

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Exploración del canal de radio inalámbrico a través
de la tecnología LoRa

Autor: Álvaro Beltrán Florido

Tutor: Juan Antonio Becerra González

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las tecnologías de Telecomunicación

Exploración del canal de radio inalámbrico a través de la tecnología LoRa

Autor:

Álvaro Beltrán Florido

Tutor:

Juan Antonio Becerra González

Profesor Titular de Universidad

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Exploración del canal de radio inalámbrico a través de la tecnología LoRa

Autor: Álvaro Beltrán Florido

Tutor: Juan Antonio Becerra González

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Lo hallado en estas páginas es el final de años de trabajo y sacrificio en los cuales he dedicado mi íntegra dedicación a lograr este objetivo. Es por ello por lo que, me gustaría agradecer a todo aquel que me ha aportado “grano a grano” los conocimientos que me han hecho llegar a este momento.

No obstante, me gustaría remarcar algunas figuras importantes.

A mí tutor, que me ha ofrecido su consejo, compartido su saber y ha hecho posible en muchos aspectos este trabajo.

A mí familia, que me ha apoyado, y, sobre todo, acompañado en este proceso.

A mí hermano, que siempre ha sido mi inspiración.

A Marta, que siempre ha confiado en mí.

Álvaro Beltrán Florido

Sevilla, 2023

Resumen

La conectividad inalámbrica ha transformado nuestras vidas y la forma de realizar cualquier tarea. La tecnología de comunicaciones inalámbrica de LoRa ha destacado entre sus competidoras tratando de revolucionar el sector por sus características diferenciales.

Este trabajo se basa en explorar el alcance de LoRa en entornos urbanos mediante la realización de mapas de cobertura en la ciudad de Madrid. Los objetivos son comprender el funcionamiento de los principales parámetros de esta tecnología además de estudiar la forma en la que afectan factores externos como las interferencias y los obstáculos. También, se realiza un estudio del sistema GPS que se integra con el módulo LoRa para obtener la posición además de los parámetros de la interfaz radio.

Tras realizarse las pruebas experimentales, los resultados obtenidos demuestran que existe una serie de limitaciones que pueden haber influido en los valores y que podrían ser propuestas para próximas investigaciones.

Abstract

Wireless connectivity has transformed our lives and the way we perform any task. LoRa's wireless communications technology has stood out among its competitors, trying to revolutionise the sector due to its differential characteristics.

This work is based on exploring the reach of LoRa in urban environments through coverage mapping in the city of Madrid. The objectives are to understand the operation of the main parameters of this technology as well as to study the way in which external factors such as interference and obstacles affect it. Also, a study of the GPS system that is integrated with the LoRa module to obtain the position as well as the parameters of the radio interface is carried out.

After the experimental tests, the results obtained show that there are a series of limitations that may have influenced the values and that could be proposed for future research.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos del trabajo</i>	1
1.2 <i>Estructura de la memoria</i>	2
2 Introducción teórica LoRa y GPS	3
2.1 <i>Long Range (LoRa)</i>	3
2.1.1 <i>Introducción</i>	3
2.1.2 <i>Parámetros y conceptos fundamentales</i>	4
2.1.3 <i>Ventajas y desafíos de la tecnología LoRa</i>	7
2.1.4 <i>LoRaWAN y arquitectura de red</i>	8
2.1.5 <i>Comparativa con otras tecnologías inalámbricas</i>	11
2.1.6 <i>Aplicaciones y casos de uso tecnología LoRa</i>	12
2.2 <i>Global Positioning System (GPS)</i>	12
2.2.1 <i>Introducción</i>	12
2.2.2 <i>Funcionamiento del sistema GPS</i>	13
2.2.3 <i>Satélites GPS</i>	14
2.2.4 <i>Protocolo NMEA</i>	15
2.2.5 <i>Ventajas y desafíos del GPS</i>	16
2.2.6 <i>Aplicaciones</i>	17
3 Diseño experimental	19
3.1 <i>Material empleado</i>	19
3.1.1 <i>Equipamiento</i>	19
3.1.2 <i>Programas utilizados</i>	21
3.2 <i>Metodología</i>	26
3.2.1 <i>Prueba módulo GPS</i>	26
3.2.2 <i>Mapas de cobertura con tecnología LoRa</i>	27
4 Resultados	31
4.1 <i>Pruebas módulo GPS</i>	31
4.2 <i>Mapas de cobertura con tecnología LoRa</i>	36
4.2.1 <i>Mapas</i>	36
4.2.2 <i>Relación entre distancia y RSSI</i>	49
4.2.3 <i>Interpretación de los resultados</i>	56
5 Conclusión	63
5.1 <i>Líneas futuras</i>	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Relación entre SF, SNR, Sensibilidad del receptor y Rango.	5
Tabla 2–2. Valores de la tasa de datos dependiendo del factor de esparcimiento y el ancho de banda [8].	7
Tabla 2–3. Comparativa del rango y potencia transmitida entre diferentes tecnologías inalámbricas [7].	11
Tabla 3–1. Configuraciones de los parámetros para la realización de los mapas de cobertura.	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Representación de pulsos de <i>chirp</i> ascendente y descendente [7].	4
Figura 2-2. Tabla con las frecuencias y otros parámetros permitidos dependiendo de cada región [1].	6
Figura 2-3. Tabla con la atenuación típica de algunos materiales [9].	8
Figura 2-4. Torre de protocolo de LoRa [10].	9
Figura 2-5. Arquitectura de la red LoRaWAN [11].	10
Figura 2-6. Comparativa entre rango y ancho de banda de LoRa respecto otras tecnologías similares [1].	11
Figura 2-7. Representación del funcionamiento del sistema GPS [12].	13
Figura 2-8. Representación de las órbitas formadas por los satélites GPS [13].	14
Figura 2-9. Ejemplo de mensaje GPRMC.	15
Figura 2-10. Ejemplo de mensaje GPGGA.	15
Figura 2-11. Ejemplo de mensaje GPGSA.	15
Figura 2-12. Ejemplo de mensaje GPGSV.	16
Figura 3-1. Equipo transmisor y equipo receptor.	19
Figura 3-2. Uso de la banda de frecuencia de los 900MHz en España [25].	20
Figura 3-3. Módulo GPS NEO-6M-0-001 [26].	21
Figura 3-4. Configuración programa BOSSA.	24
Figura 3-5. Configuración programa CoolTerm.	25
Figura 3-6. Posición de la antena con el módulo GPS NEO-6M-0-001.	26
Figura 3-7. Recorrido para la realización de los mapas.	28
Figura 3-8. Ejemplo de la información obtenida en el programa CoolTerm.	29
Figura 3-9. Ejemplo de las tablas obtenidas con la latitud, longitud y RSSI.	29
Figura 4-1. Captura del programa MiniGPS justo al iniciarse la prueba.	32
Figura 4-2. Captura del programa MiniGPS a los 5 minutos de prueba.	33
Figura 4-3. Captura del programa MiniGPS a los 12 minutos de prueba.	34
Figura 4-4. Captura del programa MiniGPS a los 15 minutos de prueba.	35
Figura 4-5. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.	36
Figura 4-6. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.	37
Figura 4-7. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.	38
Figura 4-8. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	39
Figura 4-9. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	40
Figura 4-10. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	41
Figura 4-11. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.	42
Figura 4-12. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.	43
Figura 4-13. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.	44

Figura 4-14. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	45
Figura 4-15. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	46
Figura 4-16. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	47
Figura 4-17. Imagen de la calle en la cual se obtiene el mayor número de comunicaciones.	48
Figura 4-18. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.	49
Figura 4-19. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.	50
Figura 4-20. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.	50
Figura 4-21. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	51
Figura 4-22. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	51
Figura 4-23. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	52
Figura 4-24. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.	52
Figura 4-25. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.	53
Figura 4-26. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.	53
Figura 4-27. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	54
Figura 4-28. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	54
Figura 4-29. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.	55
Figura 4-30. Representación de la envolvente en relación entre la distancia y RSSI [4].	56
Figura 4-31. Comparativa entre SF=7, figura 4-8 (izquierda) y SF=12, figura 4-14 (derecha).	57
Figura 4-32. Comparativa entre SF=7, figura 4-20 (izquierda) y SF=12, figura 4-26 (derecha).	57
Figura 4-33. Comparativa entre SF=7, figura 4-10 (izquierda) y SF=12, figura 4-16 (derecha).	58
Figura 4-34. Comparativa entre SF=7, figura 4-22 (izquierda) y SF=12, figura 4-28 (derecha).	59
Figura 4-35. Comparativa entre P_{TX} =3 dBm, figura 4-12 (izq) y P_{TX} =18,5 dBm, figura 4-15 (der).	60
Figura 4-36. Comparativa entre P_{TX} =3 dBm, figura 4-24 (izq) y P_{TX} =18,5 dBm, figura 4-27 (der).	60

LoRa	<i>Long Range</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
R_c	Tasa de chip
BW	Ancho de banda
R_s	Tasa de símbolo
SF	<i>Spreading factor</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
P_{TX}	Potencia transmitida
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Networks</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>

1 INTRODUCCIÓN

La ciencia siempre vale la pena, porque sus descubrimientos, tarde o temprano, siempre se aplican.

- Severo Ochoa -

En la actualidad, la conectividad inalámbrica ha cambiado por completo la forma en la cual las personas interactúan con el mundo que los rodea. En una era de comunicación y conexión constante, las tecnologías inalámbricas adquieren una relevancia fundamental en las interconexiones entre dispositivos.

La tecnología inalámbrica LoRa aparece como una innovación respecto de las tecnologías ya existentes, con el propósito de conseguir comunicaciones más avanzadas y eficientes, tratando de revolucionar el panorama de las comunicaciones inalámbricas.

Dicha tecnología ha generado una gran expectación en el mundo de las telecomunicaciones por sus aplicaciones de internet de las cosas, IoT (del inglés, *Internet of things*), aportando soluciones y alternativas, principalmente en conexiones donde se necesita largo alcance y bajo consumo energético. Sus características muestran gran utilidad para multitud de posibles aplicaciones, desde fines agrícolas o industriales hasta el sector de la salud.

En este primer capítulo se definirán los objetivos y alcances que se buscan en este trabajo, además de realizar una breve explicación sobre de la estructura de este mismo.

1.1 Objetivos del trabajo

Con la realización de este trabajo se pretende estudiar el alcance de la tecnología LoRa en entornos urbanos, a través de la elaboración de mapas de cobertura. Este objetivo se trata de llevar a cabo mediante la confección de diferentes mapas, buscando observar el efecto, en términos de cobertura y alcance, de los principales parámetros que intervienen en esta tecnología. La parte experimental se diseña con la finalidad de divisar el funcionamiento real de una conexión LoRa en un entorno desfavorable con la existencia de interferencias, obstáculos y reflexiones que afecten al enlace.

En adición al estudio principal de cobertura con tecnología LoRa, se realizará una investigación sobre el funcionamiento de los sistemas de posicionamiento GPS, llevándose a cabo una prueba experimental que será necesaria para entender más en detalle los resultados finales obtenidos.

1.2 Estructura de la memoria

Al comienzo de esta memoria se pueden encontrar tres diferentes índices de contenido, tablas y figuras, además de un apartado con notaciones específicas utilizadas a lo largo del trabajo.

A continuación, aparecen 5 bloques principales en los cuales se divide esta memoria.

En primer lugar, se observa el bloque de introducción en el cual se encuentra este apartado, donde se realiza una breve explicación del trabajo y la memoria, además de marcarse unos objetivos.

Seguidamente, se encuentra el segundo capítulo con la introducción teórica a la tecnología LoRa y GPS. En este epígrafe se explica de forma más detallada ambas tecnologías, sus principales parámetros y características que serán necesarias para realizar los experimentos y analizar los resultados.

En el tercer capítulo, se van a conocer todos los equipos y programas utilizados en las pruebas. Además, se explican de forma precisa y detallada los procedimientos empleados en la realización de los experimentos. En adición, se pueden encontrar los códigos elaborados y las configuraciones de parámetros usados para llevar a cabo los mapas de cobertura.

En el cuarto capítulo, se exponen los resultados de los dos experimentos realizados, mostrando en detalle los datos obtenidos. Asimismo, haciendo uso de los conocimientos teóricos adquiridos en el segundo apartado, se trata de esclarecer y explicar los resultados obtenidos.

En el quinto capítulo, se realiza una conclusión donde se exponen los objetivos fijados inicialmente para este trabajo y los resultados obtenidos en la práctica. De esta forma, se pretende confrontar y analizar si se cumple el alcance deseado en este proyecto.

Finalmente, se pueden encontrar las referencias bibliográficas utilizadas para la elaboración de esta memoria.

2 INTRODUCCIÓN TEÓRICA LoRa Y GPS

What we know is a drop, what we don't know is an ocean.

Lo que conocemos es una gota, lo que no conocemos es un océano.

- Isaac Newton -

A continuación, se procederá a realizar un desarrollo teórico de las dos principales tecnologías implicadas en este trabajo, LoRa y GPS. El objetivo de este capítulo es entender el funcionamiento y los principales parámetros de ambas tecnologías. Una vez adquiridos estos conocimientos se podrá dar paso a la realización de una serie de pruebas y al posterior análisis de los resultados obtenidos, basados siempre en la teoría vista en este apartado.

2.1 Long Range (LoRa)

2.1.1 Introducción

La historia de LoRa comienza en Francia en el año 2009, cuando Nicolas Sornin y Oliver Seller deciden desarrollar una nueva tecnología de modulación de baja potencia y largo alcance. Tras un año de investigación, en 2010 se une al equipo François Sforza y los tres integrantes deciden fundar la empresa Cycleo.

En sus inicios, la idea de los desarrolladores era realizar una nueva tecnología orientada al mundo de la industria y la medición de valores como gas o agua. En 2012, la compañía Semtech decide adquirir Cycleo convencida del potencial de las tecnologías de largo alcance y baja potencia, visualizando los múltiples usos y aplicaciones posibles. Gracias a esta compra se mejora la tecnología, finalizan el desarrollo de *chips* y *gateways* necesarios, además de crear el protocolo de red conocido inicialmente como LoRaMAC.

Finalmente, en el año 2015 se funda la asociación sin ánimo de lucro LoRa Alliance cuyo objetivo es el desarrollo y expansión de la tecnología LoRa, asentándose como uno de los pilares fundamentales de la implementación de IoT. Además, se decide renombrar el protocolo de red y crear un estándar llamado LoRaWAN.

Hoy en día, esta alianza sigue trabajando en mejorar la tecnología, buscando nuevas aplicaciones de uso y tratando de que LoRa llegue a todo el mundo.

2.1.2 Parámetros y conceptos fundamentales

2.1.2.1 Modulación LoRa

La mayoría de las tecnologías inalámbricas usan la modulación *Phase Shift Keying*, PSK, debido a que una de las principales cualidades de esta modulación es su bajo consumo siendo muy eficiente energéticamente. La tecnología LoRa aporta una gran innovación en este aspecto, ya que utiliza una modulación de espectro ensanchado basada en *Chirp Spread Spectrum*, CSS. Este método se basa en el empleo de pulsos de *chirps* mediante los cuales la frecuencia de la portadora cambia de forma gradual ascendiendo o descendiendo. Así, el espectro ocupa un mayor ancho de banda consiguiendo que la modulación sea muy resistente al ruido del canal y al desvanecimiento, aunque se utilicen potencias bajas. De esta manera, se logra que la modulación sea robusta en cuanto a interferencias, permitiendo comunicaciones a largas distancias y siendo muy eficiente energéticamente.

Este tipo de modulaciones se han usado desde hace tiempo en comunicaciones militares y espaciales, pero LoRa es la primera implementación de uso comercial que utiliza esta técnica.

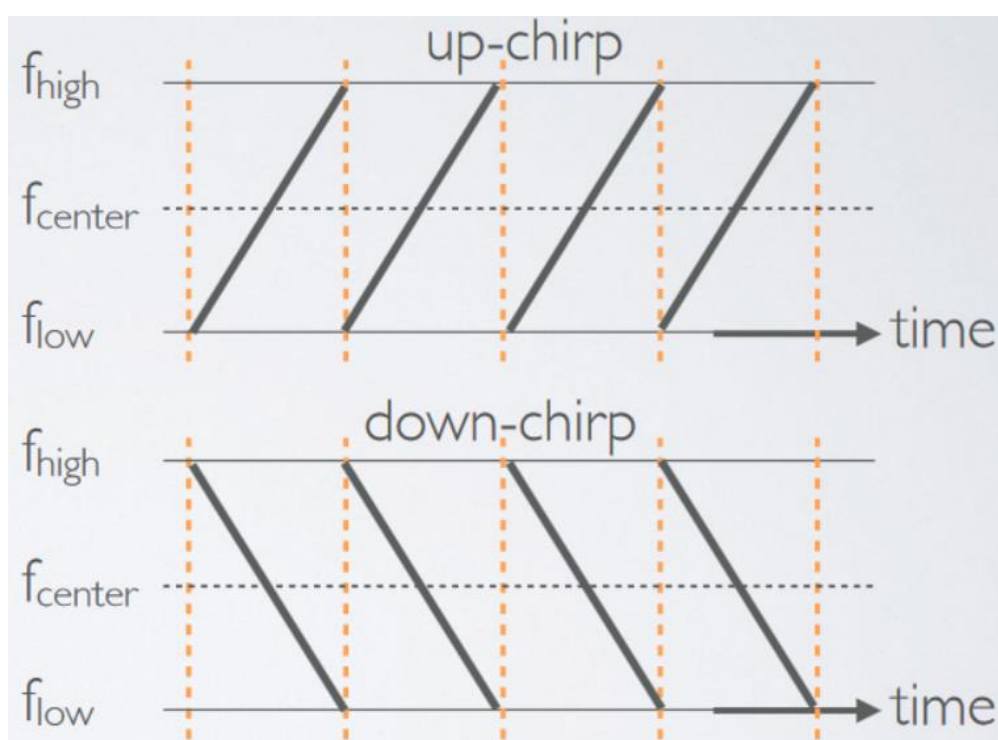


Figura 2-1. Representación de pulsos de *chirp* ascendente y descendente [7].

Cada pulso de *chirp* se descompone en *chips*, que son las unidades fundamentales de información. Estos *chips* se corresponden con los símbolos que aparecen en la palabra de código, la cual está vinculada a la secuencia binaria para expandir el espectro. La tasa de *chip*, R_c , se define como el número de oscilaciones por segundo de la señal de código, y tiene una estrecha relación con el ancho de banda [8]:

$$BW = R_c \quad (2-1)$$

Donde BW es el ancho de banda.

2.1.2.2 Spreading factor

La modulación de espectro ensanchado CSS utiliza un factor de esparcimiento, SF, para difundir la información. El *spreading factor* representa el parámetro de propagación del *chirp*, que define cuántos *chirps* se envían por segundo. Hay 6 posibles valores de *spreading factor* que varían desde el SF7 al SF12. El factor de esparcimiento afecta tanto al tiempo en el aire del símbolo como a la sensibilidad del receptor.

Cuando se aumenta el *spreading factor*, siendo SF12 el valor máximo, también crece el tiempo en el aire del símbolo, así como el consumo energético. De esta forma, los mensajes se esparcen más en el tiempo, lo que provoca que la comunicación sea más lenta al reducirse la velocidad de transferencia. Sin embargo, al aumentar el *spreading factor* la inmunidad de los mensajes al ruido será mayor y aumentará la sensibilidad en el receptor, por lo cual se consiguen comunicaciones a mayor distancia.

