figura 36.

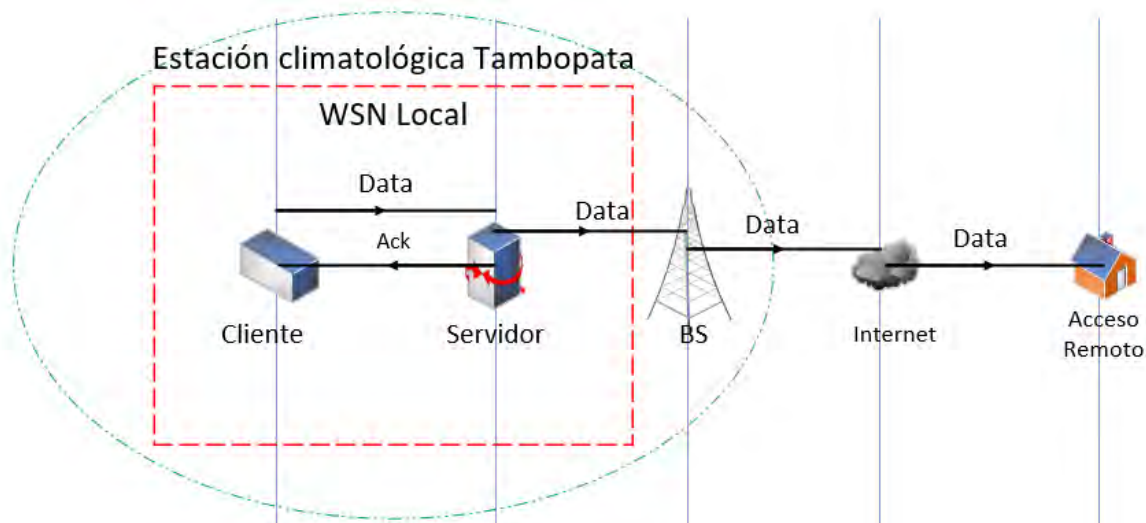


Figura 36: Flujo de datos de general.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que desde el servidor hacia el acceso remoto sólo se muestra cómo viaja la data de manera unidireccional, ya que no se entra en detalle de todos los protocolos de comunicación existentes desde el servidor hacia la parte derecha, puesto no serán considerados para el análisis de la red inalámbrica.

Se realizó una segmentación del diagrama completo para que se puedan visualizar dos zonas importantes. Primero, la red inalámbrica local delimitada por las líneas punteadas rojas, sólo la componen los nodos clientes y el servidor. Es entre estos dispositivos que se realiza comunicación bidireccional que será detallada posteriormente. Segundo, la estación climatológica de Tambopata delimitada por las líneas punteadas verdes, que está compuesta por la red inalámbrica local y la estación base de red móvil que permite la comunicación hacia el exterior.

Prosiguiendo con el diagrama de flujos, se dará detalle del segmento relevante para el análisis del presente documento, que está conformado por los nodos sensores y el nodo recolector (clientes y servidor). A continuación, la Figura 37 muestra unos detalles adicionales de la comunicación.

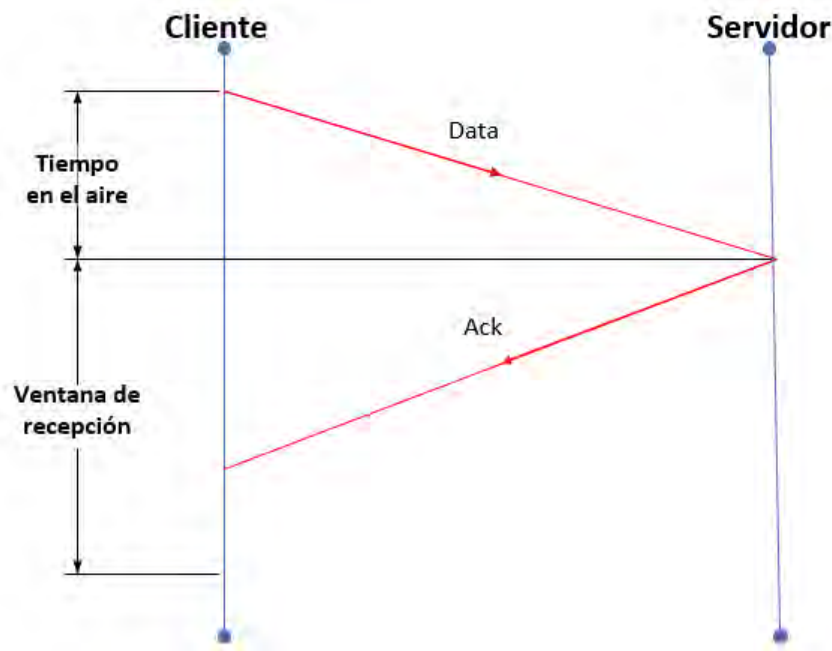


Figura 37: Flujo de datos entre el cliente y el servidor.

Fuente: Adaptado de [40].

El flujo de datos presentado es simple y muestra que el acceso al medio se hace de manera directa, es decir el cliente envía su información al servidor sin realizar ninguna consulta sobre el estado del medio. El servidor responde con un mensaje de *Ack*, que indica que recibió la información. Dos parámetros importantes que serán utilizados en el análisis posterior son el Tiempo en el aire y la Ventana de recepción. Estos parámetros, cuyas unidades son los segundos, son definidos en la configuración inicial del nodo sensor (o cliente) y dependen a su vez de otros parámetros. El tiempo en el aire es el tiempo que demora la información en llegar desde el cliente al servidor, y la ventana de recepción es el tiempo que espera el cliente por la respuesta *Ack* del servidor. En caso de no recibir la confirmación *Ack* por parte del servidor, el cliente deberá retransmitir la información, existiendo un número máximo de retransmisiones permitidas también definido en la configuración inicial del nodo sensor. Con la recepción del mensaje *Ack* termina la comunicación entre los dispositivos, por lo que la ventana de recepción se cierra automáticamente al llegar el mensaje *Ack*[40].

Finalmente, los parámetros mencionados en el presente capítulo serán utilizados en el siguiente para los cálculos correspondientes al análisis.



## Capítulo 4

### **Análisis de la red inalámbrica de sensado remoto para la estación climática Tambopata**

En el último capítulo, se realizará el análisis de tres aspectos del diseño de la red inalámbrica de sensado remoto establecido previamente. El primer aspecto será el espectro electromagnético, en el cual se establecerán relaciones de potencias entre los dispositivos en el entorno de vegetación presente en la zona, además de cálculos referentes al canal. En este aspecto del análisis se realizarán comparaciones con otras tecnologías. Luego, se realizará el análisis del consumo energético de la red inalámbrica. Finalmente, se establecerá un costo aproximado del total de componentes a utilizar.

## 4.1 Análisis del espectro electromagnético

El entorno geográfico y ambiental en el cual se encuentra la red inalámbrica, que fue descrito previamente en el capítulo 3, afectará a la comunicación entre los nodos sensores y el nodo recolector. El entorno presenta temperatura y humedad variables, precipitación (lluvia) por temporadas y el factor más importante, la presencia de vegetación. Sobre los tres factores mencionados previamente, se consultaron documentos de recomendación de la UIT así como bibliografía que brinden modelos de atenuación debido a dichos factores. Finalmente, sobre la humedad y precipitación se concluye lo siguiente:

- En el caso de la humedad, que es vapor de agua, un gas atmosférico: La recomendación vigente para el cálculo de atenuación por estos efectos es válida para el rango de frecuencias de 1 – 1000 GHz[75].
- En el caso de la precipitación o lluvia: La recomendación vigente de modelo de atenuación específica debida a la lluvia indica que el cálculo de atenuación por dicho efecto es útil para el rango de frecuencias de 1 – 1000 GHz, además de ser expresada en dB/km, por lo que es más útil para distancias en el orden de los kilómetros[76].

La información expuesta precisa que la atenuación debido a precipitación y humedad afectan a comunicaciones en frecuencias del orden de los GHz, por lo que no sería tomada en cuenta al hacer uso de bajas frecuencias. Una publicación de la Oficina de Telecomunicaciones del Departamento de Comercio de Estados Unidos sobre ratios de error en transmisiones inalámbricas indica que los efectos de atenuación por precipitación o gases atmosféricos se hacen notables a partir de los 3 GHz. Para el caso de 1 GHz, la atenuación por el oxígeno gaseoso al nivel del mar está entre el rango de 0.005 dB a 0.001 dB y la atenuación por una lluvia de 150 milímetros por hora es menor a 0.01 dB/km[77].

Por ello, los efectos de la precipitación y humedad serán despreciados en el cálculo de atenuación de la señal transmitida. Entonces, el factor que se debe analizar es la

atenuación debido a la vegetación, para el cuál se tomará un modelo recomendado basado en el modelo de la UIT.

#### 4.1.1 Cálculos de atenuación debido a la vegetación

Cómo fue mencionado en el capítulo 2 de la presente tesis, la atenuación por vegetación depende del tipo de vegetación y de sus características, y entran a tallar parámetros que son hallados empíricamente. El modelo escogido para la atenuación será el descrito en la ecuación (3):

$$L = Af^Bd^C \quad (3)$$

En dónde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los parámetros hallados empíricamente, pero se sabe que  $A$  varía entre 0.37 y 0.39,  $B$  varía entre 0.18 y 0.39 y  $C$  varía entre 0.25 y 0.59[16]. Siguiendo estos valores, lo que se propone a continuación una evaluación de en cuánto varía la atenuación para nuestro escenario si se varían los parámetros  $B$  y  $C$  en sus rangos mencionados mientras se mantiene  $A$  constante en su valor intermedio, que vendría a ser 0.38. Además, se realizará esto de manera tal que la altura del nodo recolector varíe, empezando a la misma altura de los nodos sensores, a 30 metros y a 40 metros; esto debido a que se tomará en cuenta la altura promedio de los aguajales de la zona cómo 20 metros. El valor de  $f$  siempre será de 915 MHz, y el valor de  $d$  irá variando dependiendo de la disposición de los nodos. Las unidades de  $L$  son los decibelios (dB).

Por lo que, considerando las distancias del diseño, se tendría la disposición general de los nodos y distancias en la Figura 38, y los valores para todos los casos mostrados en la Tabla 12.