Para la tecnología LoRa, un *chirp* se fragmenta en 2^{SF} pasos o *chips*. Por otro lado, la tasa de símbolo, R_s , es la velocidad a la cual se transmite la información y se vincula con la tasa de *chip* a través del *spreading factor*. El factor de esparcimiento determina la cantidad de *bits* empleados para codificar un símbolo [8]:

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

Como se ha comentado anteriormente, el factor de esparcimiento determina también la relación señal-ruido, SNR, afectando a la sensibilidad del receptor como se puede apreciar en la siguiente ecuación [9]:

$$S = -174 + 10\log_{10}(BW) + NF + SNR \quad (2-3)$$

Siendo S la sensibilidad del receptor, NF la figura de ruido del receptor y SNR la relación señal a ruido.

En la siguiente tabla se puede apreciar cómo afectan los diferentes valores posibles de *spreading factor* a la relación señal-ruido, sensibilidad en el receptor y rango. Par la realización de esta tabla se ha supuesto que el ancho de banda es de 125 KHz, NF es igual a 6 dB y la comunicación se realiza en un entorno rural libre de obstáculos.

<i>Spreading factor</i>	SNR	Sensibilidad del receptor	Rango
7	-7,5 dB	-123 dBm	2 Km
8	-10 dB	-126 dBm	4 Km
9	-12,5 dB	-129 dBm	6 Km
10	-15 dB	-132 dBm	8 Km
11	-17,5 dB	-133 dBm	10 Km
12	-20 dB	-136 dBm	12+ Km

Tabla 2–1. Relación entre SF, SNR, Sensibilidad del receptor y Rango.

Los valores mostrados en la tabla anterior son orientativos, pudiendo fluctuar dependiendo de las condiciones de la comunicación. En el caso del rango, los valores con *spreading factor* máximo pueden llegar a alcanzar los 20 Km en condiciones óptimas. Sin embargo, si el entorno es urbano la comunicación más lejana no superaría los 5 Km de rango utilizando el SF12 [7].

2.1.2.3 Frecuencia y ancho de banda

En cuanto a las frecuencias, LoRa trabaja en las bandas de radio industriales, científicas y médicas, conocida como las bandas ISM (del inglés. *Industrial Scientific and Medical*). Estas frecuencias son libres y no tienen licencia, pudiéndose operar a frecuencias por debajo de 1 GHz como 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. Dependiendo de la zona del mundo en la que se encuentre la comunicación sólo se podrá operar en una determinada banda estando otras frecuencias restringidas para su uso, en Europa la banda destinada a estas comunicaciones es 868 MHz, mientras que en Estados Unidos y otros países se opera a 915 MHz.

Adicionalmente, cada región implementa un cuadro de frecuencia de sub-banda para generar canales de transmisión. A su vez, cada sub-banda se compone de una serie de frecuencias llamadas canales. La utilización de sub-bandas es vital para segregar redes dentro de una misma zona mediante el uso de diferentes frecuencias. También se determina la cantidad de tiempo que un solo dispositivo puede usar el canal.

En el caso de España, el Cuadro Nacional de Atribuciones de Frecuencias, CNAF, se encarga de regular el uso de las bandas de frecuencia y la potencia que se puede transmitir dentro de estas.

La LoRa Alliance trabaja en colaboración con los diferentes estamentos regionales para confeccionar un cuadro de comunicaciones global con las diversas normativas y reglamentos.

	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 + 8	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kbps				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

Figura 2-2. Tabla con las frecuencias y otros parámetros permitidos dependiendo de cada región [1].

Otro parámetro importante en la tecnología LoRa es el ancho de banda, del cual existen 3 posibles valores, que son 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. El ancho de banda influye en la cantidad de información que se puede transmitir en una determinada cantidad de tiempo. Cuanto mayor sea el ancho de banda, aumentará la tasa de transferencia de datos y se reducirá el tiempo de transmisión. Las relaciones existentes entre los parámetros implicados en la tecnología LoRa están indicadas en las ecuaciones 2-1 y 2-2.

Existe una estrecha relación entre el ancho de banda y el *spreading factor* respecto a la velocidad de las transmisiones. Dependiendo del tipo de comunicación a realizar, se configurarán estos parámetros de un modo u otro. El aumento del ancho de banda provoca una comunicación más rápida, ya que disminuye el tiempo de bit y aumenta la capacidad del canal. Por el contrario, el aumento del spreading factor conlleva una comunicación más lenta debido al aumento del tiempo de bit, pero consiguiendo una mayor robustez frente al ruido. En la siguiente tabla se puede apreciar algunos valores de tasas de transferencia según el factor de esparcimiento y el ancho de banda:

<i>Spreading factor</i>	125 kHz	250 kHz	500 kHz
7	9,4 kb/s	18,8 kb/s	37,5 kb/s
12	0,293 kb/s	0,588 kb/s	1,17 kb/s

Tabla 2–2. Valores de la tasa de transferencia de datos dependiendo del factor de esparcimiento y el ancho de banda [8].

2.1.3 Ventajas y desafíos de la tecnología LoRa

El uso de LoRa presenta una gran cantidad de ventajas, gracias a las cuales se considera a esta tecnología como una de las más completas y versátiles. Las principales virtudes que presenta son las siguientes:

- Bajo consumo energético. Los dispositivos LoRa son capaces de trabajar a potencias muy bajas lo que implica una gran eficiencia energética, llegando a funcionar con batería durante años sin necesidad de recargarse.
- Largo alcance. La tecnología LoRa permite que se realicen comunicaciones entre equipos muy distanciados pudiéndose superar los 12 Km de rango. En algunas pruebas realizadas se han llegado a alcanzar valores como los 20 Km en condiciones ideales.
- Resistencia frente interferencias. Las características de LoRa la hacen una tecnología robusta frente al ruido del canal y las interferencias. Además, la modulación utilizada la hace prácticamente inmune al efecto Doppler.
- Alta sensibilidad. Los equipos receptores son capaces de detectar comunicaciones de hasta -136 dBm dependiendo de la configuración de parámetros.
- Fácil despliegue y bajo costo. Requiere de poca infraestructura, pudiéndose utilizar en la mayoría de los casos redes ya existentes. Los equipos LoRa suelen ser de bajo costo y las actualizaciones de software se pueden realizar de forma remota por lo que se reduce el coste de mantenimiento. Asimismo, el uso de frecuencias libres sin necesidad de pagar licencias facilita el uso de esta tecnología.

A pesar de todas estas ventajas también existen algunos inconvenientes y dificultades en esta tecnología:

- Baja velocidad de transmisión y carga de datos. Por la estructura de la red LoRa, las comunicaciones no tienen una gran velocidad y no pueden realizarse transmisiones con una gran cantidad de datos.
- Frecuencias ocupadas. Por un lado, el uso de la banda ISM es una ventaja, ya que cualquier persona puede transmitir en estas frecuencias. No obstante, al mismo tiempo es un inconveniente, puesto que a pesar de que la tecnología LoRa es muy resistente a las interferencias, trabajar en frecuencias sobrecargadas implica problemas y pérdida de prestaciones.

En relación con las pruebas que más tarde se expondrán en este trabajo, hay otros factores que afectarán al alcance de las comunicaciones y se presentarán como un inconveniente. Al estar trabajando en entornos urbanos, hay que tener en cuenta el coeficiente de atenuación estructural. A medida que las señales atraviesan diferentes tipos de obstáculos, la transmisión se ve atenuada reduciéndose el rango de la comunicación de manera considerable. En la siguiente figura se puede observar cuál es la atenuación típica que producen algunos de los principales materiales.

Material attenuation	(dB)
Glass (6mm)	0.8
Glass (13mm)	2
Wood (76mm)	2.8
Brick (89mm)	3.5
Brick (178mm)	5
Brick (267mm)	7
Concrete (102mm)	12
Stone wall (203mm)	12
Brick concrete (192mm)	14
Stone wall (406mm)	17
Concrete (203mm)	23
Reinforced concrete (89mm)	27
Stone wall (610mm)	28
Concrete (305mm)	35

Figura 2-3. Tabla con la atenuación típica de algunos materiales [9].

Otro elemento a tener en cuenta por su impacto en las comunicaciones inalámbricas es el factor de zona de Fresnel. Es vital en una buena comunicación establecer la mayor cantidad de visión directa que sea posible entre el equipo transmisor y el receptor, con la finalidad de cubrir largas distancias de manera efectiva. Las regiones de Fresnel son una serie de áreas situadas en la línea de visión de la transmisión. Si en estas áreas aparecen obstáculos, a pesar de que exista visión directa entre emisor y receptor, la propagación de las señales se ve afectada causando que el nivel de la señal se reduzca y el rango de alcance baje.

El efecto del suelo y los obstáculos también afecta al nivel y rango de la señal por la reflexión y refracción de las ondas sobre estos elementos.

Todos estos factores hacen que la tecnología LoRa en entornos urbanos pierda prestaciones y es por ello que las distancias en las comunicaciones se vean reducidas notablemente.

2.1.4 LoRaWAN y arquitectura de red

LoRa es la capa física que aporta las técnicas de modulación y demodulación para que los dispositivos se puedan comunicar mientras que LoRaWAN es un protocolo abierto de red de área amplia, LPWA. Este protocolo está diseñado para la conexión inalámbrica de dispositivos de baja potencia permitiendo que se comuniquen con aplicaciones conectadas a internet. LoRaWAN es la capa de control de acceso al medio, MAC, a través de la cual LoRa trabaja, su función es controlar tanto el protocolo como la arquitectura, esto ayuda a determinar la duración de la batería de los nodos, la calidad del servicio, la seguridad de los datos transmitidos, la capacidad de la red y los tipos de aplicaciones utilizadas.

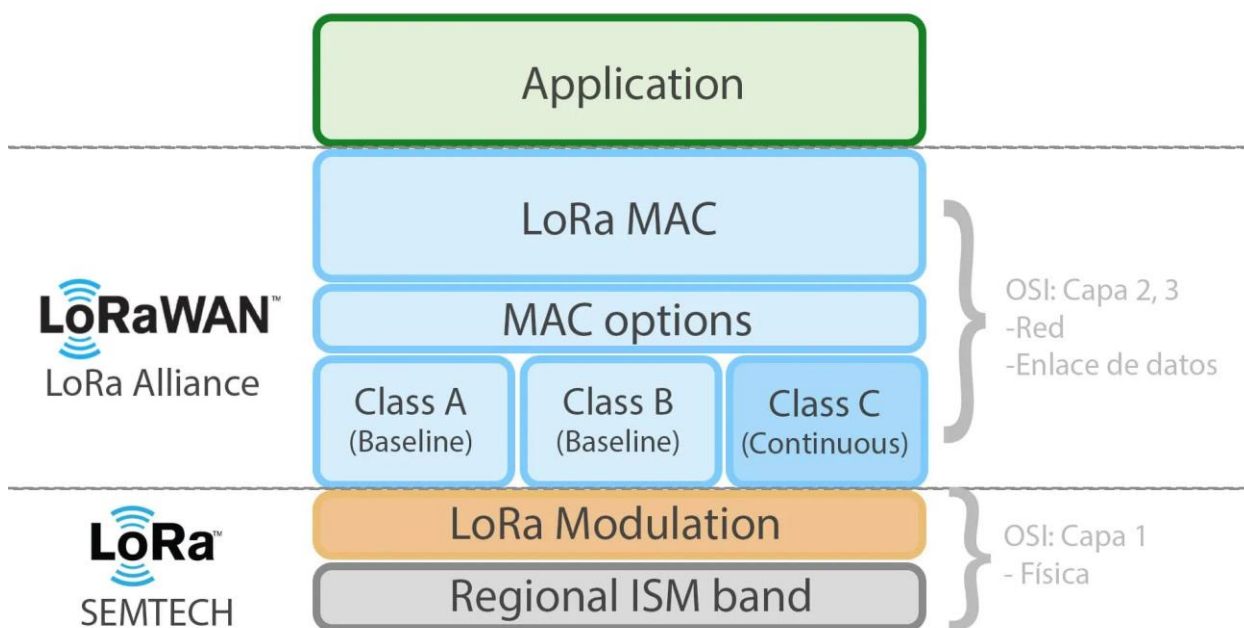


Figura 2-4. Torre de protocolo de LoRa [10].

Algunas de las características principales del protocolo LoRaWAN son las siguientes:

- Bidireccional. Las comunicaciones son bidireccionales, ya que, los equipos son capaces de enviar y recibir datos.
- Adaptabilidad de la red. La posibilidad de conectar miles de nodos finales a una única pasarela hace que la red sea fácil de escalar.
- Seguridad y fiabilidad. La tecnología LoRa utiliza varias capas de cifrado avanzado, lo que garantiza la transmisión de la información. Además, existen diferentes tipos de redes públicas, privadas y mixtas.

2.1.4.1 Arquitectura de la red LoRaWAN

La arquitectura de red LoRaWAN está formada por cuatro elementos e implementa una topología de estrella. En esta topología cada nodo final se puede comunicar con diferentes puertas de enlace, y estas a su vez, conectan con el servidor de red. En la siguiente figura se puede ver la estructura de la red.

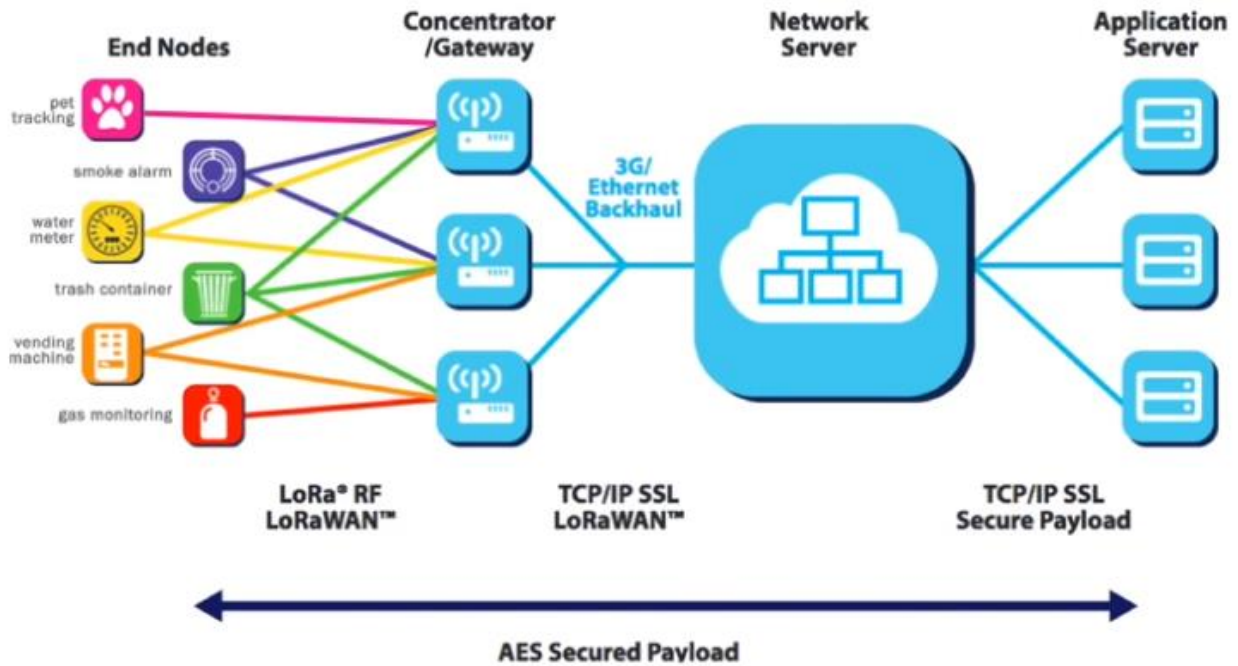


Figura 2-5. Arquitectura de la red LoRaWAN [11].

- **Nodos finales.** Se encargan de recopilar la información proveniente de sensores u otras utilidades y transmitirla, también reciben las comunicaciones procedentes del servidor de aplicaciones.
- **Gateway o pasarela.** Actúan como un puente transparente entre los nodos finales y el servidor, retransmiten los datos bidireccionalmente.
- **Servidor de red.** Se conecta a varias pasarelas a través de una conexión TCP/IP segura, ya sea por cable o de forma inalámbrica. Tiene varias funciones como la de eliminar mensajes duplicados y decidir que puerta corresponde a un mensaje hacia el nodo final. Además, gestiona el nodo final y las velocidades de transmisión de datos de forma adaptable con el fin de maximizar la capacidad de la red y extender la vida útil de la batería del nodo final.
- **Servidor de aplicación.** Su función es recopilar la información obtenida por los nodos finales, analizarla y decidir qué acciones deben tomar estos nodos.

2.1.4.2 Dispositivos finales LoRaWAN

Existen 3 clases de dispositivos de nodo final en LoRaWAN. Todas las clases permiten comunicación bidireccional, pero se diferencian en el enlace descendente, cuando el nodo final recibe un mensaje.

- **Clase A.** Estos nodos son los más eficientes energéticamente, sólo permiten la comunicación proveniente del servidor durante dos breves ventanas de tiempo que se inician después de una comunicación ascendente. Si el servidor desea enviarle algún mensaje pasada esas dos ventanas, debe esperar a la próxima hora programada con una comunicación por parte del nodo final. Los únicos responsables de iniciar la comunicación son los nodos finales, cuando tienen datos para enviar, los transmiten en una hora preestablecida para realizar la comunicación y espera una respuesta.
- **Clase B.** Los nodos con esta clase ofrecen, además de las ventanas de recepción de los dispositivos de clase A, ventanas extras de recepción a las horas programadas. Es necesario que los nodos reciban una trama de sincronización por parte de la pasarela para que estas ventanas de recepción se abran.
- **Clase C.** Estos dispositivos proporcionan ventanas de recepción casi constantes. Las ventanas solo se cierran cuando el nodo está transmitiendo, debido a esto son los menos eficientes energéticamente.

2.1.5 Comparativa con otras tecnologías inalámbricas

Las tecnologías de transmisión inalámbrica pivotan en tres ejes, consumo energético, distancia y capacidad de transmisión. No existe actualmente una tecnología que cubra a la perfección los tres ejes, si no que se sacrifica alguno para potenciar a los demás.

Por ejemplo, en el caso de la telefonía móvil ofrecen muy buen alcance, una gran capacidad de transmisión, pero consume mucha energía. Otro ejemplo es el Bluetooth, ofrece un consumo energético bajo, buena capacidad de transmisión, pero un alcance muy limitado. Las LPWAN, *Low Power Wide Area Networks*, son tecnologías que, para tener muy buen alcance y un consumo muy bajo, sacrifican la cantidad de datos que pueden transmitir, dentro de las tecnologías LPWAN se encuentra LoRa. Este tipo de redes está en pleno auge, puesto que, permiten una gran cantidad de conexiones mientras que el precio de implementarlas en bandas sin licencia implica mucho menos capital de inversión que otras alternativas.

Desde un aspecto general de comparación entre ancho de banda y alcance, LoRa es la tecnología que mayor rango proporciona utilizando un menor ancho de banda, como se puede apreciar en la siguiente figura.

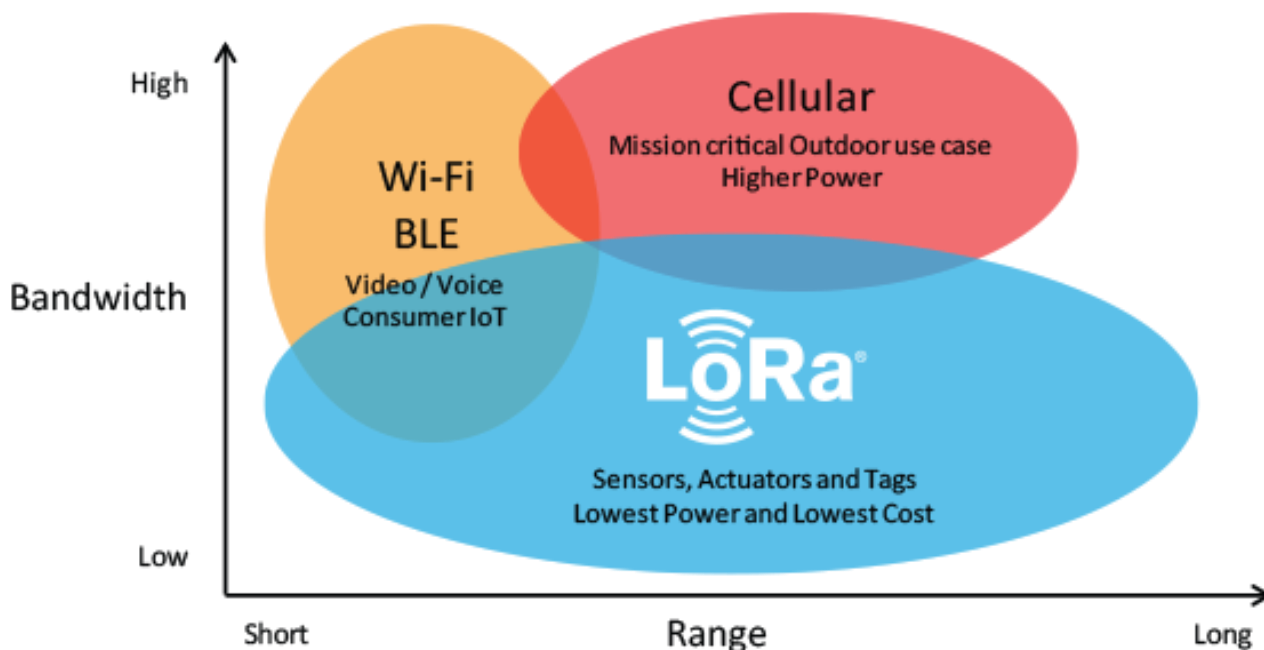


Figura 2-6. Comparativa entre el rango y el ancho de banda de LoRa respecto otras tecnologías similares [1].

Si añadimos a la comparación la potencia transmitida, LoRa supera a sus competidores obteniendo un mayor alcance haciendo uso de una menor cantidad de potencia en las transmisiones.

Tecnología	Comunicación inalámbrica	Rango	Potencia transmitida
Bluetooth	Corto alcance	10 m	2.5 mW
Wi-Fi	Corto alcance	50 m	80 mW
3G/4G	Telefonía móvil	5 Km	5000 mW
LoRa	LPWAN	2-5 Km (entorno urbano) 2-15 Km (entorno rural)	20 mW

Tabla 2-3. Comparativa del rango y potencia transmitida entre diferentes tecnologías inalámbricas [7].

Dentro de las diferentes tecnologías LPWAN, la tecnología LoRa es la más utilizada frente a otras opciones como NB-IoT, debido a que, estas no son tan rentables. El ancho de banda de la red LoRa es inferior si se compara con las demás tecnologías LPWAN obteniendo mayor cobertura y alcance. Además, LoRa se puede utilizar en un número mayor de aplicaciones mientras que el resto de las tecnologías están más limitadas.

Por tanto, se puede concluir que en la actualidad para los casos donde no se necesite transmitir grandes cantidades de información, la tecnología LoRa es la mejor opción, ofreciendo soluciones eficientes, flexibles y económicas

2.1.6 Aplicaciones y casos de uso tecnología LoRa

Como se ha podido comprobar a lo largo de la introducción teórica a esta tecnología, LoRa es una tecnología perfecta para comunicaciones que precisen de un largo alcance y bajo consumo energético. Por tanto, es perfecta para equipos situados en lugares donde no se dispone de corriente eléctrica, puesto que pueden operar con batería durante largos periodos de tiempo. Existe una larga lista de aplicaciones tanto en el ámbito industrial como en la vida cotidiana en las cuales se utiliza esta tecnología:

- *Smart cities*. El concepto de IoT y ciudades inteligentes van ligados a la tecnología LoRa, la implantación de redes ciudadanas, sensores para la monitorización de suministros, sistemas de gestión urbanas, control de tráfico, domótica, etc.
- Agricultura. Es uno de los campos donde mayor auge ha tenido la tecnología LoRa. Se utiliza para la medición de diferentes parámetros se cómo la humedad o la temperatura de la planta, gracias a los cuales se puede llegar a automatizar el cuidado de los cultivos. Se puede realizar un control exhaustivo de las plantaciones llegándose a predecir futuras enfermedades o determinar el mejor momento para realizar la cosecha.
- Aplicaciones industriales. Dentro del mundo de la industria también se ha implantado con mucha fuerza esta tecnología. La monitorización de tareas y parámetros a través de redes de sensores ha facilitado la realización de trabajos y automatización de procesos. Además de esto, se han conseguido mejoras en cuanto a la prevención de riesgos laborales, mediante el uso de sensores de temperatura o gases.
- Medio ambiente. El despliegue de sensores ayuda a la captación de parámetros medioambientales, como puede ser la polución o las medidas asociadas a los fenómenos meteorológicos. De esta forma, se puede monitorizar la probabilidad de terremotos o tsunamis para alertar con antelación a la población.
- Medicina. LoRa es empleada para administrar medicamentos o monitorizar el estado de los pacientes. Se puede medir de forma remota los parámetros biométricos de las personas sin necesidad de desplazarse a un centro de salud, ayudando al diagnóstico preciso o disparando alarmas en situación de emergencias.

2.2 Global Positioning System (GPS)

2.2.1 Introducción

En la década de los 60, en plena guerra fría y tras el inicio de la carrera espacial, el ejército de Estados Unidos decide buscar una alternativa al sistema de navegación terrestre utilizado hasta el momento, OMEGA. Este sistema estaba basado en la comparación de las señales enviadas por diferentes estaciones terrestres, lo que provocaba una serie de limitaciones.

De esta manera, la armada estadounidense desarrolla el sistema TRANSIT, un sistema basado en el uso de 6 satélites en órbita para obtener la localización precisa de toda la flota. Este sistema era global, más preciso y válido para todo tipo de medios. Su funcionamiento se basaba en el seguimiento de objetos en movimiento mediante el cálculo de la velocidad de la señal transmitida por el tiempo que tarda en llegar a un receptor. Sin embargo, no era continuo sólo se podía conocer el posicionamiento cada un periodo de 1,5 horas.

Es por esto, que se decide continuar investigando hasta desarrollar un nuevo modelo de satélite, NAVSTAR y generaciones posteriores, que sí permiten conocer la posición actualizada con una gran precisión acabando con las limitaciones encontradas en los modelos anteriores. Entre las décadas de los 70 y 90, se comienzan a lanzar estos satélites para ponerlos en órbita hasta conseguir una constelación formada por 24 satélites declarándose la operatividad completa del GPS, Sistema de Localización Global, en 1995.

Este sistema funciona con un mínimo de 4 satélites visibles, de los 24 totales que se encuentra orbitando por toda la superficie del planeta, consiguiendo de esta forma una cobertura global.

El sistema GPS, fue de uso militar exclusivo hasta el comienzo de los 2000, cuando fue liberado para el uso civil en todo el mundo. Comenzando de esta forma su desarrollo para el uso en transporte, telecomunicaciones y otras aplicaciones.

2.2.2 Funcionamiento del sistema GPS

Los sistemas GPS tienen como finalidad calcular la posición de un elemento en un espacio tridimensional indicando los valores de latitud, longitud y altitud. Para obtener estos parámetros se calculan las distancias entre el elemento y un mínimo de tres satélites cuyas posiciones son conocidas.

La distancia entre el receptor GPS y un satélite se calcula multiplicando la velocidad con la que se propaga la señal transmitida por el satélite por el tiempo que la señal se encuentra en el aire. Para medir el tiempo de vuelo de la señal, es necesario que los relojes de los satélites y de los receptores estén sincronizados, ya que, deben generar simultáneamente el mismo código. Sin embargo, los relojes de los satélites son muy precisos, mientras que, los de los equipos receptores son osciladores económicos y, por tanto, imprecisos. La diferencia entre los relojes de los receptores y satélites añade una incógnita más que hace necesario un mínimo de cuatro satélites para estimar correctamente las posiciones.

Así pues, para obtener una posición en dos dimensiones, latitud y longitud, se necesita establecer conexión como mínimo con 3 satélites. Del mismo modo, para poder conocer también el valor de la altitud y reducir el error provocado por la desviación de los relojes será necesario tener conexión con 4 satélites de forma simultánea. Cuanto mayor sea el número de satélites con los cuales el receptor tiene conexión, mejor será la precisión del posicionamiento obtenido.

Existen estaciones terrestres que revisan periódicamente los relojes atómicos de los satélites y la estabilidad de la trayectoria, realizando correcciones en caso de ser necesarias ya que la precisión de estos valores son claves en el funcionamiento del sistema GPS.

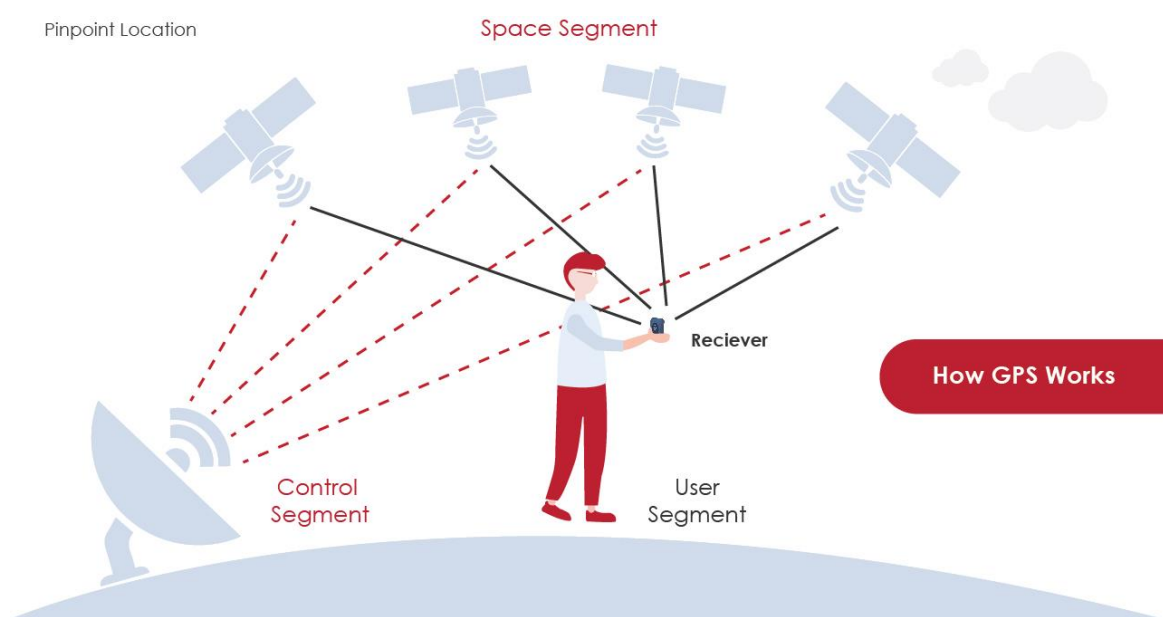


Figura 2-7. Representación del funcionamiento del sistema GPS [12].

Una vez que se ha determinado la posición con exactitud, la unidad GPS puede calcular diferentes parámetros como la velocidad, trayecto y distancia hacia un destino.

2.2.3 Satélites GPS

El sistema GPS tiene actualmente 24 satélites en órbita operativos conformando una constelación. El número de satélites operativos puede fluctuar, pero siempre se garantiza que al menos debe haber 24 satélites funcionales. No obstante, no todos los equipos son iguales debido a que con el paso del tiempo se han ido renovando algunos de ellos con el objetivo de mejorar las prestaciones. Estos satélites son propiedad de los Estados Unidos, aunque existen estaciones terrestres repartidas por todo el mundo para asegurar el correcto funcionamiento de estos.

Dentro de la constelación, los satélites se encuentran distribuidos en 6 órbitas diferentes y cada una cuenta con un mínimo de 4 satélites, de esta forma se asegura que desde cualquier punto del planeta se pueda tener visión directa con al menos 8 satélites de forma simultánea.

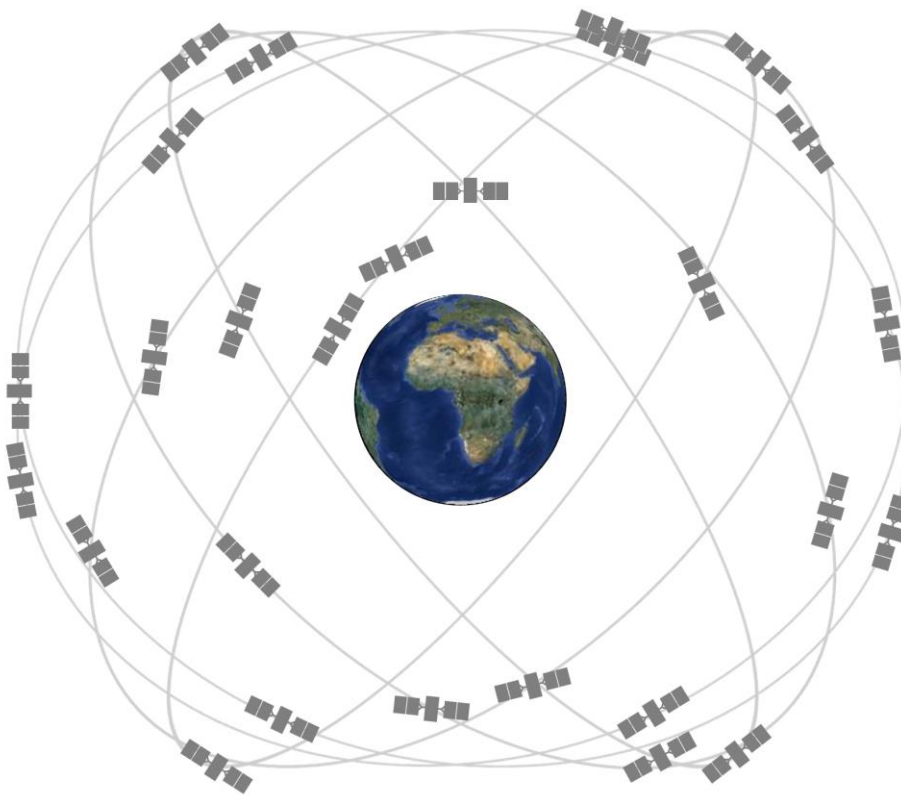


Figura 2-8. Representación de las órbitas formadas por los satélites GPS [13].

Los satélites orbitan a una altura de unos 20000 Km con una velocidad de 4 Km/s, por lo que dan dos vueltas completas a la tierra cada día.

Los satélites GPS transmiten un mínimo de 2 señales de radio de baja potencia. Dichas señales viajan por la línea de visión, pudiendo pasar a través de nubes o vidrio, pero no a través de la mayoría de los objetos sólidos, como edificios, lo que dificulta en gran medida la localización en interiores. Gracias a los avances tecnológicos, se está logrando que los receptores sean cada vez más sensibles siendo capaces de rastrear incluso en interior. Cada señal GPS está compuesta por 3 tipos de información diferente:

- Código pseudoaleatorio. Es un código de identificación que muestra qué satélite está transmitiendo información. Los receptores GPS pueden conocer de qué satélites están recibiendo señales en cada momento.

- Datos de efemérides. Estos datos son necesarios para determinar la posición del satélite y facilitan información vital sobre la salud del satélite, la fecha y hora actuales.
- Datos de almanaque. Indican al receptor GPS donde se encuentra cada satélite GPS en cualquier momento del día, mostrando información sobre la órbita de toda la constelación.

2.2.4 Protocolo NMEA

El protocolo NMEA, Asociación Nacional de Electrónica Marina, es un estándar de comunicación utilizado en receptores GPS y otros dispositivos de navegación. Proporciona datos en formato ASCII que incluyen información sobre posición, velocidad, rumbo, etc.

Dentro de los diferentes mensajes GPS que proporciona el protocolo NMEA, los principales son los siguientes:

- GPRMC. Este mensaje indica datos de posicionamiento GPS. El primer valor del mensaje es la información referente a la hora, el siguiente valor es el estado de la posición pudiendo ser A si la posición es válida o V si es inválida, prosiguen los valores de latitud y longitud, velocidad en nudos, rumbo en grados y fecha.

```
$GPRMC,104649.00,A,4026.64156,N,00341.87959,W,0.508,304.53,070723,,A*73
```

Figura 2-9. Ejemplo de mensaje GPRMC.

- GPGGA. Este mensaje también indica datos de posicionamiento y otros valores. Comienza indicando la hora, le preceden los datos de latitud y longitud, seguidamente aparece un indicador de la calidad de la observación pudiendo ser 0 (sin datos), 1 (observación recibida), 2 (observación en modo diferencial). Después, le precede el número de satélites con los cuales el receptor ha conseguido conectar, el valor del factor geométrico horizontal, la altura del dispositivo respecto al mar y diferentes parámetros del satélite.

```
$GPGGA,104649.00,4026.64156,N,00341.87959,W,1,05,2.50,742.7,M,50.2,M,,*4F
```

Figura 2-10. Ejemplo de mensaje GPGGA.

- GPGSA. Esta línea de código indica el factor de degradación de la precisión utilizado para los satélites de navegación. Primero se representa el modo de control para el número de coordenadas determinadas, seguido del modo de funcionamiento pudiendo ser 1 (no es posible la observación), 2 (se determinan dos coordenadas), 3 (se determinan tres coordenadas). Le continúan el número de satélites utilizados para resolver el problema de navegación y los diferentes valores de degradación geométrico.

```
$GPGSA,A,3,27,02,08,10,21,,,,,,,,,5.51,2.50,4.91*05
```

Figura 2-11. Ejemplo de mensaje GPGSA.

- GPGSV. Estos mensajes representan información relativa a los satélites con los cuales se ha establecido conexión, elevación, acimut y relación señal-ruido. Una oración puede contener la información de 1 a 4 satélites, los datos adicionales de los satélites se transmiten en las siguientes oraciones. Inicialmente se muestra el número de mensajes GPSV seguidos, luego el orden del mensaje, seguido del número de satélites en la línea de visión directa y diferente información sobre la inclinación y azimut de los satélites.

```
$GPGSV,3,1,11,02,52,283,23,03,05,207,,07,02,265,,08,82,007,28*7E
$GPGSV,3,2,11,10,40,050,36,14,09,322,,16,19,171,22,21,61,294,30*72
$GPGSV,3,3,11,27,53,111,24,30,02,290,,32,19,104,17*4D
```

Figura 2-12. Ejemplo de mensaje GPGSV.

2.2.5 Ventajas y desafíos del GPS

El sistema GPS tiene una serie de ventajas todas ellas basadas en la posibilidad de localizar objetos o personas en cualquier punto del planeta en tiempo real. Este hecho es perfecto para realizar seguimientos de vehículos, envíos o personal. Otros beneficios del GPS son las mejoras en la navegación y la planificación de rutas, haciendo más fáciles los desplazamientos y permitiendo ahorrar tanto combustible como tiempo, además de reducir el riesgo de perderse. La asistencia en casos de emergencia también es un punto muy importante a favor de este sistema siendo de gran ayuda en catástrofes o accidentes.

Por otro lado, el mayor desafío del sistema GPS es la precisión del posicionamiento, ya que depende de muchas variables como el número de satélites disponibles, la ionosfera y el entorno urbano. Algunos de los factores que pueden afectar a la precisión del GPS son los siguientes:

- Obstrucciones físicas. La existencia de elementos voluminosos como edificios, árboles o montañas que impidan la visión directa del equipo receptor con los satélites, puede generar serios problemas llegando a bloquear las comunicaciones por completo.
- Fenómenos meteorológicos. El vapor de agua generado en la troposfera interfiere a las señales electromagnéticas reduciendo su velocidad. Esto genera una serie de errores que son prácticamente imposible de corregir.
- Perturbación ionosférica. Esta capa está formada por partículas cargadas eléctricamente, al ser atravesada por las señales radio, la velocidad de estas se ve alterada, por lo que se generan errores similares a los generados por los fenómenos meteorológicos.
- Errores en los relojes. Los satélites contienen relojes atómicos que presentan ligeras desviaciones a pesar de estar constantemente ajustados y controlados, lo mismo sucede con los relojes de los receptores.
- Interferencias. Es la principal fuente de errores, dependiendo de los niveles de interferencia la precisión de los receptores puede verse muy comprometida. En algunos casos, las interferencias pueden ser introducida deliberadamente por estamentos militares.