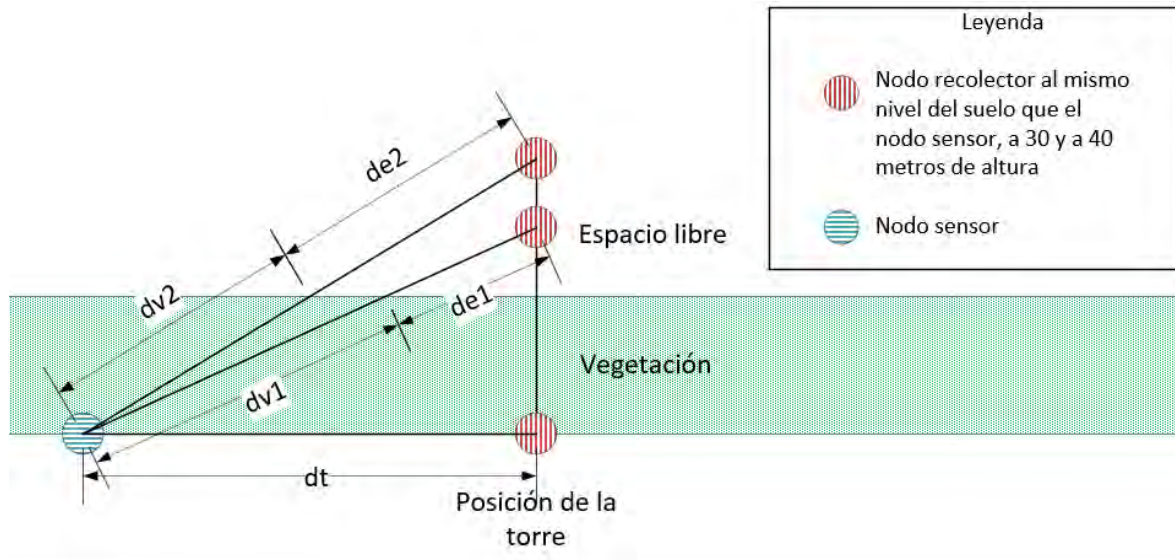


Figura 38: Disposición de los nodos y las distancias entre estos.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura, la distancia entre el nodo sensor y el nodo recolector cuando ambos se encuentran a la misma altura es  $d_t$ , cuando el nodo recolector se encuentra a 30 metros de altura en la torre la distancia se divide en una distancia  $d_v$  que es el recorrido dentro de la vegetación y una distancia  $d_e$  que es el recorrido en el espacio libre. Cuando el nodo recolector está a 30 metros dichas distancias se denotan como  $d_{v1}$  y  $d_{e1}$ , respectivamente; cuando el nodo recolector está a 40 metros se denotan como  $d_{v2}$  y  $d_{e2}$ . Sus valores respectivos se muestran a continuación.

Tabla 12: Valores de las distancias según la disposición de los nodos.

	$d_{v1}$ (m)	$d_{e1}$ (m)	$d_{v2}$ (m)	$d_{e2}$ (m)
$d_t=66.002$ m	48.333	24.167	38.589	38.588
$d_t=83.104$ m	58.902	29.451	46.115	46.114
$d_t=103.712$ m	71.976	35.988	55.579	55.579
$d_t=122.091$ m	83.815	41.907	64.239	64.238
$d_t=142.675$ m	97.197	48.598	74.088	74.088

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de distancia mencionados, y siguiendo la ecuación (3), se muestra a continuación la Tabla 13 en dónde se calcula la atenuación para  $A = 0.38$  (valor medio entre 0.37 y 0.39 en los que oscila  $A$ ) y los valores de  $B$  y  $C$  en sus mínimos y máximos respectivos, en el caso que los nodos sensor y nodo recolector están al mismo nivel del suelo.

Tabla 13: Atenuación por vegetación cuando los nodos se encuentran al mismo nivel del suelo.

Tabla de atenuación $A = 0.38$ Nodos al mismo nivel	$B = 0.18$		$B = 0.39$	
	$C = 0.25$	$C = 0.59$	$C = 0.25$	$C = 0.59$
$d_t=66.002$	3.696 dB	15.360 dB	15.475 dB	64.310 dB
$d_t=83.104$	3.915 dB	17.596 dB	16.392 dB	73.674 dB
$d_t=103.712$	4.138 dB	20.053 dB	17.326 dB	83.960 dB
$d_t=122.091$	4.315 dB	22.079 dB	18.047 dB	92.445 dB
$d_t=142.675$	4.482 dB	24.205 dB	18.764 dB	101.345 dB

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, variando los parámetros  $B$  y  $C$  mientras se mantiene  $A$  constante en 0.38, se desarrollan los casos en los cuales el nodo recolector se encuentra a 30 metros (Tabla 14) y 40 metros (Tabla 15) del nivel del suelo. Para los casos mencionados, ya no se hace uso de la distancia  $d_t$  utilizada en la tabla previa, sino las distancias  $d_{v1}$  y  $d_{v2}$  para los casos del nodo recolector a 30 y 40 metros de altura respectivamente.

Tabla 14: Atenuación por vegetación cuando el nodo recolector se encuentra a 30 metros.

Tabla de atenuación $A = 0.38$ Recolector a 30 m	$B = 0.18$		$B = 0.39$	
	$C = 0.25$	$C = 0.59$	$C = 0.25$	$C = 0.59$
$d_{v1}=48.333$	3.419 dB	12.780 dB	14.315 dB	53.511 dB
$d_{v1}=58.902$	3.592 dB	14.362 dB	15.041 dB	60.133 dB
$d_{v1}=71.976$	3.777 dB	16.165 dB	15.814 dB	67.683 dB
$d_{v1}=83.815$	3.923 dB	17.685 dB	16.427 dB	74.045 dB
$d_{v1}=97.197$	4.071 dB	19.300 dB	17.047 dB	80.808 dB

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Atenuación por vegetación cuando el nodo recolector se encuentra a 40 metros.

Tabla de atenuación $A = 0.38$ Recolector a 40 m	$B = 0.18$		$B = 0.39$	
	$C = 0.25$	$C = 0.59$	$C = 0.25$	$C = 0.59$
$d_{v2}=38.589$	3.232 dB	11.191 dB	13.352 dB	46.854 dB
$d_{v2}=46.115$	3.379 dB	12.431 dB	14.148 dB	52.048 dB
$d_{v2}=55.579$	3.541 dB	13.878 dB	14.824 dB	58.108 dB
$d_{v2}=64.239$	3.671 dB	15.116 dB	15.370 dB	63.291 dB
$d_{v2}=74.088$	3.804 dB	16.443 dB	15.928 dB	68.848 dB

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede apreciar, las pérdidas varían dependiendo de los parámetros B y C y de la distancia en vegetación recorrida por la señal. Para tener un mejor entendimiento de estas variaciones, se muestra en las siguientes figuras gráficas de la atenuación de acuerdo al cambio de valores para los parámetros B y C, tomando el caso de los nodos sensores más lejanos al recolector cuándo están al mismo nivel del suelo.

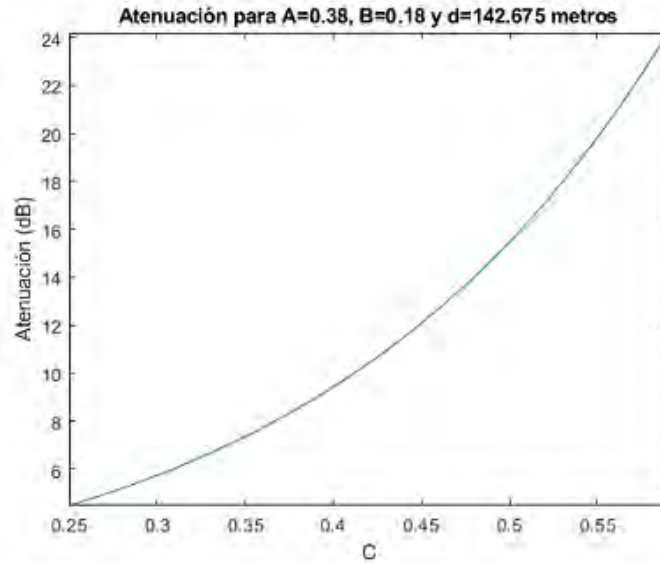


Figura 39: Atenuación para  $A=0.38$ ,  $B=0.18$  y  $d=142.675$  metros.

Fuente: Elaboración propia.

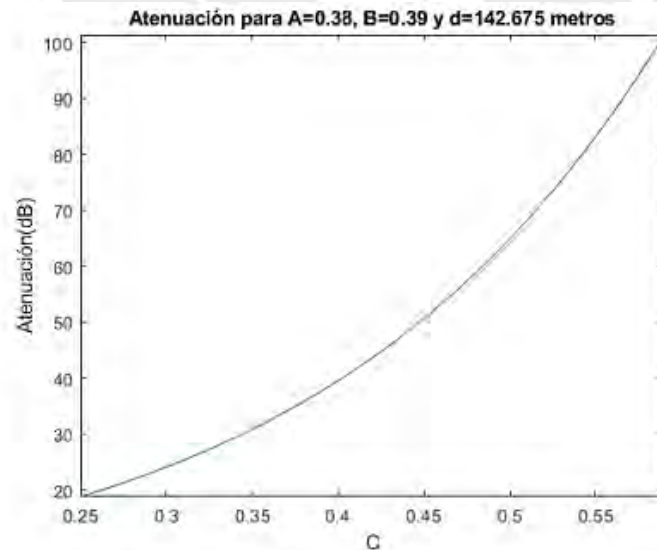


Figura 40: Atenuación para  $A=0.38$ ,  $B=0.39$  y  $d=142.675$  metros.

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede observar, la atenuación tiene un comportamiento exponencial dependiente de los parámetros  $B$  y  $C$ . En los casos en los cuales el nodo recolector se encuentra a 30 y 40 metros de altura, es necesario calcular la atenuación en el espacio

libre en función al recorrido  $d_{e1}$  y  $d_{e2}$  que tienen las señales. Se tomará el modelo de pérdidas de potencia de Friis para el espacio libre, el cuál viene dado por la siguiente ecuación en forma logarítmica[78]:

$$FSPL(dB) = 20\log\left(\frac{4\pi df}{c}\right) \quad (5)$$

Dónde  $d$  es la distancia recorrida,  $f$  la frecuencia y  $c$  la velocidad de la luz. Entonces a continuación se muestra en la Tabla 16 las atenuaciones por vegetación y pérdidas en el espacio libre para todos los casos en cuestión, considerando el peor de los casos en la atenuación por vegetación, es decir cuándo los parámetros B y C son 0.39 y 0.59 respectivamente. Se denotará a la atenuación por vegetación cómo  $A_v$ .

Tabla 16: Pérdidas totales por atenuación y espacio libre para los tres casos planteados.

Nodos	Sensores y recolector al mismo nivel de altura			Recolector a 30 m del suelo			Recolector a 40 m del suelo		
	$A_v$ (dB)	FSPL (dB)	Total (dB)	$A_v$ (dB)	FSPL (dB)	Total (dB)	$A_v$ (dB)	FSPL (dB)	Total (dB)
9,10	64.310	0	64.310	53.511	59.335	112.846	46.854	63.399	110.253
7,8	73.674	0	73.674	60.133	61.052	121.185	52.048	64.947	116.995
5,6	83.960	0	83.960	67.683	62.793	130.476	58.108	66.568	124.676
3,4	92.445	0	92.445	74.045	64.908	138.953	63.291	67.826	131.117
1,2	101.345	0	101.345	80.808	65.403	146.211	68.848	69.065	137.913

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos presentados previamente, se concluye que las pérdidas por atenuaciones son menores cuándo los nodos sensores y el nodo recolector se encuentran al mismo nivel del suelo. También se puede observar que el peor caso se obtiene cuando el

recolector se encuentra a 30 metros del suelo, y que las atenuaciones por vegetación incluso pueden ser menores que las pérdidas por espacio libre. Esto es debido a las diferentes distancias recorridas en los diferentes entornos del caso (vegetación y espacio libre) y que los modelos de atenuación por vegetación y pérdidas en el espacio libre son exponencial y logarítmico, respectivamente.

La potencia de recepción del nodo recolector será útil al querer calcular la capacidad del canal, que a su vez será útil para establecer intervalos de tiempo entre transmisión. Para hallar dicha potencia de recepción, ya se cuenta con los valores totales de pérdidas en el trayecto, y a continuación se muestran los datos restantes para el cálculo:

- Potencia de transmisión del transceptor (operando con modulación LoRa): 13 dBm[79].
- Ganancia de la antena de transmisión: 3.35 dBi a 904 MHz, 3.18 dBi a 918 MHz (Anexo 1).
- Sensibilidad del nodo recolector: -140 dBm[70].

Al tomar el mejor caso de disposición de los nodos (el caso en el cual los nodos sensores y el nodo recolector se encuentran al mismo nivel del suelo, dentro de la vegetación), se tienen las potencias finales de recepción en el nodo recolector para todos los nodos de la red en la Tabla 17. También se está considerando la ganancia de la antena como 3.18 dBi (caso mínimo para las frecuencias adyacentes a 915 MHz).

Tabla 17: Potencia de recepción en el nodo recolector para todos los nodos de la red inalámbrica en el caso dónde los nodos se encuentran a la misma altura.

Nodos	Potencia de transmisión (dBm)	Ganancia de la antena (dBi)	Atenuación por vegetación (dB)	Potencia de recepción (dBm)
1,2	13	3.18	101.345	-85.165
3,4	13	3.18	92.445	-76.265
5,6	13	3.18	83.960	-67.780
7,8	13	3.18	73.674	-57.494
9,10	13	3.18	64.310	-48.130

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede apreciar, los valores de potencia recibida por el nodo recolector están por debajo del valor de la sensibilidad del nodo recolector, por lo que está asegurada la correcta recepción de la señal en términos de potencia. Si consideramos la sensibilidad del equipo que funcionará como nodo recolector y un margen de guarda de 10 dB, podemos conocer la máxima distancia teórica entre el nodo recolector y un nodo sensor para que la señal sea receptada y demodulada. Tomando el caso en el cuál ambos nodos se encuentran al mismo nivel del suelo dentro de la vegetación y a una potencia de transmisión de nodo recolector de 13 dBm y ganancia de antena de 3.18 dBi, la atenuación máxima deberá ser de 146.8 dB para que en el nodo recolector la señal sea receptada con -130 dBm de potencia (la sensibilidad es de -140 dBm, pero consideramos 10 dBm de margen de guarda). Según la ecuación (3) esa atenuación, para los valores de  $A = 0.38$ ,  $B = 0.39$  y  $C = 0.59$ , a la frecuencia de 915 MHz, se da a una distancia de 267.361 metros. Considerando esta distancia como la distancia máxima entre un nodo sensor y el nodo recolector, se presenta a continuación en la Figura 41 máxima distancia entre la parcela y el nodo recolector.

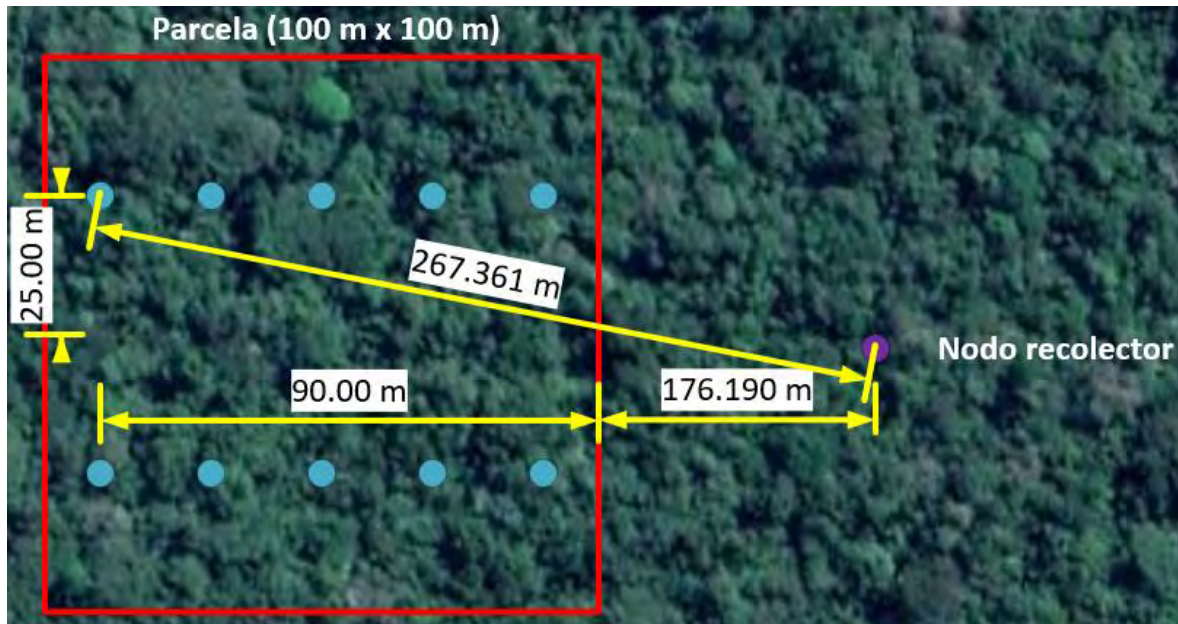


Figura 41: Máxima distancia posible entre la parcela de nodos sensores y el nodo recolector.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede concluir que la máxima distancia entre el nodo recolector y la parcela permitida para la correcta recepción de la señal deberá ser de 176.190 metros. Para realizar una comparativa de cuánto puede atenuar a la señal la vegetación presente, si usamos la ecuación (5) de pérdidas en el espacio libre para calcular la distancia la cual produce la atenuación máxima aceptada, que es 146.8 dB para que el nodo recolector reciba la señal a -130 dB, dicha distancia sería de 570.808 km. Es decir, en el espacio libre sin ningún obstáculo la señal que se emite con una potencia de 16.18 dB podría viajar 570.808 km y ser percibida por el recolector con una potencia de -130 dB. Esto demuestra que para condiciones ideales la atenuación producida en el espacio libre afecta más a la señal durante los primeros metros.

En términos de atenuación por vegetación, se realizará la comparación de atenuación con otras tecnologías tomando en cuenta las frecuencias indicadas por cada tecnología:

- Zigbee puede hacer uso de la banda de 915 MHz y 2.4 GHz[41].
- NB-IoT puede hacer uso de las bandas GSM y LTE[47], que en Perú son: bandas de 850 MHz, 900 MHz, 1900 MHz y AWS (1740 MHz y 2140 MHz)[80].

- 5G en Perú está programado a usar la banda de 3500 MHz[81].
- Sigfox en el uplink usa el rango de frecuencias de 920.704 MHz hasta 920.896 MHz, centrado en los 920.800 MHz[55].

Entonces, considerando una distancia entre el nodo sensor más lejano y el nodo recolector de 142.675 metros, y los casos extremos de la ecuación (3) (B y C son 0.39 y 0.59 respectivamente) se presenta a continuación la Tabla 18 con la comparación de atenuaciones usando diferentes tecnologías, cuando el nodo recolector y el nodo sensor se encuentran a la misma altura del suelo.

Tabla 18: Comparación de atenuación por vegetación usando diferentes tecnologías inalámbricas.

Tecnología	Frecuencia (MHz)	Atenuación (dB)
LoRa	915	101.345
Zigbee	915	101.345
	2400	147.661
NB-IoT	850	98.505
	900	100.725
	1900	134.802
	1740	130.256
	2140	141.203
5G	3500	171.068
Sigfox	920.8	101.595

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede apreciar, los casos de mayor atenuación por vegetación se dan cuando la frecuencia es mayor. Es por ello, que el caso más óptimo es para NB-IoT cuando se usa la banda GSM de 850 MHz, sin embargo, el valor de atenuación es muy cercano al de LoRa para la banda de 915 MHz. El peor caso se da al usar la tecnología 5G, con una atenuación de 171.068 dB.

#### 4.1.2 Cálculo de la tasa de transmisión de bits

Para realizar el cálculo de cuantos bits son transmitidos por segundo con los transceptores escogidos en el diseño, se hace uso de una fórmula que toma en cuenta parámetros adicionales de la configuración del dispositivo. La fórmula viene dada por[82]:

$$EBR = SF \frac{BW}{2^{SF}} CR \quad (6)$$

$EBR$  es la tasa de transmisión de bits,  $BW$  es el ancho de banda del canal,  $SF$  es el factor de propagación y  $CR$  es la tasa de codificación. Como fue mencionado en el capítulo 2, el factor de propagación o *Spreading Factor* es la inversa del tiempo de duración de un chirp. Como se puede observar de la ecuación, un menor factor de propagación produce una mayor tasa de transmisión de bits. Sin embargo, se elige el mayor factor de propagación posible porque esto permite un mayor alcance[37].

El transceptor RFM95W, permite para la modulación LoRa un factor de propagación con valor igual a 12 y una tasa de codificación modificable de 4/5 hasta 4/8. También se puede hacer uso de un factor de propagación de 6, pero se optimiza el desempeño al usar el valor 12[79]. A continuación, en la Tabla 19, se mostrarán los valores de tasa de transmisión de bits para nuestro caso  $BW = 125 \text{ kHz}$ ,  $SF = 12$  y tasa de codificación variable desde 4/5 hasta 4/8.

Tabla 19: Tasas de transmisión de bits cuando varía la tasa de codificación.

Tasa de codificación	Tasa de transmisión de bits (bps)
4/5	292.969
4/6	244.141
4/7	209.263
4/8	183.105

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la tasa de codificación influye en la defensa de la comunicación ante las interferencias, por ejemplo, una tasa de codificación de 4/5 indica que se codifican 4 bits de data en 5 bits, usando un bit de redundancia. Es recomendable que la tasa de codificación sea de 4/8 cuando en el entorno existen muchas fuentes de interferencia, cómo en nuestro caso[83]. Es por ello que se tomará para efectos del análisis una tasa de transmisión de bits de 183.105 bps, lo que implica que se elige la tasa de codificación de 4/8.