Como visión al futuro, los países siguen construyendo y mejorando sus sistemas GPS. Se están realizando iniciativas en todo el mundo para aumentar la precisión, mejorar la fiabilidad y las capacidades del GPS. Asimismo, se trabaja en el avance de los receptores tratando de que sean más pequeños, más precisos y eficientes.

En la actualidad existen algunos países como Siria, Egipto y Corea del Norte en los cuales está prohibido el sistema GPS.

2.2.6 Aplicaciones

Las aplicaciones del sistema GPS son muy variadas siendo utilizado en campos muy diversos. La posibilidad de tener una localización precisa en tiempo real ha revolucionado algunos sectores, creando nuevas vías de empleo o mejorando algunos servicios ya existentes. Las aplicaciones más significativas son las siguientes:

- Alertas sanitarias o emergencias. En un desastre natural se emplea el GPS para buscar a personas o tener localizados al personal que trabaja en la zona afectada. Permite el trazado de mapas y trayectos alternativos para llevar a cabo evacuaciones de población. Además, se emplea para localizar a personas que han tenido un accidente o han sufrido algún tipo de percance en terrenos inhóspitos.
- Transporte y navegación. Una de la aplicación más extendida, la posibilidad de conocer cuál es la mejor ruta en tiempo real evitando atascos y retrasos. Empresas de mensajería y transporte organizan sus rutas de forma mucho más eficiente, además de saber la localización de los envíos en todo momento. En la industria de la aviación también es crucial, pudiendo conocer la situación exacta de cada avión y regular el tráfico aéreo.
- Aplicaciones militares. Como ya se ha explicado anteriormente es el motivo por el cual se desarrolló el servicio GPS, la necesidad de conocer la posición tanto de las flotas como del personal militar, envíos de misiles, vehículos sin tripulación, etc.
- Actividad física. El uso de GPS en pulsómetros, relojes inteligentes o teléfonos móviles permite medir la actividad física y conocer mejor el rendimiento desempeñado, así como, los aspectos a mejorar.
- Geología. En este campo se comenzó a utilizar el GPS para el estudio de las placas tectónicas con el fin de predecir futuros terremotos.

3 DISEÑO EXPERIMENTAL

La verdadera ciencia enseña, por encima de todo, a dudar y a ser ignorante.

- Miguel de Unamuno -

En este epígrafe, tras haberse realizado una introducción teórica sobre LoRa y GPS, se procede a explicar la fase experimental del trabajo. Inicialmente, el trabajo sólo constaba de una parte experimental centrada en la realización de mapas de cobertura con tecnología LoRa. Después de realizarse diferentes pruebas de mapeado y análisis de cobertura, se decide añadir un nuevo apartado experimental con el objetivo de entender mejor los resultados obtenidos y al mismo tiempo poder demostrar de forma práctica cómo funciona el módulo GPS. En primer lugar, se describirá el material empleado para poder llevar a cabo el proyecto y seguidamente se explicarán ambos experimentos.

3.1 Material empleado

3.1.1 Equipamiento

Para la realización de los experimentos, se han utilizado dos placas Arduino con un chip LoRa. El chip utilizado ha sido el RN2903. Ambas placas están conectadas a una antena externa a través de un conector SMA. A uno de los dos equipos, el cual se utilizará como transmisor, se le conecta un módulo GPS NEO-6M-0-001 para poder conocer la ubicación.

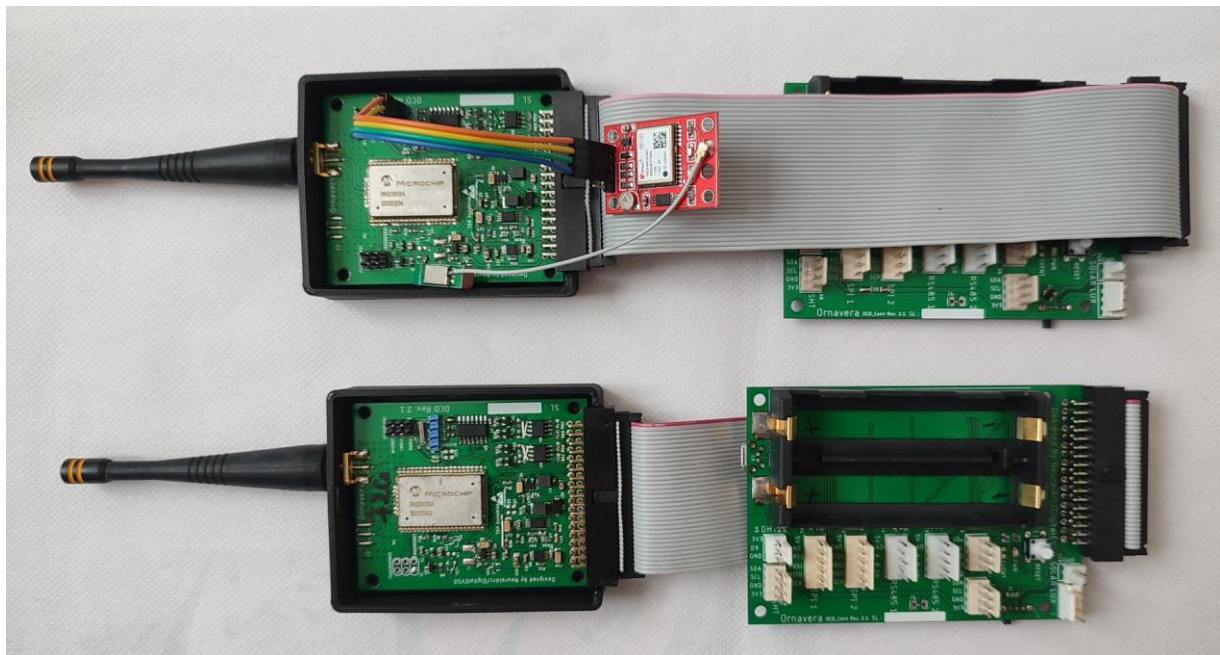


Figura 3-1. Equipo transmisor y equipo receptor.

En la figura 3-1, se puede observar en la parte superior el equipo transmisor con el módulo GPS, y en la zona inferior el equipo receptor. A continuación, se describirá más en detalle el transmisor LoRa utilizado y el módulo GPS.

3.1.1.1 Transmisor LoRa RN2903

Como se ha indicado anteriormente, el RN2903 [24] es un chip basado en la tecnología inalámbrica LoRa. Este módulo es uno de los más utilizados por su fácil configuración, debido a que trabaja con una serie de comandos indicados por el fabricante. A través de estos comandos, se podrán programar los diferentes parámetros de las transmisiones LoRa, centrándose las pruebas en los parámetros de frecuencia, *spreading factor* y potencia transmitida.

Las principales características a destacar del transmisor LoRa son un bajo consumo energético y conexiones de largo alcance, siendo capaz de superar los 15 Km en áreas suburbanas y 5 Km en áreas urbanas.

Este chip, trabaja en la banda de los 915MHz, es por ello que utiliza la banda de frecuencia estadounidense, con una frecuencia mínima de 902 MHz y máxima de 928 MHz. Por lo que a la hora de realizar las pruebas experimentales esto será un inconveniente, dado que, en España dicha banda de frecuencia pertenece a las comunicaciones móviles 2G y 3G, como se puede ver en la figura 3-2.

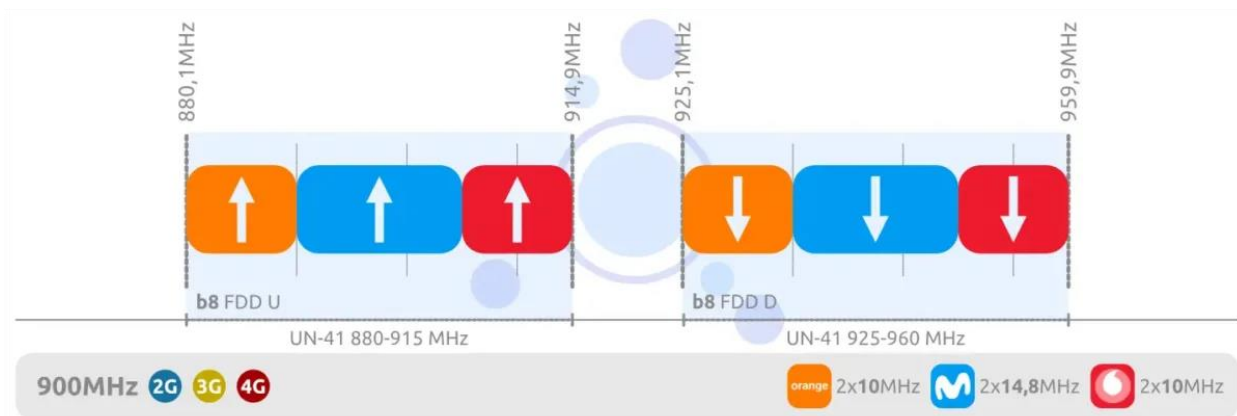


Figura 3-2. Uso de la banda de frecuencia de los 900MHz en España [25].

En cuanto al factor de esparcimiento y potencia transmitida, este equipo permite configurarlo con valores de *spreading factor* entre 7 y 12, siendo 7 el valor mínimo y 12 el máximo. La potencia transmitida del chip puede ir desde los 3 dBm a los 18,5 dBm.

3.1.1.2 MÓDULO GPS NEO-6M-0-001

El módulo GPS NEO-6M-0-001 es uno de los más utilizados en Arduino, siendo sus características principales un bajo consumo energético y gran precisión de localización, llegando a tener un margen de error de 2,5 metros en condiciones óptimas. Además, cuenta con una antena externa para mejorar la conexión.

A la hora de realizar las pruebas, se han encontrado problemas con este módulo GPS en entornos urbanos que se explicarán más al detalle con posterioridad.



Figura 3-3. Módulo GPS NEO-6M-0-001 [26].

3.1.2 Programas utilizados

Bajo este apartado, se va a explicar los diferentes programas utilizados para la programación, la escritura en los equipos y la lectura de resultados.

3.1.2.1 Arduino

Para la programación de las placas se ha empleado el software de Arduino. Se han desarrollado dos códigos diferentes para cada experimento.

En primer lugar, el código utilizado para el experimento del módulo GPS es el siguiente:

```
#define GPS_UART Serial
#define GPS_RATE 9600
#define CTRL                6
#define PWR_EN_ON LOW
#define PWR_EN_OFF HIGH
#define DEBUG_UART          SerialUSB
#define DEBUG_RATE 57600

char dato=' ';

void setup()
{
  DEBUG_UART.begin(DEBUG_RATE);
  GPS_UART.begin(GPS_RATE);
  pinMode(CTRL, OUTPUT);
  digitalWrite(CTRL, PWR_EN_ON);
  DEBUG_UART.println("Boot");
}
```

```

void loop()
{
  if(GPS_UART.available())
  {
    dato=GPS_UART.read();
    DEBUG_UART.print(dato);
  }
}

```

Con este código conseguimos leer constantemente el módulo GPS, los datos que recibimos siguen el protocolo NMEA, visto en el marco teórico.

Por otro lado, el código empleado para realizar los mapas de cobertura con tecnología LoRa es el siguiente:

```

#define DCD
#define debug
#define devdebug
#define R2D2

#include "DCDlib/conf.h"
#include "DCDlib/utils.h"
#include "DCDlib/LoRalib.h"
#include "DCDlib/syslib.h"
#include "DCDlib/gps.h"
#include "R2D2lib/battery.h"

bool transmisor = false;

void setup() {

  DEBUG_UART.begin(DEBUG_RATE);
  delay(4000);
  logger("Boot!!!!");
  DEBUG_UART.flush();

  pinMode(BATT_CHR, INPUT_PULLUP);
  pinMode(BATT_FLT, INPUT_PULLUP);

  randomSeed(analogRead(0));

  powerON();
}

void loop() {

  devlogger("Loop function");
  unsigned long timer=millis();
  uint16_t sleep_time;

  if (!ispowerON)
    powerON();
}

```

```
String Lora_rsp = "";
LoRacmd(String("radio set freq 902000000"), F("yes"),Lora_rsp,
1000);
Lora_rsp = "";
LoRacmd(String("radio set sf sf7"), F("yes"),Lora_rsp, 1000);
Lora_rsp = "";
LoRacmd(String("radio set pwr 2"), F("yes"),Lora_rsp, 1000);
if (transmisor) {
    logger("if");
    String gpsData = "";
    bool datavalid = getLocation(gpsData);
    logger(String(gpsData));
    String message = "";
    message = (String(gpsData)+"\n");
    LoRaTX(message);
    int i = 0;
    do {
        i++;
        logger(String(i));
    } while (i<=2);
}else{
    String mensaje = "";
    do {
        LoRaRX(mensaje);
    } while (mensaje=="");
    LoRacmd(String("radio get rssi"), F("yes"),Lora_rsp, 1000);
    logger(mensaje+", "+Lora_rsp);
    logger("\n");
}
}
```

Este es el código que se ha utilizado para la programación de ambos equipos, a través del cual, definiendo una variable como verdadero o falso se consigue que el programa actúe como transmisor o receptor. Ambas placas deben tener la misma configuración de factor de esparcimiento, potencia de transmisión y frecuencia. Dichos parámetros son programados utilizando los comandos del transmisor RN2903A.

Si el programa actúa como receptor, se mantiene en un bucle infinito de escucha, imprimiendo por pantalla el mensaje recibido y el RSSI. En el caso de ser el transmisor, se realiza una lectura del módulo GPS para conocer la ubicación y se envía un mensaje al receptor con esta información.

3.1.2.2 BOSSA y Coolterm

Para flashear el código compilado en los equipos, estos se conectan por USB al ordenador y a través del programa BOSSA se realiza la escritura con la siguiente configuración.

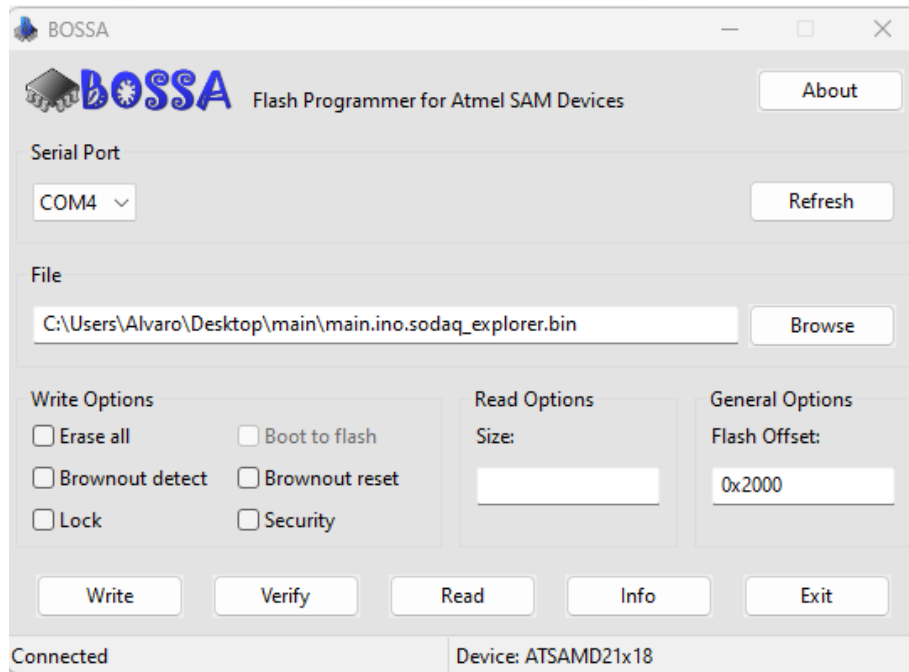


Figura 3-4. Configuración programa BOSSA.

Una vez que los equipos ya tienen la programación correspondiente y están en funcionamiento, necesitamos ver qué es lo que están imprimiendo por pantalla. Para ello, se conectan por USB al ordenador y utilizando el programa CoolTerm obtenemos dicha información. Son dos las configuraciones que han sido utilizadas: por un lado, para elaborar los mapas de cobertura se ha utilizado una tasa de 115200 baudios; por otro lado, para las pruebas GPS la tasa ha sido de 57600 baudios.

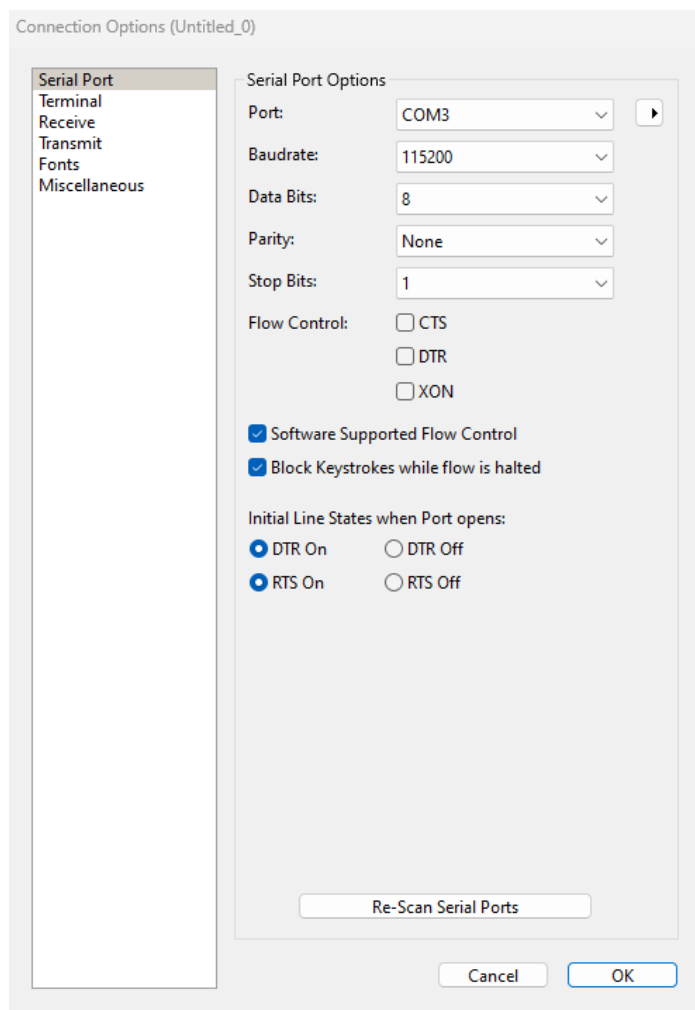


Figura 3-5. Configuración programa CoolTerm.

3.1.2.3 MiniGPS

El programa MiniGPS permite ver a que satélites está conectado el módulo GPS en tiempo real. Más específicamente, a través de una interfaz gráfica, muestra por pantalla a que satélites está conectado el GPS y a cuáles está a punto de conectar o desconectarse. También aporta por pantalla los datos de localización proporcionados por el GPS con el protocolo NMEA. Cuando se expongan los resultados obtenidos en las pruebas GPS, se podrán observar representaciones gráficas de esta aplicación.

3.2 Metodología

A continuación, se describirán los procedimientos que se han llevado en a cabo en las pruebas experimentales. Como se ha indicado anteriormente, se han realizado dos pruebas diferentes. En primer lugar, se explicará la metodología para realizar la prueba sobre el funcionamiento del módulo GPS y seguidamente, se desarrollará el método utilizado para realizar los mapas de cobertura.