Teniendo en cuenta la tasa de transmisión de LoRa, ahora se listan tasas de transmisión de bits promedio de las alternativas tecnológicas de comunicaciones inalámbricas:

- Según el Release 13 de NB-IoT, se definen tasas de transmisión de bits de bajada de 200 kbps y de subida de 144 kbps cómo máximo[48].
- En el caso del protocolo Zigbee, la tasa de transmisión de bits depende de la potencia utilizada en el dispositivo transmisor y la distancia recorrida. Si tomamos un caso cercano a nuestro escenario, para una distancia de 154 metros con una potencia de 100 mW se puede obtener una tasa de transmisión de bits de 28 kbps[84].
- En el caso de 5G, para una red de sensores inalámbricos en un área de 1000000 km<sup>2</sup> Y 50 nodos, usando una estación base se estimó en simulaciones una capacidad de canal de 870 Mbps[53]. Esta capacidad implica que los nodos tienen tasas de transmisiones de bits en el orden de los Mbps.
- Finalmente, en nuestra región haciendo uso de Sigfox la tasa de bits máxima es de 600 bps[54].

Entonces, podemos concluir que LoRa tiene menor tasa de transmisión de bits que las alternativas mencionadas, siendo Sigfox la tecnología más cercana en comparación. Sin embargo, el impacto verdadero de este parámetro se visualizará en la aplicación de la red de sensores que se analice. En nuestro caso, al ser 10 el número de nodos sensores y un periodo de muestreo definido inicialmente de 5 minutos, se puede hacer uso de LoRa para transmitir data.

### 4.1.3 Cálculo de tiempo de duración de paquete

El tiempo de duración de un paquete de LoRa o tiempo en el aire depende tanto de parámetros mencionados previamente, cómo el ancho de banda, el factor de propagación  $SF$ , la tasa de codificación  $CR$  y de otros que dependen de la estructura del paquete de LoRa, que serán explicados a continuación. Primero, se definirá el periodo de símbolo, en función al ancho de banda  $BW$  y al factor de propagación  $SF$  [79]:

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

A partir del periodo de símbolo se define el tiempo de símbolo, cuyas unidades son los segundos, de la siguiente manera[79]:

$$T_s = \frac{1}{R_s} \quad (8)$$

En nuestro caso, el valor del tiempo de símbolo es igual a

$$T_s = \frac{2^{12}}{125 \times 10^3} = 32.768 \text{ ms} \quad (9)$$

Ahora, los paquetes LoRa se dividen en tres partes:

- El preámbulo, utilizado para sincronizar al receptor con la data que está por recibir.
- La cabecera, que puede estar presente o no dependiendo de la configuración, cuya función es informar sobre el número de bytes de la data, la tasa de codificación y si existe verificación de redundancia.
- La data, información útil para los usuarios[79].

Los valores por defecto para la modulación LoRa con el transceptor RFM95W son de un preámbulo de 12 símbolos, data de 64 bytes y la presencia de cabecera[79]. Sin

embargo, estos valores también pueden ser modificables dependiendo de la herramienta que se usa para configurar el transceptor.

En nuestro caso, se considerará el uso de la librería *RadioHead* compatible con el transceptor RFM95W y con el módulo Dragino de LoRa. Esta librería presenta por defecto un preámbulo de 8 símbolos y el tamaño de la data hasta de 251 bytes, además de tener presente siempre la cabecera en la estructura del paquete[85]. Para consideraciones del análisis, se considerará el máximo tamaño de paquete posible, que es de 251 bytes.

Con estas consideraciones, ya se puede empezar a realizar el cálculo del tiempo en el aire o tiempo de transmisión de un paquete denotado por  $T_{packet}$ . Este será la suma del tiempo del preámbulo  $T_{preamble}$  y el tiempo de la data  $T_{payload}$  de la siguiente manera[79]:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (10)$$

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \times T_s \quad (11)$$

$$T_{payload} = n_{payload} \times T_s \quad (12)$$

$$n_{payload} = 8 + \max\left(\text{ceil}\left[\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)}\right], (CR + 4), 0\right) \quad (13)$$

En dónde:

- $n_{preamble}$  es el tamaño del preámbulo, en nuestro caso 8 símbolos.
- Para hallar  $n_{payload}$ , número de símbolos de la data, es necesario conocer los valores de:

- PL, el número de bytes de data, en nuestro caso 251.
- SF, el factor de propagación, en nuestro caso 12.
- CRC, tiene valor de 1 cuando el paquete presenta la cabecera en su estructura, por lo que en nuestro caso es 1.
- IH, también depende de la presencia de cabecera, cuando está presente la cabecera tiene valor 0, caso contrario tiene valor 1. En nuestro caso tiene valor 0.
- DE, tiene valor 1 cuándo el tiempo del símbolo es igual o excede los 16 ms. En nuestro caso al ser el tiempo del símbolo 32.768 ms, tiene valor 1. En el caso contrario de ser menor a 16 ms puede ser 0 o 1, dependiendo de la configuración del usuario.
- CR que tiene valor del 1 al 4, dependiendo la tasa de codificación. Cuando la tasa es de 4/5 tiene valor 1, cuando es de 4/8 tiene valor 4. En nuestro caso tiene valor 4[79].

Con esta información y las fórmulas presentadas previamente, se presenta en la Tabla 20 los valores calculados.

Tabla 20: Valores de tiempos de preámbulo, tiempo de la data, y tiempo en el aire para el escenario del presente diseño.

Parámetro	Valor
$n_{preamble}$	8 símbolos
$n_{payload}$	416 símbolos
$T_{preamble}$	401.408 ms
$T_{payload}$	13631.488 ms
$T_{packet}$	14032.896 ms

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede apreciar, el tiempo en el aire para un paquete que cuenta con 251 bytes de data es de 14.033 segundos. Se realizaron los mismos cálculos bajo las mismas condiciones, pero para un paquete que cuenta con 64 bytes de data y el tiempo en el aire disminuyó a 4.071 segundos. Se puede concluir que el tamaño de la información influenciará en la duración del tiempo en el aire o duración de paquete.

Con el tiempo en el aire, que fue mencionado en la parte final del capítulo 3 de la presente tesis, pueden ser establecidos intervalos de transmisión entre los nodos sensores para así evitar coaliciones en el canal. Cómo se estableció en dicho capítulo, luego que el recolector recibe un paquete este debe responder al nodo sensor con un mensaje de confirmación. El nodo sensor deberá esperar por este mensaje antes de la retransmisión durante una ventana de recepción que puede ser definida por el usuario; la ventana de recepción puede ser establecida cómo, por ejemplo, dos veces el tiempo en el aire. Asimismo, si no se recibe un mensaje de confirmación, se procede con el reenvío del paquete, existiendo también un número máximo de reenvíos[40].

En nuestro caso, vamos a considerar intervalos de transmisión dependiendo de ventanas de espera múltiplos del tiempo en el aire previamente calculado, se considerarán:

- Ventana de recepción uno:  $T_{v1}$  igual al tiempo en el aire, 14.033 segundos.
- Ventana de recepción dos:  $T_{v2}$  igual a dos veces el tiempo en el aire, 28.066 segundos.
- Ventana de recepción tres:  $T_{v3}$  igual a tres veces el tiempo en el aire, 42.099 segundos.

En dónde cada nodo tendrá un tiempo de comunicación igual al tiempo en el aire más la ventana de comunicación, sin considerarse retransmisiones. Además, se considerará un tiempo de guarda entre transmisiones de los nodos sensores, igual a 5 segundos. A continuación, se muestran los posibles intervalos de transmisión de datos entre los nodos dependiendo de diferentes duraciones de la ventana de recepción, en la Tabla 21.

Tabla 21: Posibles intervalos de transmisión para diferentes ventanas de recepción.

	Ventana 1		Ventana 2		Ventana 3	
Tiempo en el aire (s)	14.033		14.033		14.033	
Ventana de recepción (s)	14.033		28.033		42.099	
Tiempo de comunicación (s)	28.066		42.066		56.132	
Tiempo de guarda (s)	5		5		5	
Nodo	Inicio de Tx	Final de Tx	Inicio de Tx	Final de Tx	Inicio de Tx	Final de Tx
1	0	28.066	0	42.066	0	56.132
2	33.066	61.132	47.066	89.132	61.132	117.264
3	66.132	94.198	94.132	136.198	122.264	178.396
4	99.198	127.264	141.198	183.264	183.396	239.528
5	132.264	160.33	188.264	230.33	244.528	300.66
6	165.33	193.396	235.33	277.396	305.66	361.792
7	198.396	226.462	282.396	324.462	366.792	422.924
8	231.462	259.528	329.462	371.528	427.924	484.056
9	264.528	292.594	376.528	418.594	489.056	545.188
10	297.594	325.66	423.594	465.66	550.188	606.32

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede observar en la tabla previa, si se elige la ventana de espera 1 el tiempo que demora en nodo recolector en recoger el total de la información de los nodos sensores es de aproximadamente 325.66 segundos o 5 minutos y 26 segundos. Mientras que en los casos de ventana 2 y 3 los tiempos para recolectar la información son 7 minutos con 46 segundos y 10 minutos con 7 segundos respectivamente. Por lo que, si se desea cumplir con lo requerido inicialmente, es decir que los nodos envíen su información cada 5 minutos, se debe considerar una ventana de recepción igual al tiempo en el aire y eliminar el tiempo de guarda de transmisión entre nodos. Cabe resaltar que todas estas consideraciones son para un paquete de 251 bytes de data, a menor bytes de data los tiempos se reducirían.

En comparación con las otras tecnologías mencionadas en el capítulo 2, el tiempo en el aire de LoRa es mayor debido a la relación que existe entre la tasa de transferencia de bits y el tiempo en el aire. Se puede deducir naturalmente que a mayor tasa de transmisión de bits el tiempo en el aire es menor. Por ejemplo, si tomamos el caso de la tecnología más similar a LoRa en términos de tasa de transmisión de bits, obtenemos valores de tiempo en el aire en el orden de los segundos: Sigfox, a una tasa de

transmisión de 100 bps y con un paquete de 26 bytes (tamaño total del paquete la data tiene su máximo tamaño de 12 bytes) se tiene un tiempo en el aire o duración de paquete de 2.08 segundos. A una tasa de transmisión de 600 bps el tiempo en el aire se reduce a 0.35 segundos[54].

## 4.2 Análisis del consumo energético de la red inalámbrica

Para calcular el tiempo de autonomía de la red inalámbrica de sensado se procederá con describir los estimados de consumo de corriente de cada componente del nodo sensor conectado a la batería. Se realiza en función a los nodos sensores ya que estos serán los que funcionen con baterías, mientras el nodo recolector es el equipo DLOS8 que puede ser conectado directamente a una toma de corriente mediante su transformador o puede ser alimentado por el protocolo PoE[70].