3.2.1 Prueba módulo GPS

Esta prueba experimental nace a raíz de las dificultades encontradas en el módulo GPS en entornos urbanos. Los edificios actúan como obstáculos para la conexión entre el GPS y los satélites, por lo que ha sido complicado conseguir posiciones válidas, conexión con al menos 3 satélites de forma simultánea. Además, es vital para la elaboración de los mapas que las ubicaciones obtenidas sean precisas.

Para realizar el experimento únicamente se utilizará el equipo transmisor que cuenta con el módulo GPS. Este equipo se conecta al ordenador a través de un puerto USB, y utilizando el programa BOSSA se flashea en la placa el código Arduino visto en el apartado anterior. Una vez realizado este paso, y sin desconectar el equipo del ordenador, se procede a situarlo en una ventana para favorecer la comunicación entre el módulo GPS y los satélites.

La ubicación en este momento del módulo GPS es una ventana de un cuarto piso, sin existir ningún piso superior que pueda ser un obstáculo, de forma que el equipo tiene la máxima cantidad de visión del cielo posible.



Figura 3-6. Posición de la antena con el módulo GPS NEO-6M-0-001.

En este momento, se utiliza el programa CoolTerm, para ver la información que imprime por pantalla el módulo GPS. Simultáneamente se hace uso de la aplicación MiniGPS para ver los satélites con los cuales el módulo tiene conexión en ese momento. Este experimento tendrá una duración de 15 minutos, dónde se irá recopilando la información obtenida en estos dos programas y que más tarde se mostrará en el apartado de resultados.

3.2.2 Mapas de cobertura con tecnología LoRa

En este epígrafe se va a describir el procedimiento seguido para la realización de la prueba principal de este trabajo. En primer lugar, se definen las configuraciones utilizadas para el transmisor LoRa. Los 3 principales parámetros que van a afectar a la cobertura son: la potencia transmitida, *spreading factor* y la frecuencia. Haciendo uso de estos parámetros, se crean 12 configuraciones diferentes con las que se realizarán los mapas de cobertura. Las configuraciones son las siguientes:

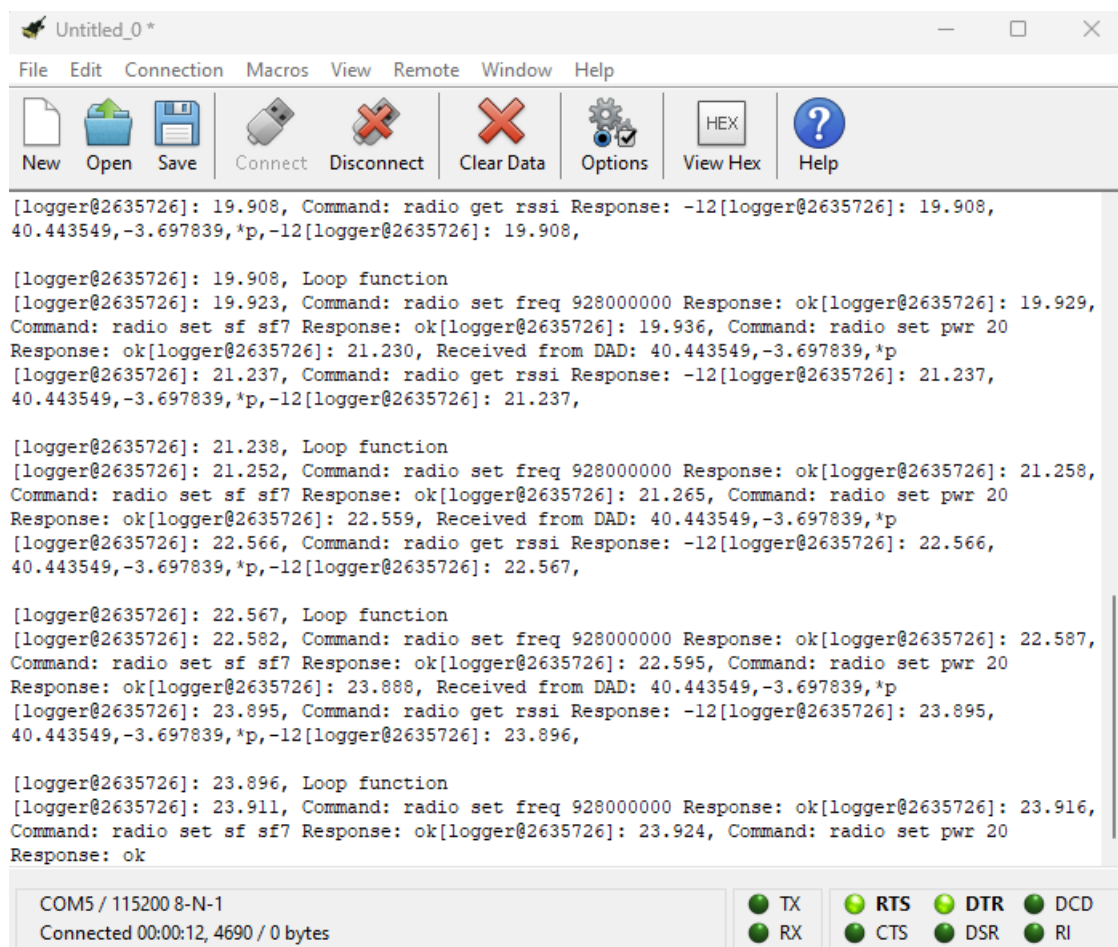
<i>Spreading factor</i>	Frecuencia	Potencia transmitida
7	902 MHz	3 dBm
7	915 MHz	3 dBm
7	928 MHz	3 dBm
7	902 MHz	18,5 dBm
7	915 MHz	18,5 dBm
7	928 MHz	18,5 dBm
12	902 MHz	3 dBm
12	915 MHz	3 dBm
12	928 MHz	3 dBm
12	902 MHz	18,5 dBm
12	915 MHz	18,5 dBm
12	928 MHz	18,5 dBm

Tabla 3–1. Configuraciones de los parámetros para la realización de los mapas de cobertura.

De esta forma se hace un barrido de los 3 parámetros, ya que se explora el valor máximo y mínimo de la potencia transmitida y del *spreading factor*, observándose el efecto de trabajar a frecuencia mínima, media y máxima. Con estas configuraciones, lo que se busca es ver el efecto que produce cada parámetro en la cobertura LoRa. En todas las pruebas, el ancho de banda utilizado ha sido de 125 KHz.

En segundo lugar, se procede a definir el recorrido seguido para la confección de los mapas. Tras realizar varias pruebas y dimensionar el alcance de los equipos, se decide realizar el recorrido descrito en la figura 3-7. Las líneas azules marcan el recorrido realizado, el cual, tiene una distancia total de 3,73 Km y siempre se lleva a cabo de la misma forma. Es por ello que, se pretende hacer un barrido en el sentido de los cuatro puntos cardinales, pasando por las mismas calles dos veces, pero siempre por aceras contrarias. De este modo, lo que se busca es que el recorrido sea uniforme, y que los mapas de cobertura sean lo más detallados posibles.

Para comenzar, se inicia en dirección este por la misma acera en la cual está el punto de partida, cuando se llega a la primera intersección, se baja hacia el sur. Una vez se llega al final de la calle, se cambia de acera y se sube en sentido norte. Al llegar de nuevo a la misma intersección, se toma sentido este y se continua con el recorrido siguiendo el sentido de las flechas.



```

[logger@2635726]: 19.908, Command: radio get rssi Response: -12[logger@2635726]: 19.908,
40.443549,-3.697839,*p,-12[logger@2635726]: 19.908,

[logger@2635726]: 19.908, Loop function
[logger@2635726]: 19.923, Command: radio set freq 928000000 Response: ok[logger@2635726]: 19.929,
Command: radio set sf sf7 Response: ok[logger@2635726]: 19.936, Command: radio set pwr 20
Response: ok[logger@2635726]: 21.230, Received from DAD: 40.443549,-3.697839,*p
[logger@2635726]: 21.237, Command: radio get rssi Response: -12[logger@2635726]: 21.237,
40.443549,-3.697839,*p,-12[logger@2635726]: 21.237,

[logger@2635726]: 21.238, Loop function
[logger@2635726]: 21.252, Command: radio set freq 928000000 Response: ok[logger@2635726]: 21.258,
Command: radio set sf sf7 Response: ok[logger@2635726]: 21.265, Command: radio set pwr 20
Response: ok[logger@2635726]: 22.559, Received from DAD: 40.443549,-3.697839,*p
[logger@2635726]: 22.566, Command: radio get rssi Response: -12[logger@2635726]: 22.566,
40.443549,-3.697839,*p,-12[logger@2635726]: 22.567,

[logger@2635726]: 22.567, Loop function
[logger@2635726]: 22.582, Command: radio set freq 928000000 Response: ok[logger@2635726]: 22.587,
Command: radio set sf sf7 Response: ok[logger@2635726]: 22.595, Command: radio set pwr 20
Response: ok[logger@2635726]: 23.888, Received from DAD: 40.443549,-3.697839,*p
[logger@2635726]: 23.895, Command: radio get rssi Response: -12[logger@2635726]: 23.895,
40.443549,-3.697839,*p,-12[logger@2635726]: 23.896,

[logger@2635726]: 23.896, Loop function
[logger@2635726]: 23.911, Command: radio set freq 928000000 Response: ok[logger@2635726]: 23.916,
Command: radio set sf sf7 Response: ok[logger@2635726]: 23.924, Command: radio set pwr 20
Response: ok
  
```

COM5 / 115200 8-N-1
Connected 00:00:12, 4690 / 0 bytes

TX RTS DTR DCD
RX CTS DSR RI

Figura 3-8. Ejemplo de la información obtenida en el programa CoolTerm.

Como se puede ver en la figura, el equipo transmisor envía un mensaje al receptor, con la latitud y longitud en la que se encuentra. El equipo receptor imprime por pantalla, además de este mensaje, el valor del RSSI de este. De modo que, lo que obtenemos finalmente de cada recorrido realizado es una tabla con los valores de latitud, longitud y RSSI de cada mensaje.

	A
1	40.444192,-3.698040,-94
2	40.444200,-3.698030,-86
3	40.444206,-3.698028,-95
4	40.444210,-3.698028,-83
5	40.444213,-3.698017,-82
6	40.444214,-3.698007,-83
7	40.444210,-3.697998,-76
8	40.444206,-3.697977,-84
9	40.444223,-3.697953,-84
10	40.444224,-3.697938,-82

Figura 3-9. Ejemplo de las tablas obtenidas con la latitud, longitud y RSSI.

Con esta información se generan los mapas de cobertura con el uso de Python. Los mapas obtenidos representan con puntos de diferentes tamaños y colores, el nivel de RSSI obtenido en cada localización del equipo transmisor. Cuanto mayor sea el RSSI obtenido, mayor será el punto con el que se representa.

Asimismo, también se han generado unas gráficas donde se puede ver el nivel RSSI en dBm, frente a la distancia en metros. En dichas gráficas, se muestra la variabilidad de la potencia de señal recibida dependiendo de la distancia a la cual se encontraba el equipo transmisor, no obstante, esto podrá observarse en el apartado de resultados.

4 RESULTADOS

Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.

Nada en la vida es para ser temido, es sólo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos.

- Marie Curie -

Una vez se han conocido los equipos empleados y la metodología seguida, en este capítulo se van a mostrar e interpretar los resultados obtenidos en las dos pruebas experimentales realizadas. Al igual que en el apartado anterior, primero se expondrán los datos obtenidos en las pruebas del módulo GPS, y seguidamente se hará lo mismo con los mapas de cobertura LoRa.

4.1 Pruebas módulo GPS

El objetivo de esta prueba es mostrar el funcionamiento del módulo GPS NEO-6M-0-001, con el cual, se han encontrado complicaciones a la hora de realizar los mapas de cobertura. Este módulo, a pesar de tener una pequeña antena externa para mejorar la cobertura entre el equipo y los satélites, muestra dificultades en entornos urbanos debido a la multitud de obstáculos.

Según los pasos explicados en la metodología, tras flashear el código Arduino correspondiente en la placa y colocar el módulo en su posición, se comienzan a recabar la información obtenida con los programas CoolTerm y MiniGPS.

En esta prueba se realiza lo que se conoce como un *arranque en frío*, donde el equipo comienza a trabajar después de un largo periodo de descanso. Según indica el fabricante en la hoja de catálogo, este tipo de arranque suele tardar entre 30 segundos y 1 minuto, por lo que, en la captura realizada justo al iniciar el equipo, no se obtiene información de ningún tipo.

- Resultados obtenidos del módulo GPS justo al iniciarse la prueba:

```
$GPRMC,,V,,,,,,,,,N*53
$GPVTG,,,,,,,,,N*30
$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
$GPGSV,1,1,01,10,,,33*79
$GPGLL,,,,,V,N*64
```

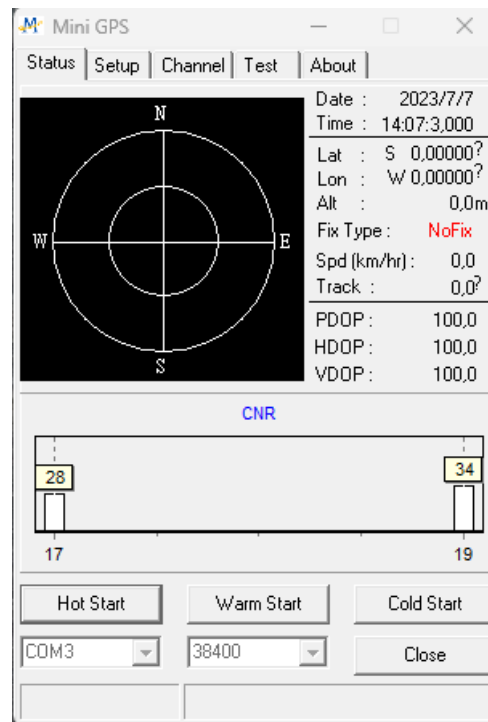


Figura 4-1. Captura del programa MiniGPS justo al iniciarse la prueba.

Después de que el módulo se haya iniciado, y tras cinco minutos de espera consigue conectar con el primer satélite.

- Resultados obtenidos del módulo GPS a los 5 minutos de prueba:

```
$GPRMC,141217.00,V,,,,,,,,,070723,,,N*7F
$GPVTG,,,,,,,,,N*30
$GPGGA,141217.00,,,,,0,01,10.56,,,,,*65
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,10.61,10.56,1.00*0F
$GPGSV,1,1,03,08,,,,,36,10,,,,,31,21,,,,,32*76
$GPGLL,,,,,104017.00,V,N*49
```

Como se puede ver en el código resultante, el equipo está inicializado ya que, nos indica hora y fecha. Sin embargo, al estar solo conectado a un satélite, no es capaz de proporcionar información válida sobre la posición del equipo.

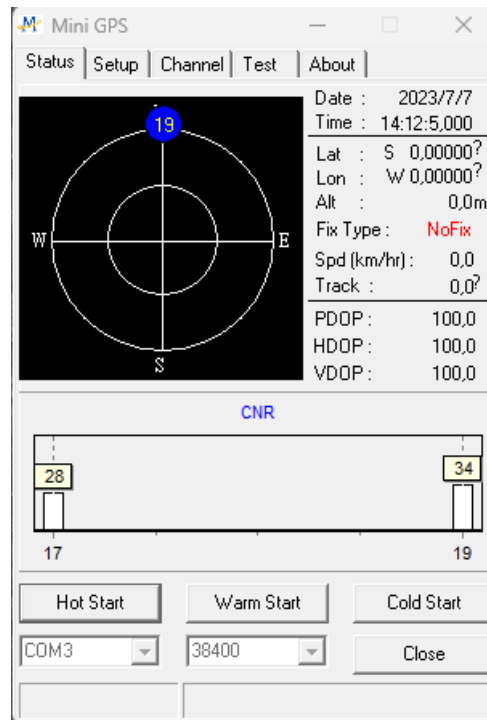


Figura 4-2. Captura del programa MiniGPS a los 5 minutos de prueba.

Tras esperar 12 minutos desde el comienzo del test, el módulo GPS es capaz de conectar con hasta 4 satélites de forma simultánea.

- Resultados obtenidos del módulo GPS a los 12 minutos de prueba:

```

$GPRMC,141934.00,A,4026.67204,N,00341.89104,W,1.522,329.49,070723,, ,A
*7B
$GPVTG,329.49,T, ,M,1.522,N,2.821,K,A*35
$GPGGA,141934.00,4026.67204,N,00341.89104,W,1,04,18.39,756.7,M,50.2,M
, ,*7A
$GPGSA,A,3,02,08,10,21,,,,,,,,,21.18,18.39,10.50*37
$GPGSV,3,1,09,02,51,281,26,03,04,207,,07,03,266,,08,81,359,30*72
$GPGSV,3,2,09,10,41,051,33,21,60,291,32,27,55,108,28,30,03,292,*70
$GPGSV,3,3,09,32,18,106,26*4B
$GPGLL,4026.67204,N,00341.89104,W,104304.00,A,A*7C

```

En este punto de la prueba, el módulo ya proporciona una posición válida, indicando los datos de latitud, longitud y altitud en la que se encuentra el equipo. Tanto a través del código como gráficamente se puede observar que actualmente está conectado a 4 satélites. En la figura 4-3 se representa en color azul oscuro los satélites con los cuales tiene conexión en ese momento, y en azul claro los satélites con los cuales está a punto de conectar o de desconectarse, estos últimos se conocen como satélites dopados. En esta misma figura, también se puede apreciar en la gráfica inferior el nivel de comunicación que hay con cada uno de los satélites.

Los datos de latitud y longitud, a pesar de ser válidos, no indica que la ubicación obtenida sea totalmente precisa, dado que, el equipo sólo está conectado a 4 satélites en este momento. Cuanto mayor sea el número de satélites conectados, mejor será la precisión de la localización, llegando a tener un margen de error de 2,5 metros.

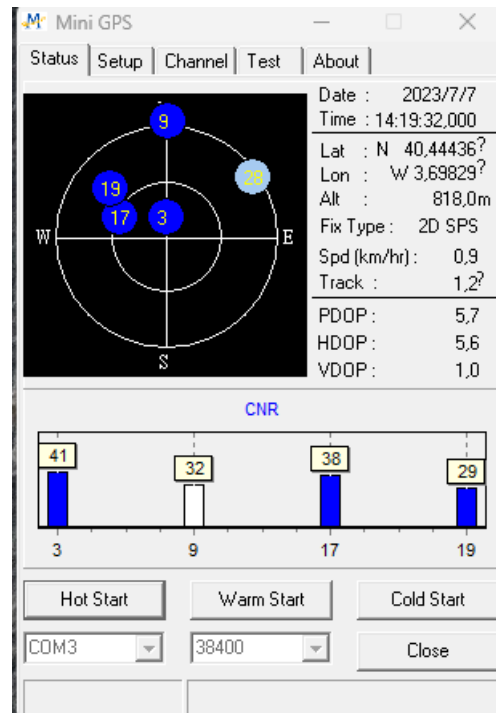


Figura 4-3. Captura del programa MiniGPS a los 12 minutos de prueba.

Finalmente, tras el transcurso de 15 minutos desde el inicio del experimento, el módulo tiene conexión directa con 9 satélites.