Los dos componentes que recibirán energía de la batería del nodo sensor, cómo fue graficado en el capítulo 3, son el microcontrolador Arduino UNO y el sensor CS650. El dendrómetro DC4 recibe su energización del puerto de 5V del Arduino UNO[65], así como también el reloj en tiempo real puede recibir el voltaje necesario para operar del puerto de 3.3V del Arduino UNO[63]. Los consumos de energía se pueden resumir en:

- El sensor CS650 consume 45 mA por 3 milisegundos cuando está activo si está alimentado con 12 VDC, y cuando no está activo consume 135  $\mu$ A[64]. Se harán uso de cuatro sensores CS650 por lugar, por lo que el total será de 180 mA en actividad y 0.54 mA en inactividad.
- El módulo microcontrolador Arduino UNO consume:
  - Por su microcontrolador ATmega328p, entre 1.5 mA y 9.2 mA en modo activo y entre 0.25 mA y 1.9 mA dependiendo de la frecuencia de su reloj.
  - 50 mA cómo máximo por cada puerto de poder, el módulo Arduino uno tiene 2 puertos de 5V y un puerto de 3.3V.
  - Un máximo de 20 mA por cada pin digital[61].

- Por el módulo LoRa para Arduino, que cuenta con el transceptor RFM95W, consume: 29 mA cuando está en modo de transmisión a 13 dB de potencia, de 10.8 mA a 12.1 mA cuando está en modo de recepción y un máximo de 1.5  $\mu$ A cuando está inactivo[79].

Sin embargo, en el caso del consumo por los puertos de poder, no tomaremos el máximo de 50 mA indicado, sino valores o definiciones que brindan los propios fabricantes de los dispositivos:

- En el caso del reloj en tiempo real de Adafruit, este hace uso del semiconductor de óxido metálico complementario PCF8523, que al ser energizado con un voltaje de 3V consume 100 nA[86].
- En el caso del dendrómetro DC4 de Ecomatik, el fabricante indica que el consumo de corriente es despreciable[65].

Asimismo, cómo el sensor CS650 estará conectado a dos pines digitales del Arduino para la transmisión de data, se considerará un consumo de 40 mA por sensor, 160 mA en total. Por otro lado, el reloj en tiempo real transmite su información al Arduino mediante los pines de reloj de este último, y estos no involucran consumo de corriente adicional[63]. Además, el consumo del reloj en tiempo real es constante de 0.0001 mA.

Finalmente, en la Tabla 22 se presentará el consumo de corriente de un nodo sensor para cada actividad de la comunicación con el nodo recolector, que contempla en el siguiente orden: recolección de datos de los sensores, transmisión de datos, recepción de mensaje ACK y finalmente el tiempo de inactividad hasta la siguiente transmisión considerando una periodicidad de toma de datos de 5 minutos con 29 segundos, ya que se redondeará hacia arriba los tiempos de cada etapa de una transmisión del nodo sensor.

Tabla 22: Consumo aproximado de un nodo sensor durante una comunicación.

Momento	Dispositivo	Consumo (mA)	Total (mA)	Tiempo (s)	Carga eléctrica por tiempo de actividad (mC)
Recolección de datos de sensores	Arduino UNO	9.2	349.2016	1	349.2016
	Transceptor LoRa	0.0015			
	Pines digitales del Arduino	160			
	Sensores CS650	180			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
Transmisión de datos	Arduino UNO	9.2	38.7401	15	581.1015
	Transceptor LoRa	29			
	Sensores CS650	0.54			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
Recepción de mensaje ACK	Arduino UNO	9.2	21.8401	15	327.6015
	Transceptor LoRa	12.1			
	Sensores CS650	0.54			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
Inactividad	Arduino UNO	1.9	2.4416	298	727.5968
	Transceptor LoRa	0.0015			
	Sensores CS650	0.54			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
<b>Total</b>					1985.5014

Fuente: Elaboración propia.

La tabla mostrada indica que cada 5 minutos con 29 segundos un nodo sensor consumirá 1985.5014 mili columbios. Ahora, cómo fue mencionado en la parte del diseño, existen tres opciones de batería con diferentes capacidades: de 2000, 10000 y 13000 mAh. Haciendo la conversión de mili amperios hora a mili columbios, se tienen cargas de 7200000, 36000000 y 46800000 mC respectivamente. En la Tabla 23 a continuación se presenta el tiempo de autonomía de un nodo sensor para las diferentes capacidades de batería, considerando que un nodo sensor durante 5 minutos y 29 segundos consume 1985.5014 mili columbios.

Tabla 23: Tiempo de autonomía de un nodo sensor dependiendo de la capacidad de su batería.

Capacidad de la batería (mAh)	2000	10000	13000
Tiempo de autonomía de un nodo sensor (horas)	331.4024	1657.0122	2154.1158

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede apreciar, para el primer caso el tiempo de autonomía de un nodo sensor será aproximadamente de 331.4024 horas, lo que equivale a 331 horas y 24 minutos o 13 días de funcionamiento. En el segundo caso, la duración equivale a 1657 horas y 1 minuto o 69 días de funcionamiento y finalmente el último caso la duración equivale a 2154 horas y 7 minutos o 89 días de funcionamiento.

Ahora, consideremos el caso de usar un módulo transceptor Xbee en lugar de LoRa. Los datos de consumo según el fabricante son:

- En modo de transmisión 45 mA a una potencia de 8 dBm, 33 mA a una potencia de 5 dBm.
- En modo de recepción entre 28 y 31 mA.
- Inactivo menor a 1  $\mu$ A[87].

Entonces, tendríamos una nueva Tabla 24 con el consumo para el caso de hacer uso de un módulo transceptor Zigbee considerando la potencia de transmisión de 8 dBm.

Tabla 24: Consumo aproximado de un nodo sensor usando un transceptor Zigbee para Arduino.

Momento	Dispositivo	Consumo (mA)	Total (mA)	Tiempo (s)	Carga eléctrica por tiempo de actividad (mC)
Recolección de datos de sensores	Arduino UNO	9.2	349.2011	1	349.2011
	Transceptor Zigbee	0.001			
	Pines digitales del Arduino	160			
	Sensores CS650	180			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
Transmisión de datos	Arduino UNO	9.2	54.7401	15	821.1015
	Transceptor Zigbee	45			
	Sensores CS650	0.54			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
Recepción de mensaje ACK	Arduino UNO	9.2	40.7401	15	611.1015
	Transceptor Zigbee	31			
	Sensores CS650	0.54			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
Inactividad	Arduino UNO	1.9	2.4411	298	727.4478
	Transceptor Zigbee	0.001			
	Sensores CS650	0.54			
	Reloj en tiempo real	0.0001			
<b>Total</b>					<b>2508.8519</b>

Fuente: Elaboración propia.

Cómo se puede apreciar, el consumo de carga eléctrica aumenta en 523.3505 milicolumbios cuando se hace uso de un transceptor Zigbee y no un transceptor LoRa, durante los 329 segundos de funcionamiento periódico, lo que implicaría directamente en un menor tiempo de autonomía de nodo sensor.

#### **4.3 Costo aproximado de los componentes necesarios para desplegar la red inalámbrica de sensado remoto**

De acuerdo a los componentes utilizados en el diseño de la red inalámbrica de sensado remoto, los precios del Arduino Uno, el reloj en tiempo real de Adafruit, las baterías y la caja de alojamiento fueron obtenidos de sus páginas web oficiales, referenciados en el capítulo 3 de la presente tesis.

En el caso del módulo LoRa fue obtenido del distribuidor autorizado en Chile Altronics, así como la pasarela DLOS8 de Dragino cuyo precio fue obtenido del distribuidor autorizado en Bélgica Antratek. En el caso del sensor Ecomatik DC el precio fue obtenido del distribuidor AlphaOmega Electronics de España. El precio del cable de protección de 13 metros fue obtenido en Amazon. Finalmente, el precio del sensor CS650 de Campbell fue cotizado por el distribuidor Cotecno de Chile. Es importante resaltar que el precio de la batería considerada es el de la que cuenta con 13000 mAh de capacidad, la que permite el mayor tiempo de autonomía de la red inalámbrica de sensado.

A partir de los precios y la tasa de cambio de la fecha, se presenta la Tabla 25 con los precios de los componentes necesarios para desplegar la red inalámbrica de sensado remoto.

Tabla 25: Precio de los componentes necesarios para desplegar la red inalámbrica de sensado remoto.

Precio de los componentes a la fecha 01/07/2020				
Tasa de cambio	3.5352			
Componente	Precio (\$)	Precio (S/.)	Cantidad	Total
Arduino UNO	23.00	81.31	10	813.10
Módulo LoRa 915 MHz	19.89	70.32	10	703.15
RTC Adafruit	4.95	17.50	10	174.99
Gateway DLOS8	249.95	883.62	1	883.62
Sensor CS650	780.60	2759.58	40	110383.08
Dendrómetro Ecomatik DC	432.00	1527.21	10	15272.06
Batería 13000 mAh	159.99	565.60	10	5655.97
Caja de alojamiento	9.05	31.99	10	319.94
Protección para cableado - 13 m	15.99	56.53	10	565.28
			<b>Total (S/.)</b>	<b>134771.19</b>

Fuente: Elaboración propia.

El costo total de los componentes necesarios para desplegar la red inalámbrica de sensado remoto asciende a S/. 134,771.00 nuevos soles.

## Conclusiones

- Al seguir la recomendación de la UIT para propagación en un entorno con presencia de vegetación, se pudo observar que la frecuencia influye en gran proporción en la atenuación que sufre la señal en dicho entorno. Las tecnologías inalámbricas que operan a frecuencias más bajas se vieron menos afectadas por la atenuación por la vegetación. Asimismo, las atenuaciones por precipitación y presencia de gases atmosféricos pueden ser consideradas despreciables a frecuencias menores a 1 GHz, por lo que LoRa, junto con Zigbee y Sigfox tiene ventaja sobre las demás tecnologías que funcionan a mayores frecuencias.
- La tasa de transmisión de bits en LoRa es menor que la tasa de transmisión de bits de las otras alternativas mencionadas exceptuando Sigfox. Por la misma razón, el tiempo de duración de paquete o tiempo en el aire es mayor, lo que por ende causa un tiempo de comunicación mayor entre el nodo sensor y el nodo recolector. Debido a esto, y cómo LoRa accede al medio de manera aleatoria, es conveniente que los nodos sensores transmitan en tiempos diferentes para evitar colisiones. Por otro lado, el límite de mensajes de uplink de Sigfox no permite un muestreo continuo con periodicidad de 5 minutos con 30 segundos, sino periodicidades mayores a esta.
- En cuanto al consumo energético, al hacer uso de LoRa se consume menor energía que al hacer uso de Zigbee, tomando en cuenta los componentes transceptores para Arduino; a su vez se puede asumir que son más ahorrativas que hacer uso de 5G, NB-IoT o Sigfox, que implican hacer uso de estaciones base de la red móvil o propias (caso de Sigfox). Esto se debe a que cada una de las tecnologías es adecuada para diferentes escenarios, en nuestro caso LoRa cumple con las necesidades de la red inalámbrica en el entorno del estudio más eficientemente que las otras tecnologías, en relación a costo-beneficio.