- Resultados obtenidos del módulo GPS a los 15 minutos de prueba:

```
$GPRMC,142252.00,A,4026.63829,N,00341.88268,W,0.228,75.86,070723,,A*
47
$GPVTG,75.86,T,,M,0.228,N,0.423,K,A*0C
$GPGGA,142252.00,4026.63829,N,00341.88268,W,1,09,1.75,720.2,M,50.2,M,
,*44
$GPGSA,A,3,27,02,32,08,10,01,21,,,,,2.77,1.75,2.14*09
$GPGSV,4,1,13,01,37,269,27,02,54,285,33,03,07,207,,07,01,263,*7F
$GPGSV,4,2,13,08,84,023,29,10,38,049,37,14,11,321,,16,17,171,*73
$GPGSV,4,3,13,21,63,297,31,23,05,038,,27,51,113,27,30,01,288,*7C
$GPGSV,4,4,13,32,20,102,19*43
$GPGLL,4026.63829,N,00341.88268,W,105152.00,A,A*75
```

En el momento de la finalización del test, el equipo ha sido capaz de conectar con un máximo de 9 satélites de forma simultánea y con 4 satélites dopados. En este punto, la precisión de los datos obtenidos, tanto de longitud como de latitud, son mucho más precisos que los obtenidos en el apartado anterior, puesto que el módulo tiene conexión con más del doble de satélites.

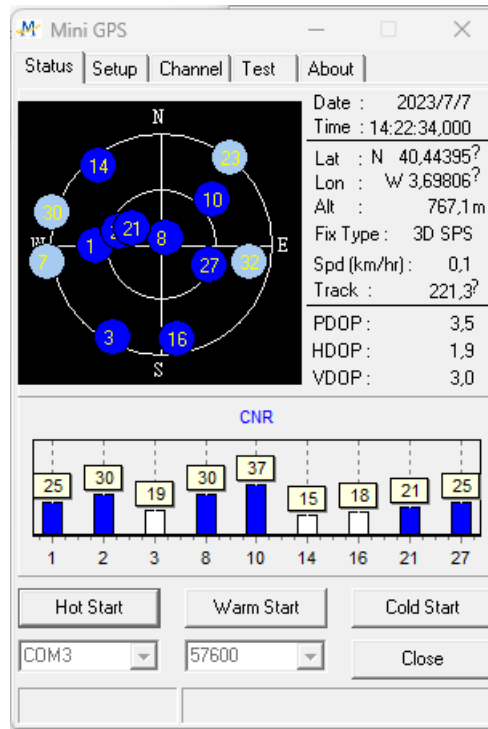


Figura 4-4. Captura del programa MiniGPS a los 15 minutos de prueba.

Una vez visto los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el módulo GPS, se pueden obtener varias conclusiones, como son las siguientes:

En primer lugar, para que la veracidad de los mapas con tecnología LoRa se la mayor posible, se necesita que el módulo GPS esté iniciado por un periodo de unos 15 minutos en una ubicación que le permita tener conexión con una mayor cantidad de satélites. De esta forma, aumentan las garantías de que al menos las primeras localizaciones obtenidas sean lo más precisas posibles.

Por otro lado, después de haberse iniciado el recorrido, no se conoce el número de satélites con los cuales tiene visión el equipo. Por tanto, no se puede saber la precisión con la que el módulo GPS obtiene los datos de latitud y longitud.

Cabe destacar que el modelo GPS utilizado, si no se deja de usar por un periodo de tiempo de unos 30 minutos, no necesita de un arranque en frío. Siendo capaz de conseguir conexiones con un número importante de satélites en menor tiempo del visto en este experimento.

Por último, se expone que este mismo experimento ha sido repetido colocando el módulo GPS en la ventana de un piso bajo con una menor cantidad de visión directa del cielo. Tras varios intentos, los resultados obtenidos difieren bastante de los mostrados en este epígrafe, ya que en alguna prueba incluso no se llegó a conseguir ninguna posición válida en el transcurso de los 15 minutos. En la mayoría de los intentos, el número de satélites conectados era inferior a la cantidad de satélites obtenidos realizando el mismo test en un cuarto piso. Por tanto, esto confirma que cuanto mayor es la visión del cielo del módulo GPS, este conectará con más satélites y mejor será la precisión de las posiciones obtenidas.

4.2 Mapas de cobertura con tecnología LoRa

En este apartado se van a mostrar los mapas obtenidos tras realizar las pruebas de cobertura con tecnología LoRa. Además, se representarán las gráficas que relacionan la distancia con el nivel de potencia recibida, RSSI. Se interpretarán los resultados, comparando los mapas y gráficas para ver cómo afectan los 3 parámetros estudiados en este experimento, factor de esparcimiento, potencia transmitida y frecuencia.

Como se ha explicado en el apartado de la metodología, este experimento se ha realizado en 12 ocasiones, con las 12 configuraciones de parámetros diferentes ya mostradas. Siempre se ha realizado de la misma forma. Primero se modificaba el código Arduino con la configuración de parámetros a estudiar, y seguidamente se flashea el código correspondiente en el equipo transmisor y receptor. Con el equipo receptor conectado al ordenador y situado en la posición ya descrita, se iniciaba el recorrido con el equipo transmisor después de esperar 15 minutos para que el módulo GPS conectará con el número máximo de satélites posibles. Toda la información obtenida en el equipo receptor se ha almacenado para generar los siguientes mapas y gráficos.

4.2.1 Mapas

Se van a representar los 12 mapas de cobertura obtenidos según su configuración de parámetros.

- *Spreading factor* 7, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 3 dBm.

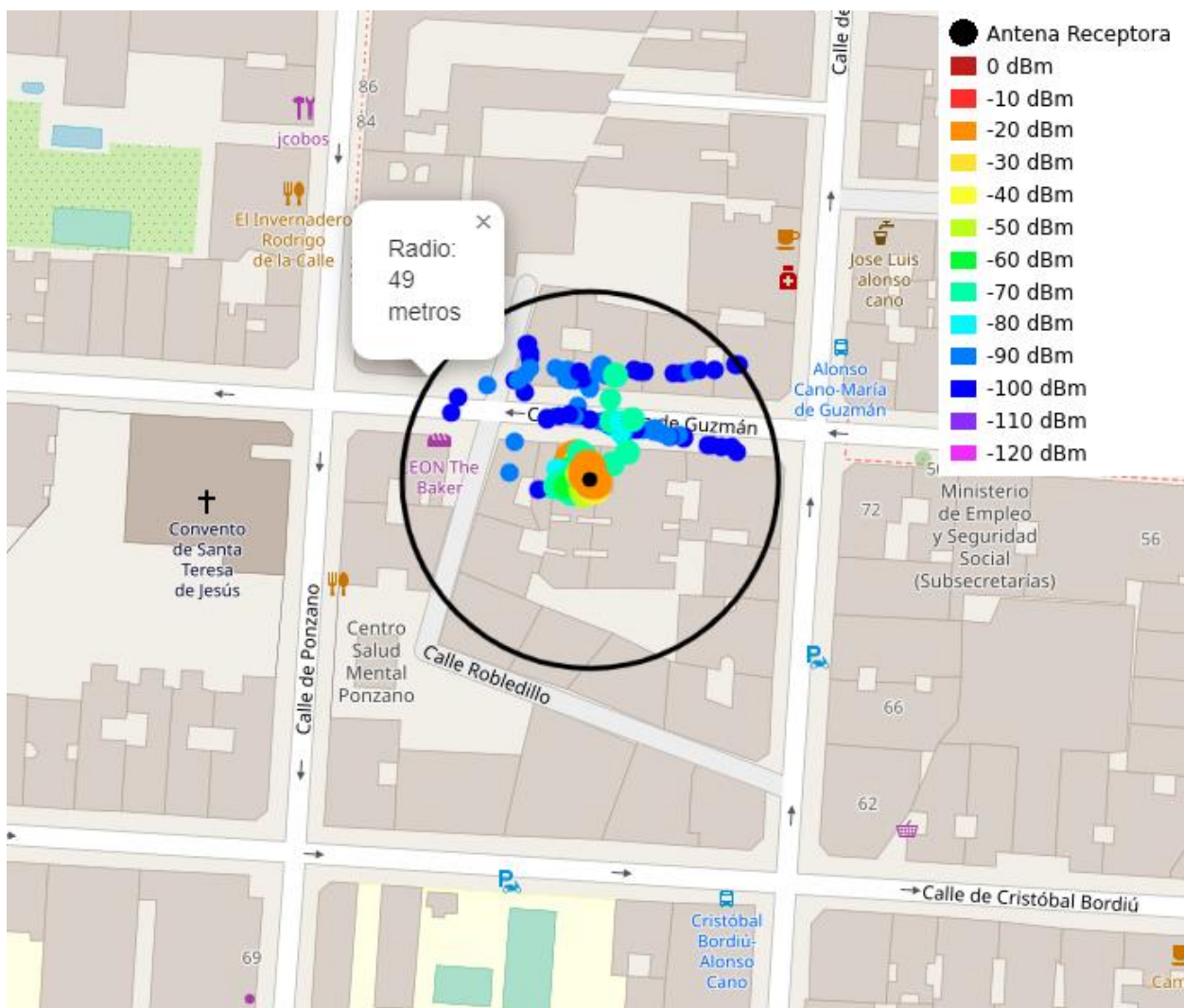


Figura 4-5. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor* 7, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 3 dBm.

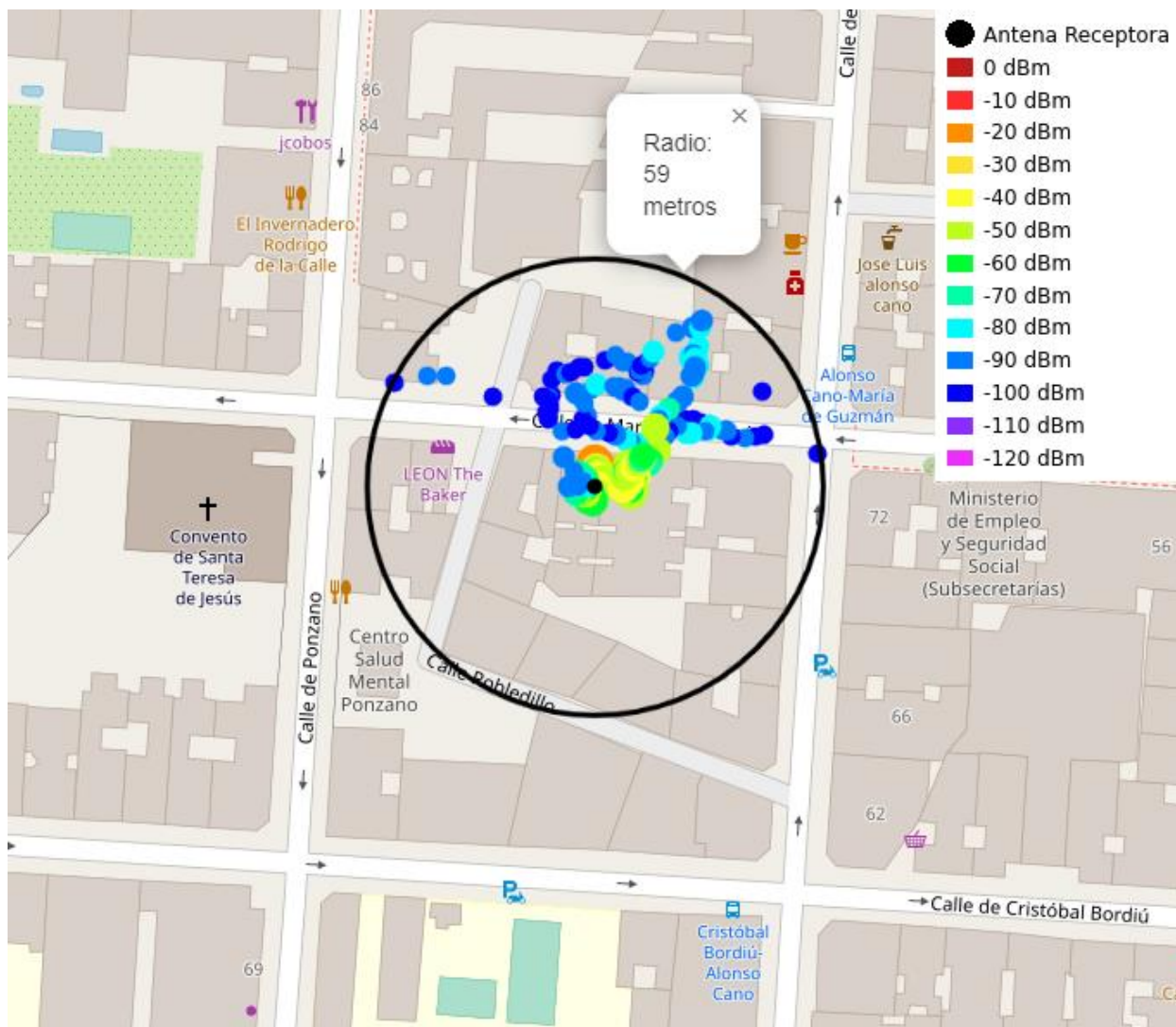


Figura 4-6. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 3 dBm.

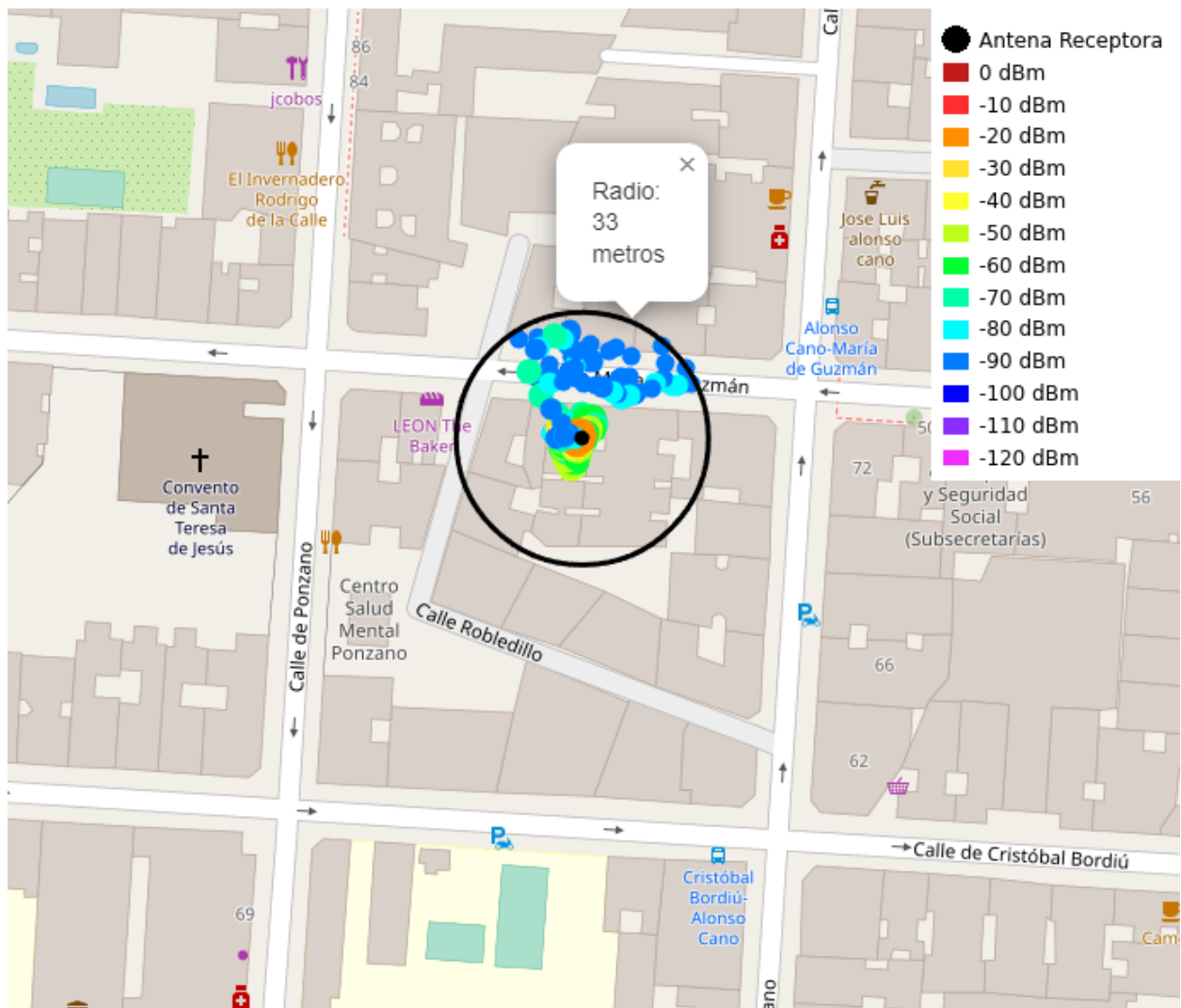


Figura 4-7. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 18,5 dBm.

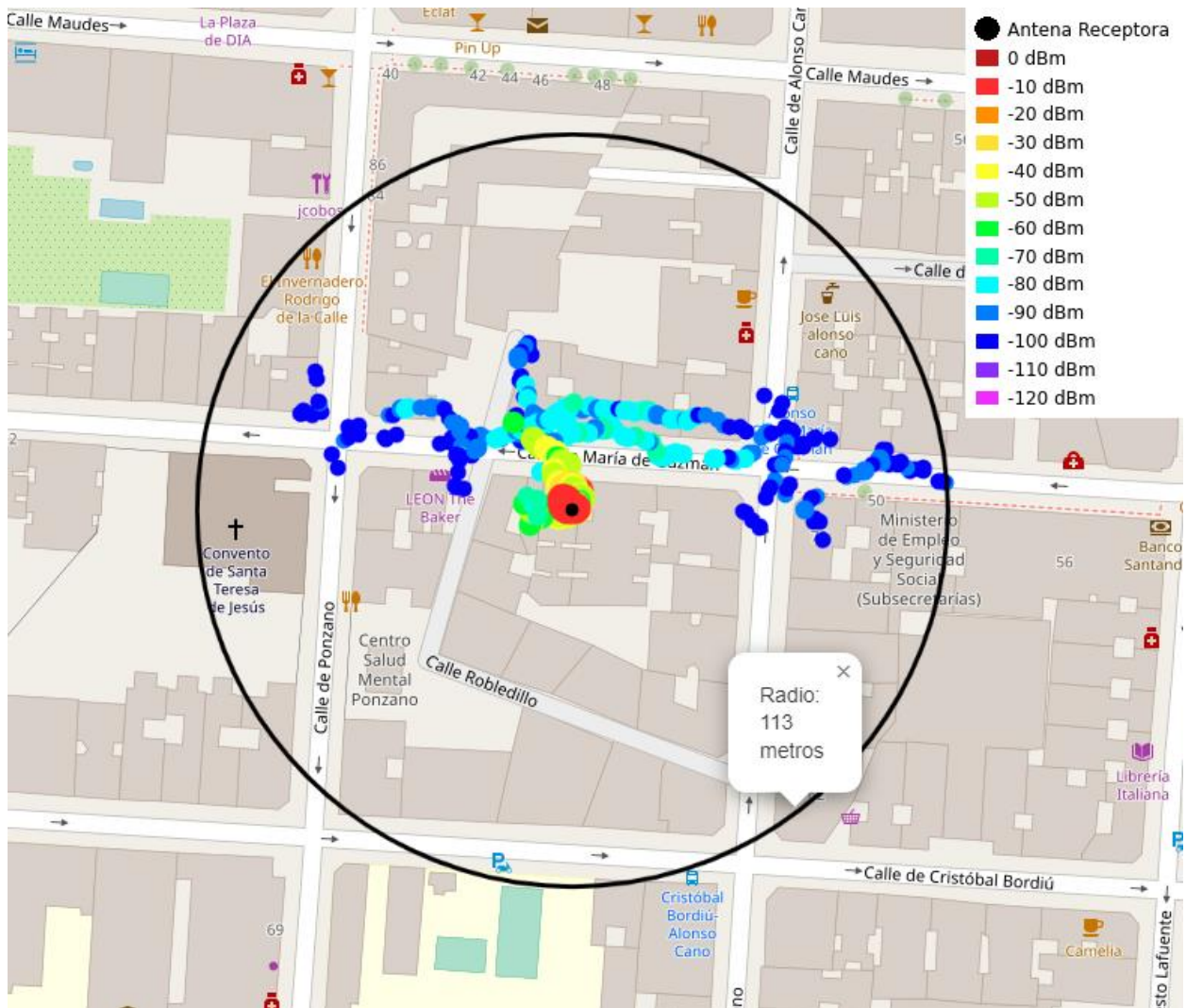


Figura 4-8. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 18,5 dBm.