## Recomendaciones

- En caso de desplegarse la red inalámbrica diseñada en el presente trabajo, se recomienda para una mayor continuidad de sensado tener baterías adicionales a las 10 consideradas, con el fin de hacer uso de una rotación de baterías, ya que unas pueden ser usadas mientras otras se recargan.
- El uso de protección de cableado y de los dispositivos fue considerado en el diseño y análisis, y este equipamiento de protección tiene un tiempo de vida útil dependiendo del fabricante. Es recomendable que de manera periódica se realice la inspección del nodo y su equipamiento de protección, puesto que debido al entorno la caja de protección puede sufrir daños externos por presencia de fauna salvaje, o sufrir cambios de posicionamiento que afecten la transmisión.
- Para evitar entradas de agua y humedad al nodo sensor, es recomendable usar materiales plásticos livianos para sellar la caja de protección y la antena de transmisión que usa el nodo sensor. En el caso del nodo recolector, este cumple con la protección IP65 que indica que se encuentra protegido ante chorros de agua (provenientes de lluvia en nuestro escenario) y ante polvo.

## Bibliografía

- [1] FONDECYT, *Resolución de Dirección Ejecutiva N°112 - 2018*. Perú, 2018, p. 6. [Consultado: 09-jul-2019]
- [2] H. Mohebzadeh y M. Fallah, "Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology", *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, vol. 13, núm. May 2018, pp. 389–400, 2019.
- [3] Grupo Singulargreen, "Balance Hídrico de un Ecosistema Forestal", 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.urbanarbolismo.es/blog/balance-hidrico-de-un-ecosistema-forestal/>. [Consultado: 10-jul-2019].
- [4] FONDECYT, "Monitoreo de balances hídricos usando redes de sensores inalámbricos para estimaciones de productividad en bosque amazónico y cultivos leñosos perennes costeros". Lima, p. 17, 2018. [Consultado: 10-jul-2019]
- [5] A. A. Chukhlantsev, A. M. Shutko, y S. P. Golovachev, "Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies", *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 48, núm. 11, pp. 1177–1202, 2003.
- [6] S. Khairunniza-Bejo, N. H. Ramli, y F. M. Muharam, "Wireless sensor network (WSN) applications in plantation canopy areas: A review", *Asian J. Sci. Res.*, vol. 11, núm. 2, pp. 151–161, 2018.
- [7] Physics Weekly, "Reflection, Refraction and Diffraction". [En línea]. Disponible en: <https://physicsweekly.weebly.com/reflection-refraction-and-diffraction.html>. [Consultado: 10-oct-2019].
- [8] W. H. Hayt, *Teoría Electromagnética*, 7a ed. McGraw-Hill, 2006, p.406.
- [9] C. Herach, *Theory of electromagnetic wave propagation*, 1a ed. Ontario: General Publishing Company, 1988, p.15.
- [10] G. Pelosi y S. Selleri, "Energy in electromagnetism: The poynting vector", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, núm. 6, pp. 148–153, 2017.
- [11] A. G. Burr, "The multipath problem: An overview", *IEE Colloq.*, núm. 120, 1996.
- [12] H. M. Jones y K. Blackmore, "Link Ratio for Ad Hoc Networks in a Rayleigh Fading Channel", núm. May, 2014.
- [13] S. Yarkan y H. Arslan, "Identification of LOS and NLOS for Wireless Transmission", *2006 1st Int. Conf. Cogn. Radio Oriented Wirel. Networks Commun.*, 2006.
- [14] J. Arnau, I. Atzeni, y M. Kountouris, "Impact of LOS/NLOS propagation and path loss in ultra-dense cellular networks", *2016 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2016*, 2016.

- [15] Unión Internacional de Comunicaciones, “Atenuación debida a la vegetación”, *Recom. UIT-R P.833-9*, vol. 9, p. 30, 2016.
- [16] O. Montero *et al.*, “Attenuation of Radiofrequency Waves due to Vegetation in Colombia”, *Proc. 2018 8th IEEE-APS Top. Conf. Antennas Propag. Wirel. Commun. APWC 2018*, pp. 940–943, 2018.
- [17] S. Adhikari, “Characterization of propagating waves through Leafy vegetation”, *2012 Annu. IEEE India Conf. INDICON 2012*, pp. 1128–1131, 2012.
- [18] P. Horak, M. Kvicera, y P. Pechac, “Frequency dependence of attenuation due to vegetation for satellite services”, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 142–144, 2010.
- [19] R. Yoshimura *et al.*, “Effect of vegetation on radio wave propagation in 920-MHz and 2.4-GHz bands”, *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, vol. 0, pp. 38–41, 2017.
- [20] E. Lichtenberg, M. Chappell, y P. Thomas, “Costs and Benefits of Wireless Sensor Networks : How a sensor network might benefit your operation”, *Manag. Irrig. through Distrib. Networks Knowl. Cent.*, núm. 1, p. 18, 2014.
- [21] M. Zennaro, B. Pehrson, y A. Bagula, “Wireless Sensor Networks: a great opportunity for researchers in Developing Countries”, *Proc. WCITD2008*, núm. June 2016, pp. 1–7, 2008.
- [22] M. A. A. Pasha, “System-Level Synthesis of Ultra Low-Power Wireless Sensor Network Node Controllers : A Complete Design-Flow”, núm. January, 2011.
- [23] E. Coca, V. Popa, y G. Buta, “Wireless sensor network nodes performance measurements and RSSI evaluation”, *SIITME 2009 - 15th Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag.*, pp. 105–112, 2009.
- [24] J. D. Day y H. Zimmermann, “The OSI Reference Model”, *Proc. IEEE*, vol. 71, núm. 12, pp. 1334–1340, 1983.
- [25] Q. Wang y I. Balasingham, “Wireless Sensor Networks - An Introduction”, *Wirel. Sens. Networks Appl. Des.*, núm. May 2014, 2010.
- [26] M. F. Othman y K. Shazali, “Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system”, *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 1204–1210, 2012.
- [27] S. R. Jino Ramson y D. Jackuline Moni, “Applications of Wireless Sensor Networks - A survey”, *Proc. IEEE Int. Conf. Innov. Electr. Electron. Instrum. Media Technol. ICIEEIMT 2017*, vol. 2017-Janua, núm. 978, pp. 325–329, 2017.
- [28] R. K. Kodali y S. Soratkal, “Trust model for WSN”, *Proc. 2015 Int. Conf. Appl. Theor. Comput. Commun. Technol. iCATccT 2015*, pp. 903–906, 2016.
- [29] D. Sharma, S. Verma, y K. Sharma, “Network Topologies in Wireless Sensor Networks : A Review”, *Int. J. Electron. Commun. Technol.*, vol. 4, pp. 93–97, 2013.

- [30] A. Shrestha y L. Xing, "A performance comparison of different topologies for wireless sensor networks", *2007 IEEE Conf. Technol. Homel. Secur. Enhancing Crit. Infrastruct. Dependability*, pp. 280–285, 2007.
- [31] M. Ahlawat y A. Mittal, "Different Communication Protocols for Wireless Sensor Networks: A Review", *Ijarcce*, vol. 4, núm. 3, pp. 213–216, 2015.
- [32] Computer Networking Notes, "Types of Wireless Network Explained with Standards", *CCNA Study Guide*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.computernetworkingnotes.com/ccna-study-guide/types-of-wireless-network-explained-with-standards.html>. [Consultado: 11-ago-2019].
- [33] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, y R. Verdone, "An overview on wireless sensor networks technology and evolution", *Sensors*, vol. 9, núm. 9, pp. 6869–6896, 2009.
- [34] D. Pugh, "Understanding different IoT wireless networks options", *Digital Catapult*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.digicatapult.org.uk/news-and-views/blog/understanding-different-iot-wireless-networks-options/>. [Consultado: 18-ago-2019].
- [35] i-Scoop, "LPWA network technologies and standards: LPWAN wireless IoT guide", *Internet of Things guide*, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/lpwan/#LPWA\\_between\\_the\\_present\\_and\\_future](https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/lpwan/#LPWA_between_the_present_and_future). [Consultado: 20-ago-2019].
- [36] Semtech, "Why LoRa?" [En línea]. Disponible en: <https://www.semtech.com/lora/why-lora>. [Consultado: 20-ago-2019].
- [37] B. Reynders y S. Pollin, "Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication", *2016 IEEE Symp. Commun. Veh. Technol. Benelux, SCVT 2016*, núm. 2, pp. 0–4, 2016.
- [38] B. Ray, "What Is LoRa? A Technical Breakdown", *Link Labs*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora>. [Consultado: 25-may-2005].
- [39] LoRa Alliance, "A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ What is it?", 2015. [En línea]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawantm>. [Consultado: 25-may-2020].
- [40] C. El Fehri, M. Kassab, S. Abdellatif, P. Berthou, y A. Belghith, "LoRa technology MAC layer operations and Research issues", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 130, pp. 1096–1101, 2018.
- [41] Zigbee Alliance, "What is Zigbee?", *Zigbee*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://zigbee.org/solution/zigbee/>. [Consultado: 20-may-2020].
- [42] IEEE, *IEEE 802.15.4-2011 standard*, vol. 2011, núm. September. 2011.
- [43] F. Xiong, *Digital Modulation Techniques*, 2da ed. Artech House, 2006, p123, 167.

- [44] I. D. Chakeres y E. M. Belding-Royer, "AODV routing protocol implementation design", *Proc. - Int. Conf. Distrib. Comput. Syst.*, vol. 24, pp. 698–703, 2004.
- [45] L. Camacho, R. Baquerizo, J. Palomino, y M. Zarzosa, "Deployment of a Set of Camera Trap Networks for Wildlife Inventory in Western Amazon Rainforest", *IEEE Sens. J.*, vol. 17, núm. 23, pp. 8000–8007, 2017.
- [46] S. Baskaran y T. Tuithung, "Remote Monitoring and Control of Smart Distribution Grid Using Xbee Communication", *Proc. 2018 Int. Conf. Curr. Trends Towar. Converging Technol. ICCTCT 2018*, pp. 1–4, 2018.
- [47] Rajiv, "Specifications and Applications of Narrow Band IoT (NB-IoT)", *RF Page - IoT*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.rfpage.com/specifications-and-applications-of-narrow-band-iot/>. [Consultado: 11-ago-2019].
- [48] A. Díaz Zayas, P. Merino Gómez, y F. J. Rivas Tocado, "3GPP NB-IoT, tecnología y herramientas de medida", *Actas las XIII Jornadas Ing. Telemática*, núm. September, pp. 310–317, 2017.
- [49] B. Vejlgard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, y M. Sorensen, "Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT", *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2017-June, 2017.
- [50] V. Tabora, "5G Networks Can Change The Way We Live: For Better or Worse?", *Hackernoon*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hackernoon.com/5g-networks-can-change-the-way-we-live-for-better-or-worse-ed2b3fc6b0e6>. [Consultado: 09-ago-2019].
- [51] Ericsson, "Sensors Network", *5G*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ericsson.com/en/5g/use-cases/sensors-measurement-and-report>. [Consultado: 15-ago-2019].
- [52] A. S. Alkalbani y T. Mantoro, "Security comparison between dynamic & static WSN for 5g networks", *Proc. 2nd Int. Conf. Informatics Comput. ICIC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–4, 2018.
- [53] V. W. M. ; I. ; H. ; M. S. Arifianto, "Wireless Sensor Network on 5G Network", *Br. J. Psychiatry*, vol. 111, núm. 479, pp. 1009–1010, 1965.
- [54] Sigfox, "Sigfox Technical Overview", vol. 1, núm. May, p. 26, 2017.
- [55] A. Liaut, "Sigfox connected objects: Radio specifications February 2020", núm. February, 2020.
- [56] S. Patil, B. Vidhate, y S. Somani, "LoRa: An Emerging Star in IoT", *Proc. 2nd Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst. ICICCS 2018*, núm. Iccics, pp. 1769–1774, 2019.
- [57] A. Zourmand, A. L. Kun Hing, C. Wai Hung, y M. AbdulRehman, "Internet of Things (IoT) using LoRa technology", *2019 IEEE Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst.*, núm. June, pp. 324–330, 2019.