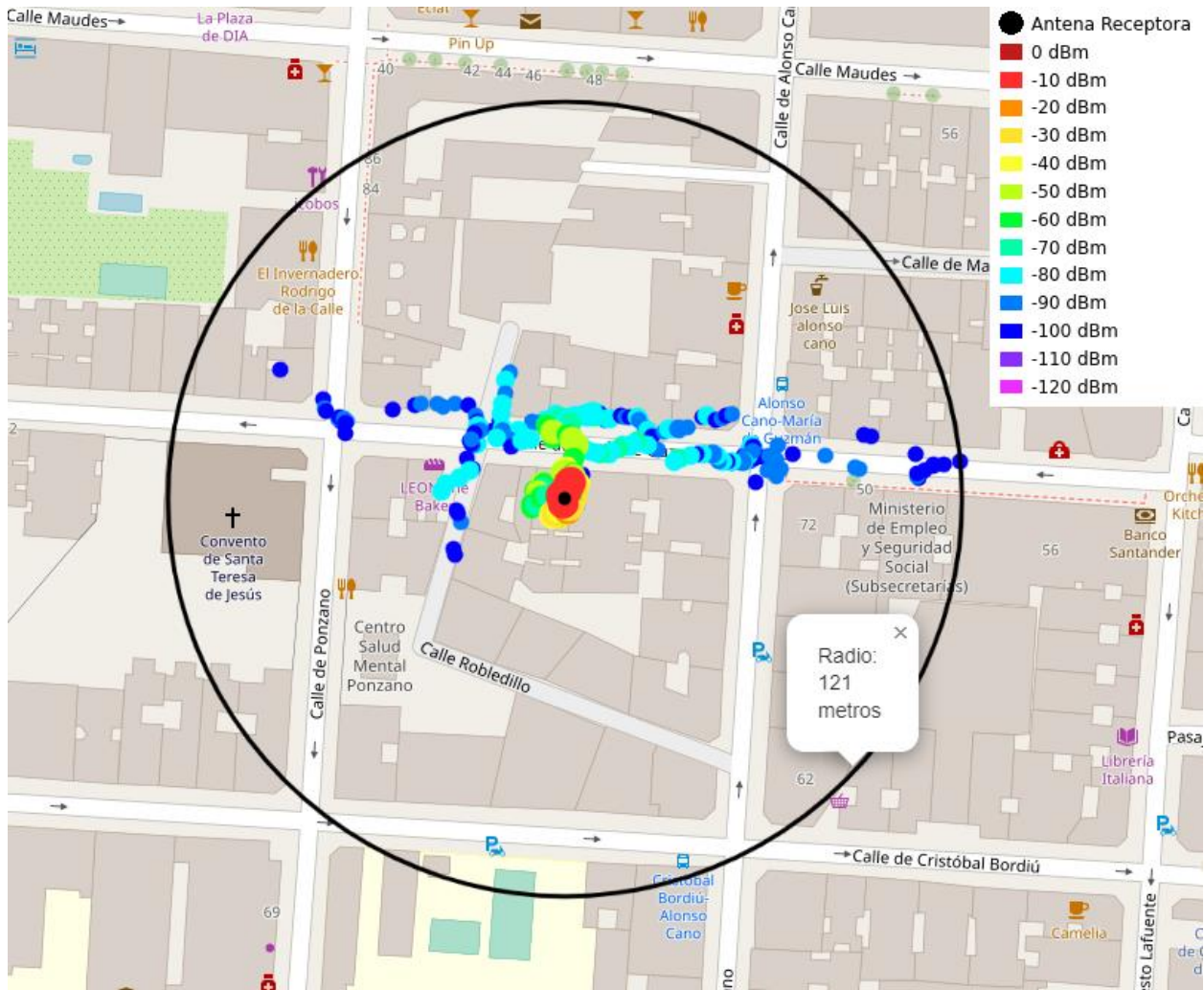


Figura 4-9. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor* 7, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 18,5 dBm.

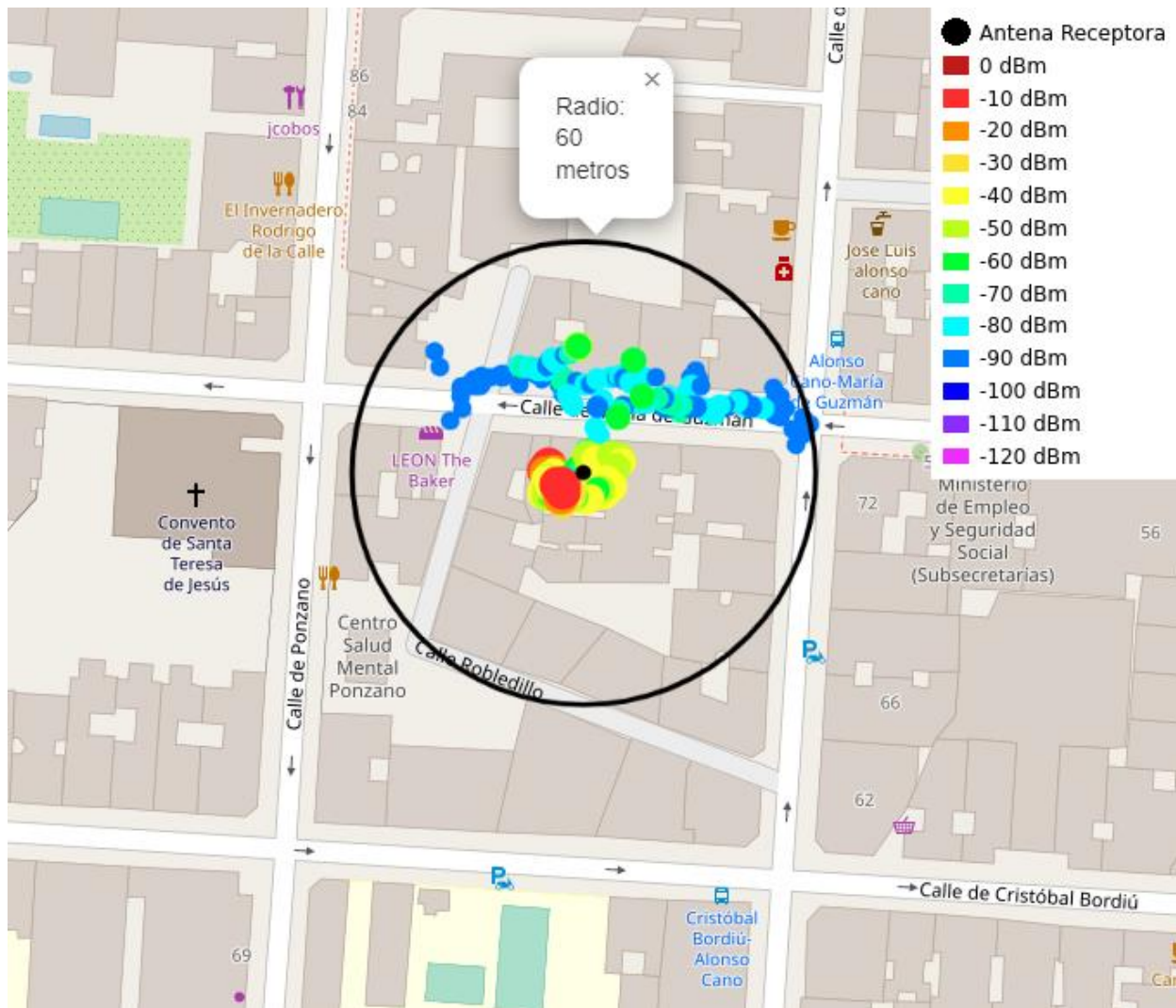


Figura 4-10. Mapa de cobertura LoRa. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- Spreading factor 12, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 3dBm.

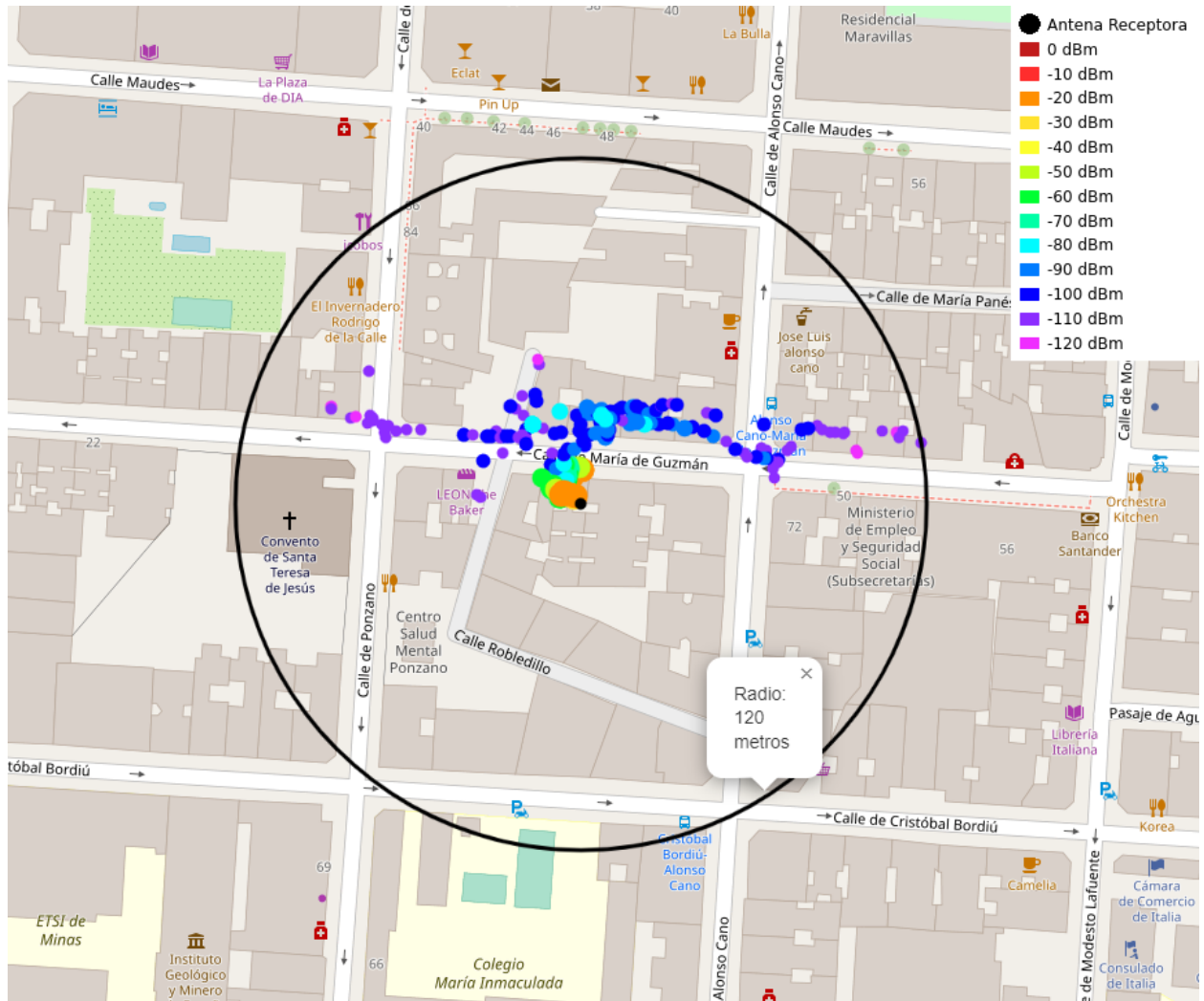


Figura 4-11. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor* 12, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 3dBm.

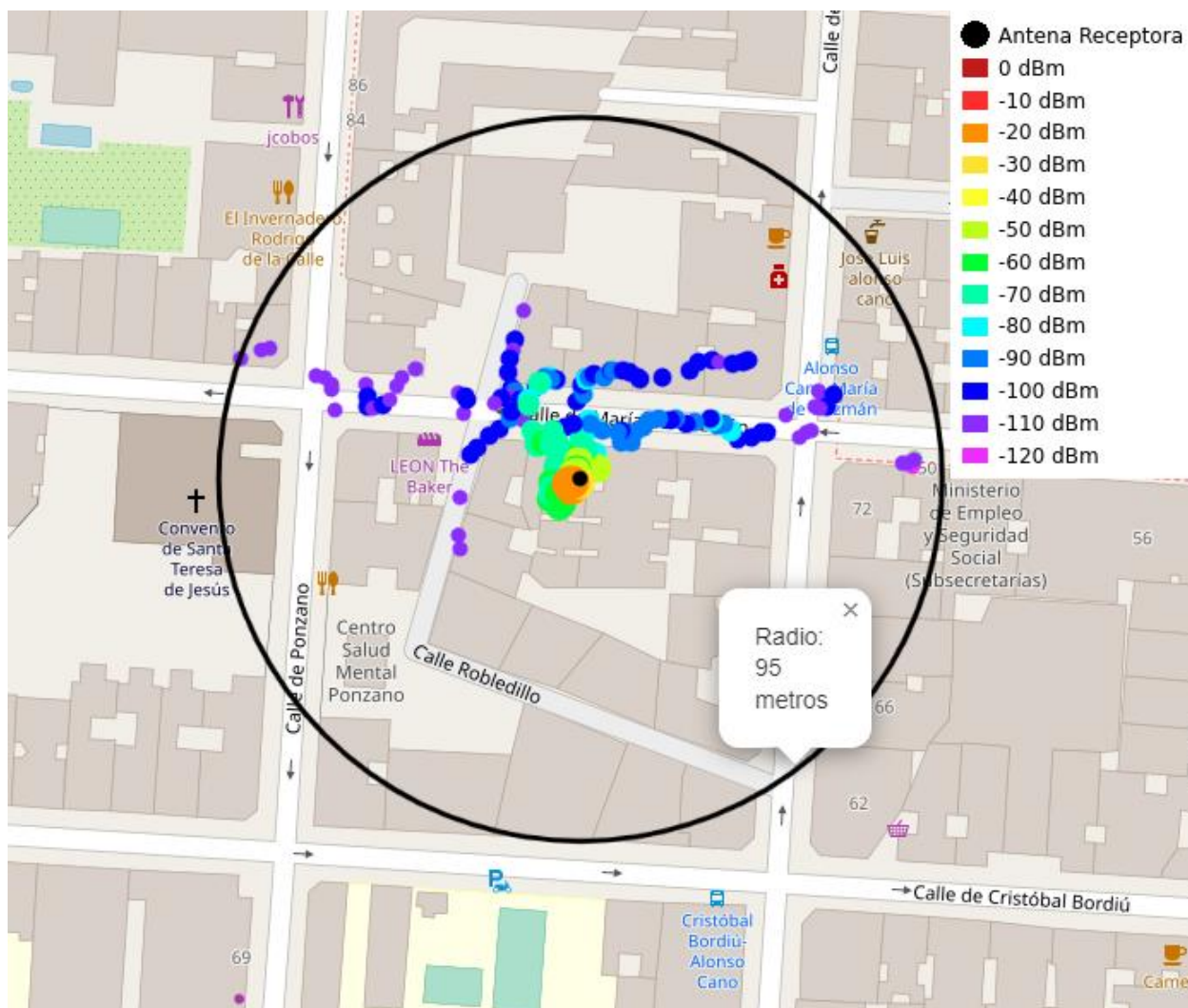


Figura 4-12. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor* 12, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 3dBm.

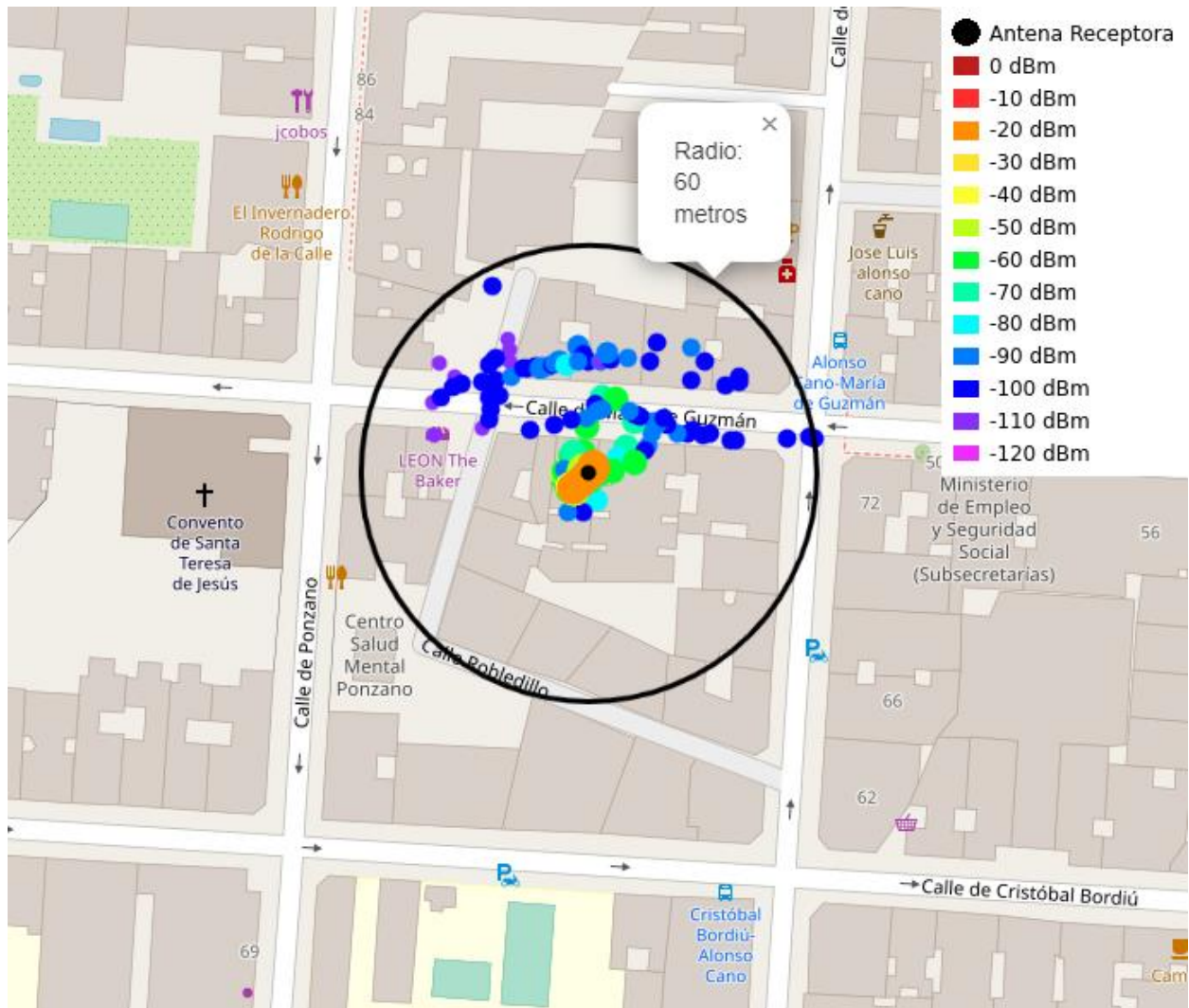


Figura 4-13. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor* 12, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