- [58] M. Turmudzi, A. Rakhmatsyah, y A. A. Wardana, "Analysis of Spreading Factor Variations on LoRa in Rural Areas", *Proceeding - 2019 Int. Conf. ICT Smart Soc. Innov. Transform. Towar. Smart Reg. ICISS 2019*, pp. 26–29, 2019.
- [59] C. Ambika bhuvaneshwari y M. Muthumari, "Design and realization of radio communication using LoRa & XBee module for an e-Bike", *2018 IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Comput. Res.*, pp. 1–4, 2019.
- [60] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, *Plan nacional de atribución de frecuencias (PNAF)*. 2008, p. 36.
- [61] Arduino, "Arduino UNO Rev3", *Arduino Boards*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. [Consultado: 08-jun-2020].
- [62] Dragino Technology, "LoRa Shield", *Dragino Wiki*, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora\\_Shield](https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield). [Consultado: 10-jun-2020].
- [63] Adafruit Industries, "Adafruit PCF8523 Real Time Clock", *Adafruit Learning System*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-pcf8523-real-time-clock.pdf?timestamp=1592324687>. [Consultado: 11-jun-2020].
- [64] Campbell Scientific, "CS650 Soil Water Content Reflectometer", 2019. [En línea]. Disponible en: [https://s.campbellsci.com/documents/eu/product-brochures/b\\_cs650.pdf](https://s.campbellsci.com/documents/eu/product-brochures/b_cs650.pdf). [Consultado: 09-jun-2020].
- [65] Ecomatik, "Circumference Dendrometer (Type DC4)", 2016. [En línea]. Disponible en: [http://ru.ictinternational.com/content/uploads/2020/02/Usermanual\\_DC4.pdf](http://ru.ictinternational.com/content/uploads/2020/02/Usermanual_DC4.pdf). [Consultado: 15-jun-2020].
- [66] Tenergy Power, "Tenergy NiMH 12V 2000mAh Battery Pack", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://power.tenergy.com/tenergy-nimh-12v-2000mah-battery-pack-w-bare-leads/>. [Consultado: 15-jun-2020].
- [67] Tenergy Power, "Tenergy NiMH 12V 10000mAh Battery Pack", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://power.tenergy.com/at-tenergy-12v-10000mah-nimh-rechargeable-battery-pack-10s1p-120-0wh-10a-rate-standard-mini-tamiya-connectors/>.
- [68] Tenergy Power, "Tenergy NiMH 12V 13000mAh Battery Pack", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://power.tenergy.com/at-tenergy-12v-13000mah-nimh-rechargeable-battery-pack-10s1p-156-0wh-13a-rate-2-sets-bare-leads/>.
- [69] SERNANP, "Reserva Nacional Tambopata", *Nuestras Áreas Naturales Protegidas*, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.sernanp.gob.pe/tambopata>. [Consultado: 10-jun-2020].
- [70] Dragino Technology, "Outdoor LoRaWAN Gateway DLOS8", *LoRaWAN Gateway*, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa\\_Gateway/DLOS8/DLOS8\\_LoRaWAN\\_Gateway\\_User\\_Manual\\_v1.0.pdf](https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa_Gateway/DLOS8/DLOS8_LoRaWAN_Gateway_User_Manual_v1.0.pdf). [Consultado: 05-jun-2020].

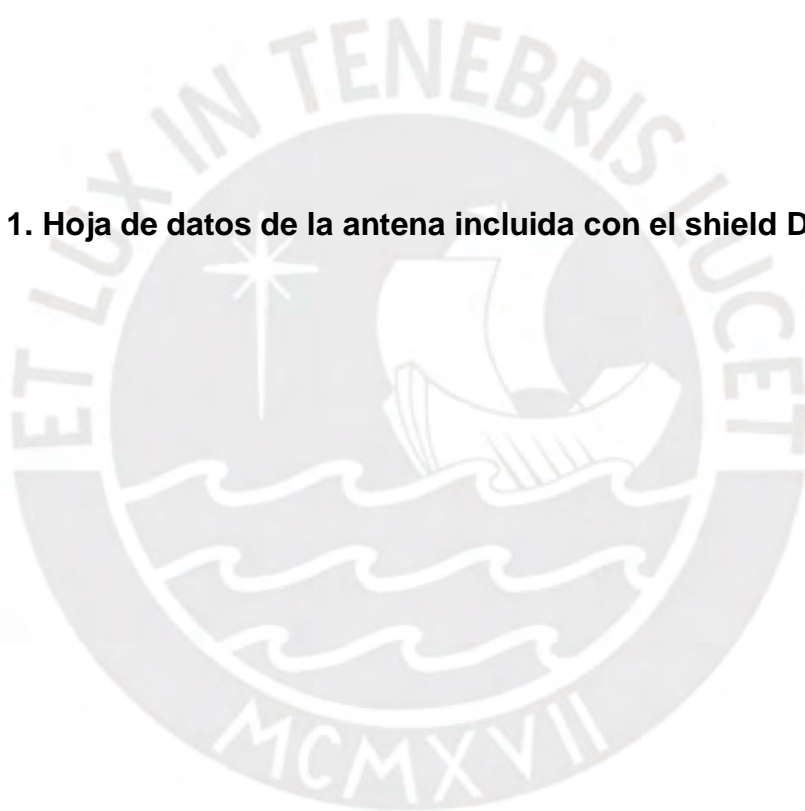
- [71] Pinanson, “IP65”, *Glossary*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://pinanson.eu/glossary/ip65ip65/>. [Consultado: 25-jun-2020].
- [72] A. Brack y C. Mendiola, “Ecosistemas Boscosos en la Selva Baja”, *Enciclopedia “Ecología del Perú”*, 2004. [En línea]. Disponible en: [https://www.peruecologico.com.pe/lib\\_c13\\_t02.htm](https://www.peruecologico.com.pe/lib_c13_t02.htm). [Consultado: 10-jun-2020].
- [73] Weather Spark, “El clima promedio en Tambopata”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/27090/Clima-promedio-en-Tambopata-Perú-durante-todo-el-año#Sections-Humidity>. [Consultado: 12-jun-2020].
- [74] RS Components, “RS PRO Grey Plastic Push Button Enclosure”, *Push Button & Control Station Enclosures*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://uk.rs-online.com/web/p/push-button-control-station-enclosures/1828658/>. [Consultado: 15-jun-2020].
- [75] Unión Internacional de Comunicaciones, “Atenuación debida a los gases atmosféricos”, *Recom. UIT-R P.676-5*, vol. 10, p. 21, 2001.
- [76] Unión Internacional de Comunicaciones, “Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción”, *Recom. UIT-R P.838-3*, pp. 1–8, 1992.
- [77] E. Crow y M. Miles, *Confidence Limits for Digital Error Rates Form Dependent Transmissions*, 1a ed. Minnesota: University of Minnesota, 1977, p. 189.
- [78] C. Wolf, “Free-Space Path Loss (FSPL)”, *Basics*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Free-Space Path Loss.en.html#this>. [Consultado: 05-jul-2020].
- [79] Hope Microelectronics, “RFM95W/96W/98W v2.0”, *Datasheets*. pp. 1–123, 2018.
- [80] P. Valera, “La telefonía celular en el Perú: el espectro con las operadoras nuevas”, *Blog de Pedro*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/pedro/2014/10/25/la-telefon-a-celular-en-el-per-el-espectro-con-las-operadoras-nuevas/>. [Consultado: 10-jul-2020].
- [81] Optical Networks, “Todo lo que debes saber sobre la red 5G”, *Innovación*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.optical.pe/todo-lo-que-debes-saber-sobre-la-red-5g/>. [Consultado: 10-jul-2020].
- [82] T. Polonelli, D. Brunelli, A. Marzocchi, y L. Benini, “Slotted ALOHA on LoRaWAN-design, analysis, and deployment”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, núm. 4, 2019.
- [83] J. Matondang, “Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate and Bit Rate in LoRa (English)”, *My thoughts and projects*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://josefmd.com/2018/08/14/spreading-factor-bandwidth-coding-rate-and-bit-rate-in-lora-english/>. [Consultado: 10-jul-2020].
- [84] J. M. Moreno y D. R. Fernández, “Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)”, *AE/2007/078 General. Valencia.*, núm. Zigbee, pp. 1–36, 2007.

- [85] M. McCauley, "RH\_RF95 Class Reference", *RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors*, 2014. [En línea]. Disponible en: [https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/classRH\\_\\_RF95.html](https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/classRH__RF95.html). [Consultado: 05-jul-2020].
- [86] NXP, "PCF8523 Real-Time Clock (RTC) and calendar", *Datasheets*. pp. 1–67, 2010.
- [87] Digi International, "XBee®/XBee-PROS2CZigbee RF Module Datasheet". pp. 1–324, 2020.





**Anexo 1. Hoja de datos de la antena incluida con el shield Dragino**





**ONE PLUS ONE**  
Wireless Communication

## APPROVAL SHEET

### External antenna

OnePlusOne :

Project:	External antenna		
RF Check		QC Check	
ME Check		Confirm By	

Customer: Dragino Technology

Project:	External antenna		
EE Check		QC Check	
PM Check		Confirm By	

Date:	Revision:	Updates and changes:	Issued by:
2016-11-2	A	Initial sheet	Dabin.Zhu

Project: External antenna	Author:	File Name:
Date: 2016-11-2	Dabin.Zhu	External antenna_APP_A.doc
Revision:	A	
<b>CONFIDENTIAL</b>		
Shenzhen OnePlusOne Wireless Communication Technology Co.,Ltd.		

## Contents

1.1 Part number .....	1-3
1.2 Antenna pictures .....	1-3
2.1 Specification .....	2-3
2.2 Measurement Set-up.....	2-3
2.2.1 VSWR and Return Loss .....	2-3
2.2.2 Efficiency and Gain.....	2-3
<b>3 Reference measurement data</b>	
3.1 Passive - External antenna.....	3-4
3.2 Matching Circuit description	

Project: External antenna	Author: Dabin,Zhu	File Name: External antenna_APP_A.doc
Date: 2016-11-2		
Revision:	A	
<b>CONFIDENTIAL</b>		
Shenzhen OnePlusOne Wireless Communication Technology Co.,Ltd.		

# 1 Antenna description

It summarize External antenna antenna for project External antenna-R/L. External antenna antenna's frequency band is 868-915MHz. External antenna antenna's type is Monopole.

## 1.1 Part number

Part number of antenna: External antenna-R/External antenna-L

## 1.2 Antenna pictures



# 2 Electrical Performance

## 2.1 Specification

External antenna	
Frequency Range	868MHz~930MHz
Return Loss	<-5
Efficiency	>35%

## 2.2 Measurement Set-up

### 2.2.1 VSWR and Return Loss

VSWR measurements ( $S_{11}$ ) were performed using an Agilent ENA series Network Analyzer and the previously described test fixture. Coaxial chokes were used to mitigate surface currents on the outside of the cabling. The testing was performed in free space.

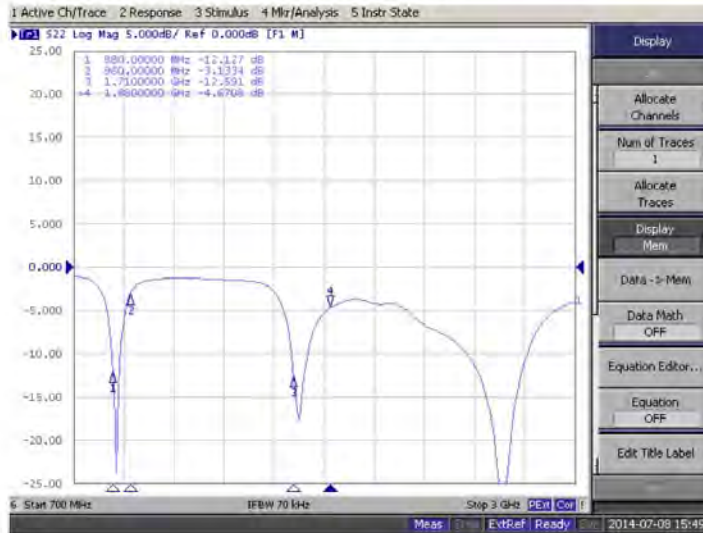
### 2.2.2 Efficiency and Gain

The gain of the antenna was measured in OPO's 3D anechoic chamber in Shenzhen, China. The chamber is a ETS system capable of doing tests from 380MHz to 6GHz. Coaxial chokes on the feed cable were used to mitigate surface currents during passive tests. The measurement results are calibrated using dipole standards. For TRP and TIS the chamber uses a 8960 / MT8820C to establish the connection with the mobile device and read the power.

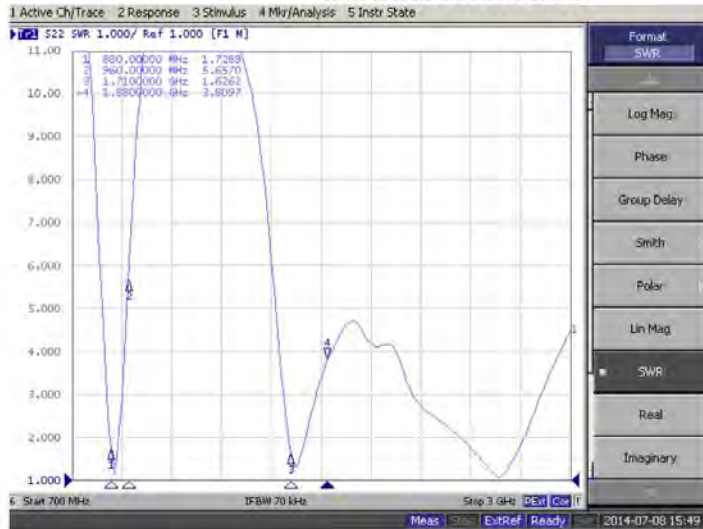
Project: External antenna	Author: Dabin,Zhu	File Name: External antenna_APP_A.doc
Date: 2016-11-2		
Revision:	A	
<b>CONFIDENTIAL</b>		
Shenzhen OnePlusOne Wireless Communication Technology Co.,Ltd.		

### 3 Reference measurement data

#### 3.1 Passive - External antenna



#### External antenna-RL



#### External antenna-VSWR

Project: External antenna	Author: Dabin.Zhu	File Name: External antenna_APP_A.doc
Date: 2016-11-2		
Revision: A		
<b>CONFIDENTIAL</b>		
Shenzhen OnePlusOne Wireless Communication Technology Co.,Ltd.		

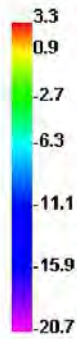
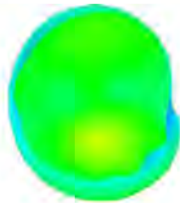
### 3.2 Matching Circuit description

### 3.3 Passive-EFF

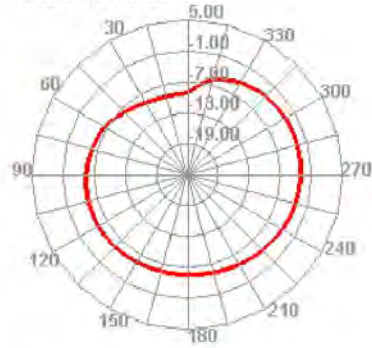
Freq (MHz)	Effi (%)	Gain (dBi)
868	51.76	3.43
904	50.42	3.35
918	49.68	3.18
922.5	49.64	2.69

### 3.4 Radiated pattern

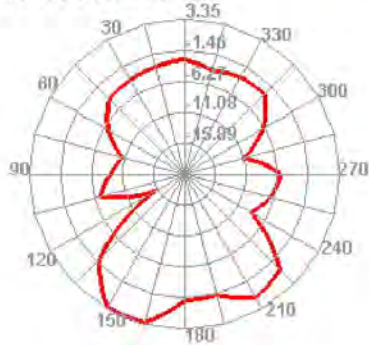
904.000MHz



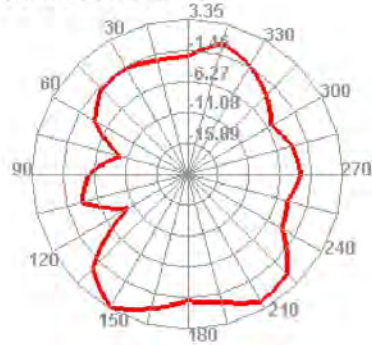
904.000MHz H



904.000MHz E1

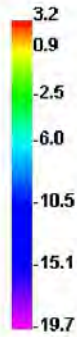
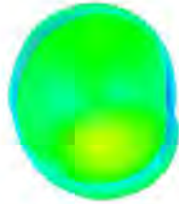


904.000MHz E2

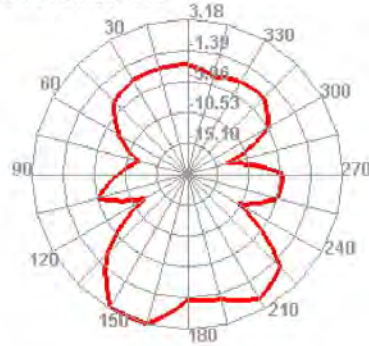


Project: External antenna	Author: Dabin.Zhu	File Name: External antenna_APP_A.doc
Date: 2016-11-2		
Revision:	A	
<b>CONFIDENTIAL</b>		
Shenzhen OnePlusOne Wireless Communication Technology Co.,Ltd.		

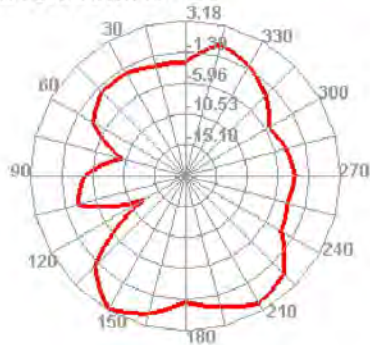
918.000MHz



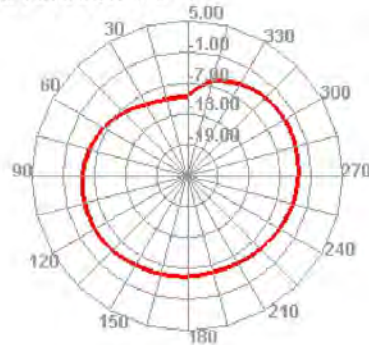
918.000MHz E1



918.000MHz E2

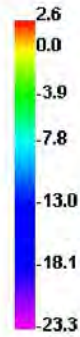
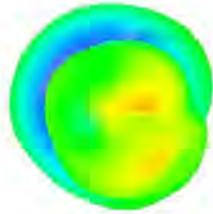


918.000MHz H

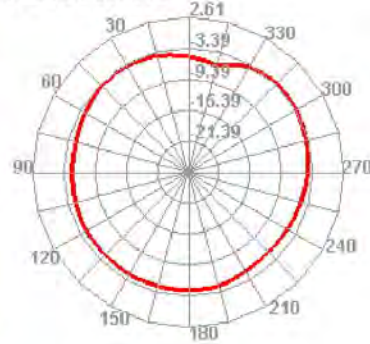


Project: External antenna	Author: Dabin.Zhu	File Name: External antenna_APP_A.doc
Date: 2016-11-2		
Revision:	A	
<b>CONFIDENTIAL</b>		
Shenzhen OnePlusOne Wireless Communication Technology Co.,Ltd.		

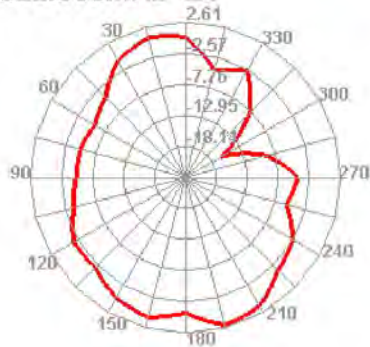
922.500MHz



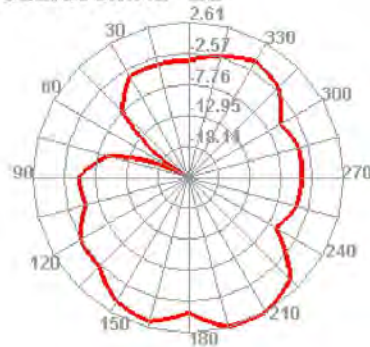
922.500MHz H



922.500MHz E1



922.500MHz E2



Project: External antenna	Author: Dabin.Zhu	File Name: External antenna_APP_A.doc
Date: 2016-11-2		
Revision:	A	
<b>CONFIDENTIAL</b>		
Shenzhen OnePlusOne Wireless Communication Technology Co.,Ltd.		