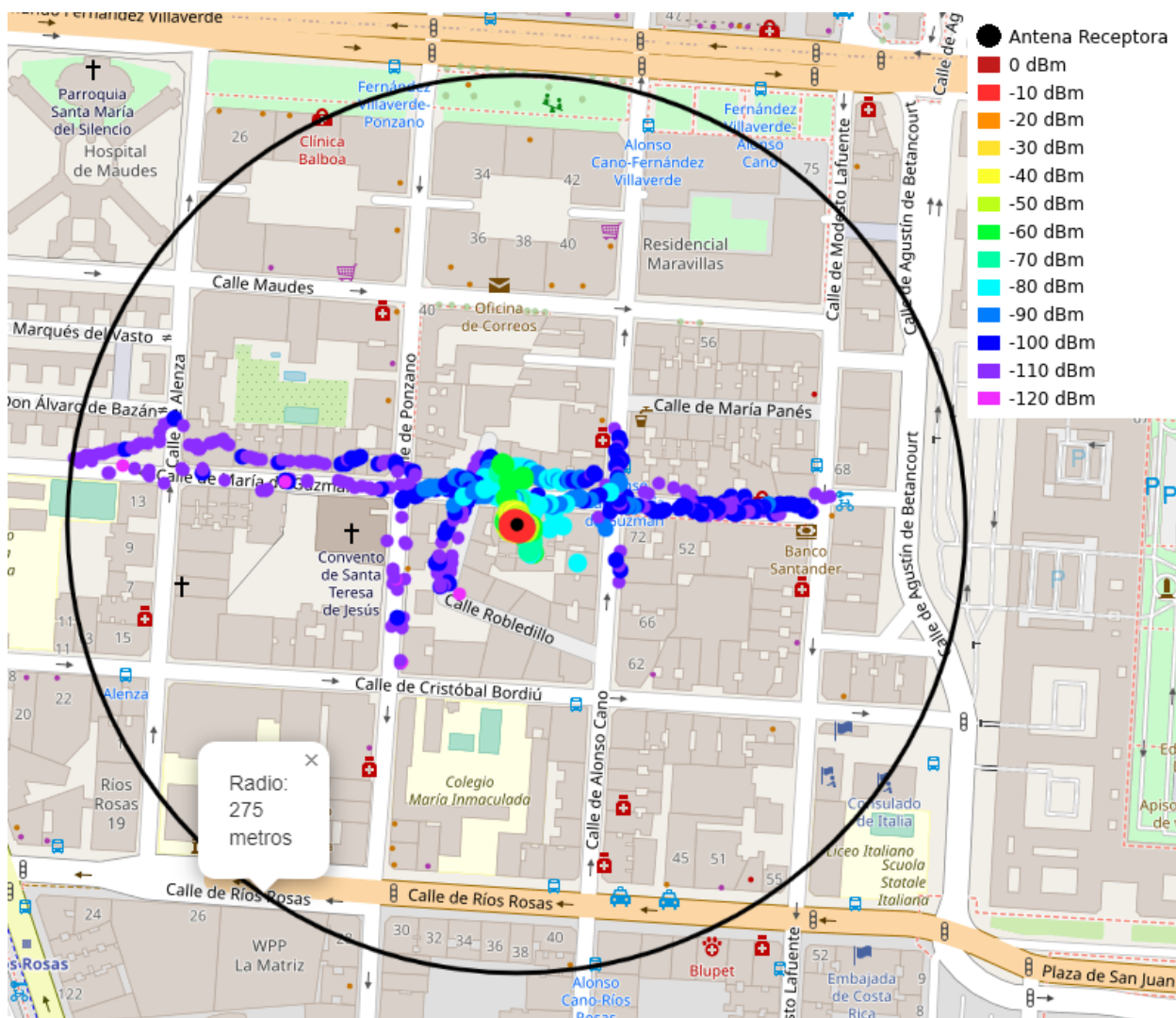


Figura 4-14. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- Spreading factor 12, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

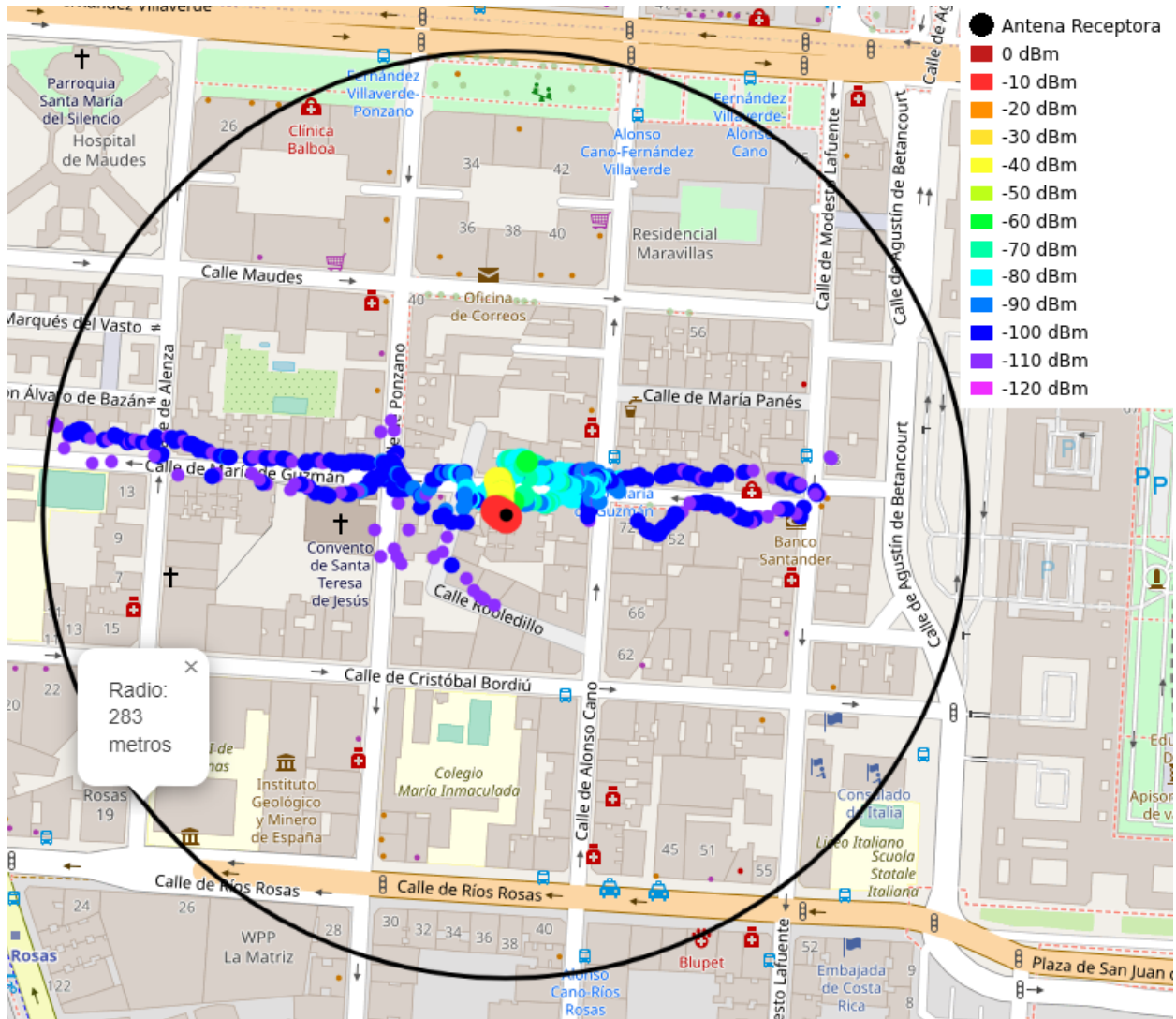


Figura 4-15. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor* 12, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

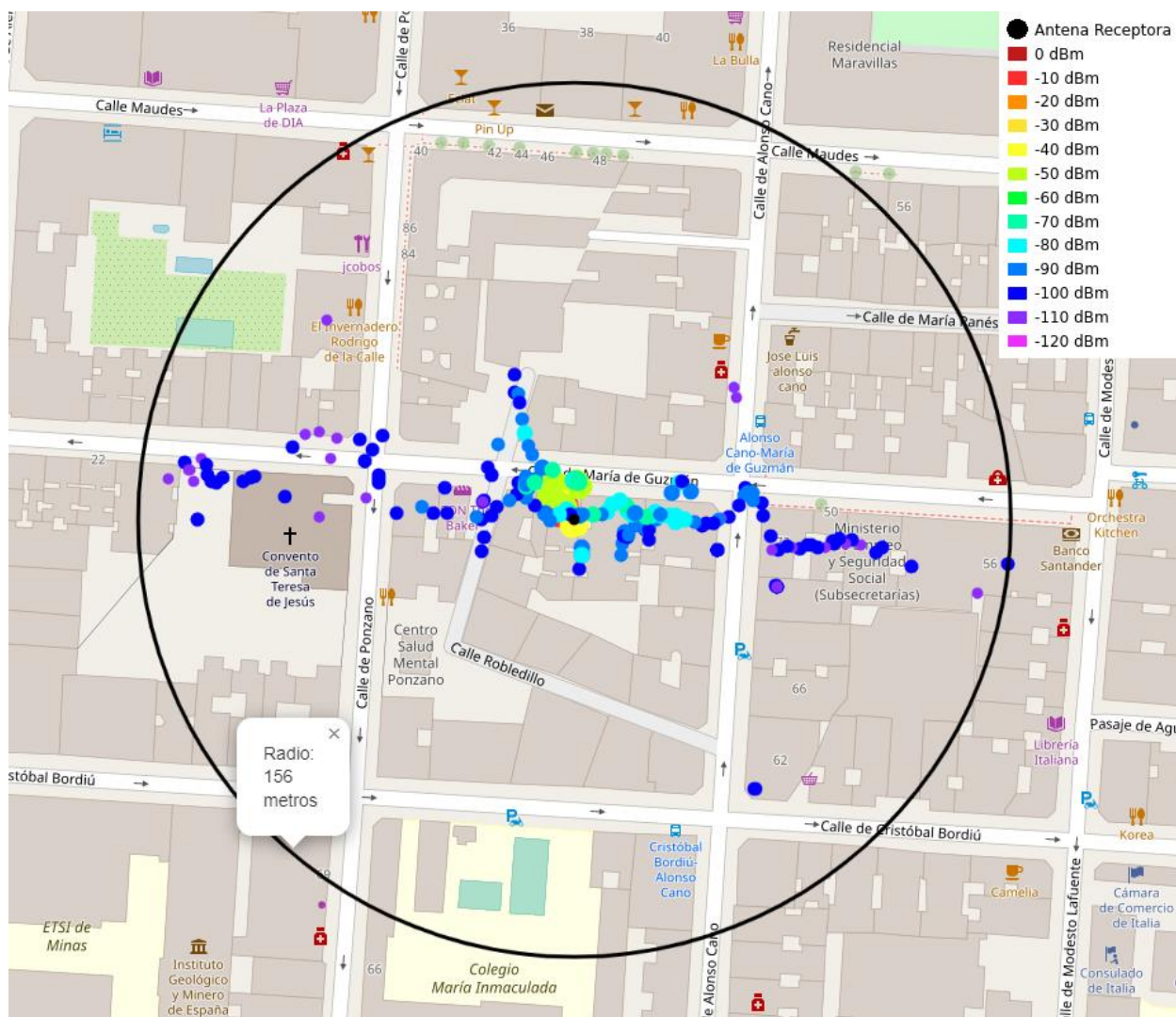


Figura 4-16. Mapa de cobertura LoRa. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

Si se observan los mapas, independientemente de la configuración de parámetros utilizada, se puede apreciar con claridad que la mayoría de las conexiones obtenidas se dan en una misma ubicación. La antena se sitúa en la ventana de un cuarto piso con vistas a la calle en la que mayor número de conexiones se obtienen. Durante el recorrido, cada vez que se toma una perpendicular a la calle en la que se encuentra el equipo receptor, la conexión entre ambos equipos se pierde. Esto se debe a que prácticamente todos los edificios de la zona son más altos, por tanto, actúan como obstáculos entre ambos equipos, aumentando las pérdidas hasta el punto de perderse la conexión de forma casi instantánea al no tener visión directa de una antena con otra.

A parte de esto, tanto la calle en la que se encuentra el equipo receptor como las aledañas, tienen una gran cantidad de árboles en ambas aceras, aumentando así las dificultades para que exista visión entre ambos equipos e incrementándose las pérdidas.



Figura 4-17. Imagen de la calle en la cual se obtiene el mayor número de comunicaciones.

4.2.2 Relación entre distancia y RSSI

Con los datos obtenidos experimentalmente, se calcula la distancia entre la antena receptora y la posición de la antena transmisora en cada comunicación. Esta información, junto con la potencia de señal recibida, RSSI, se utiliza para generar un gráfico que enfrente estos dos valores, y permita ver con claridad cual es la relación entre la distancia y la potencia recibida.

Se expondrán las 12 figuras correspondientes a esta relación dependiendo de la configuración de parámetros utilizada. Por último, se interpretará matemáticamente las gráficas, explicando su forma.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 3dBm.

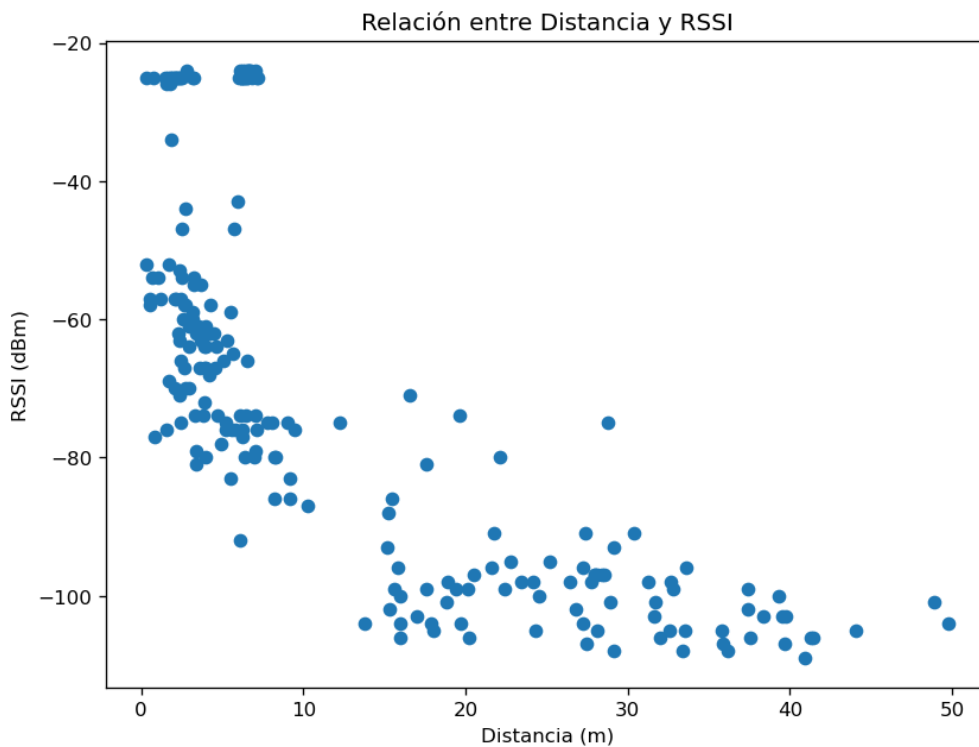


Figura 4-18. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 3dBm.

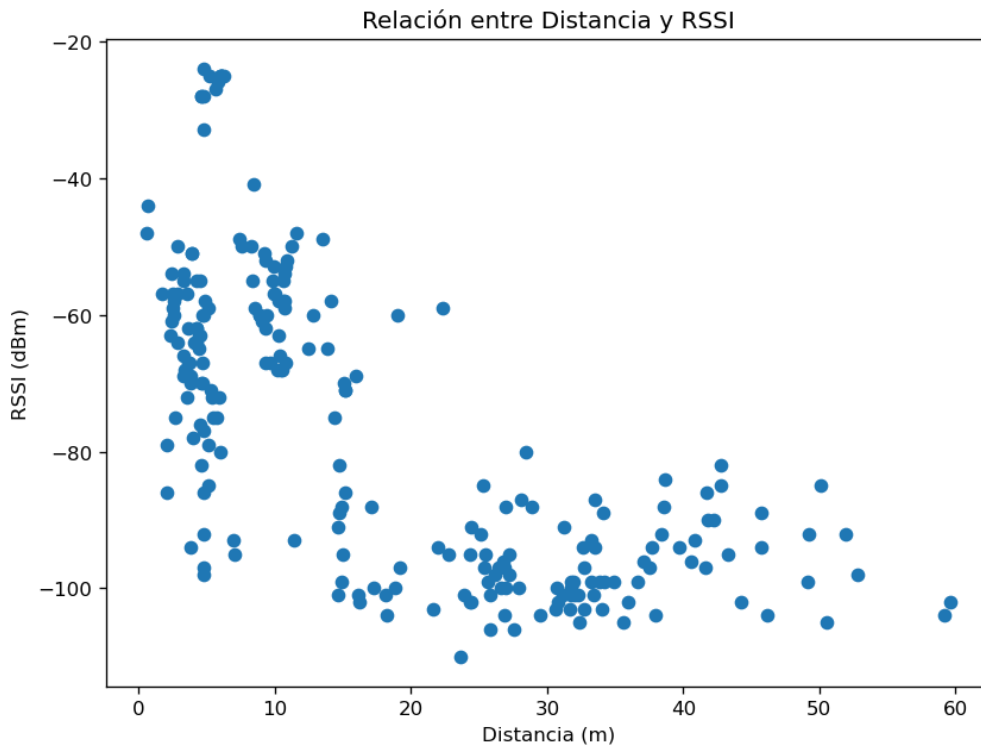


Figura 4-19. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 3dBm.

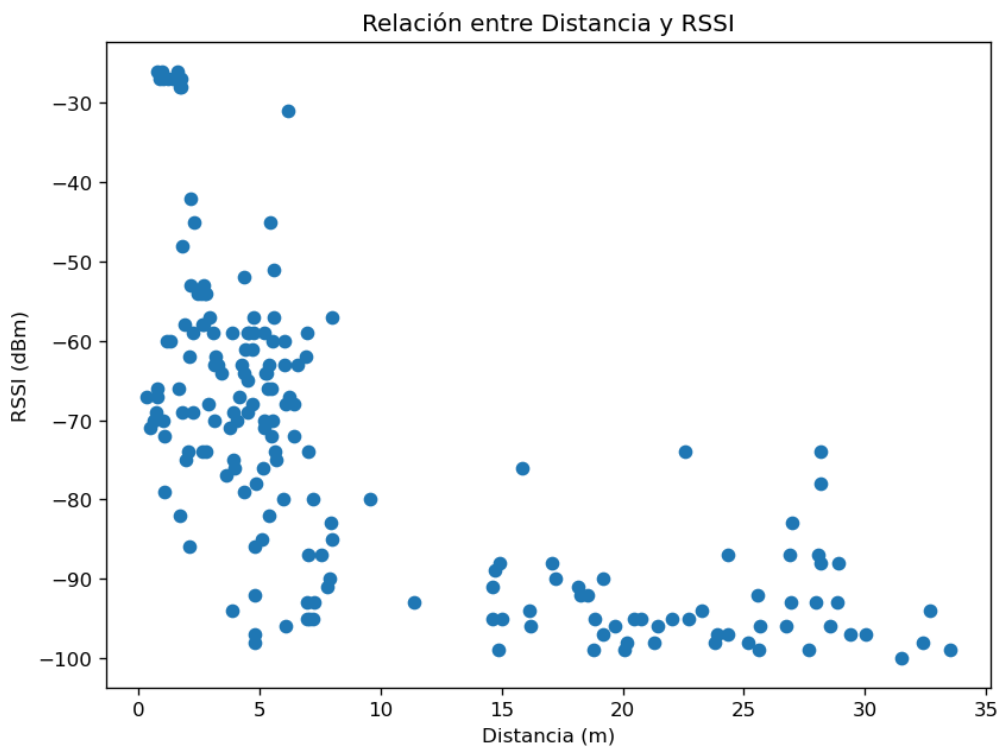


Figura 4-20. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

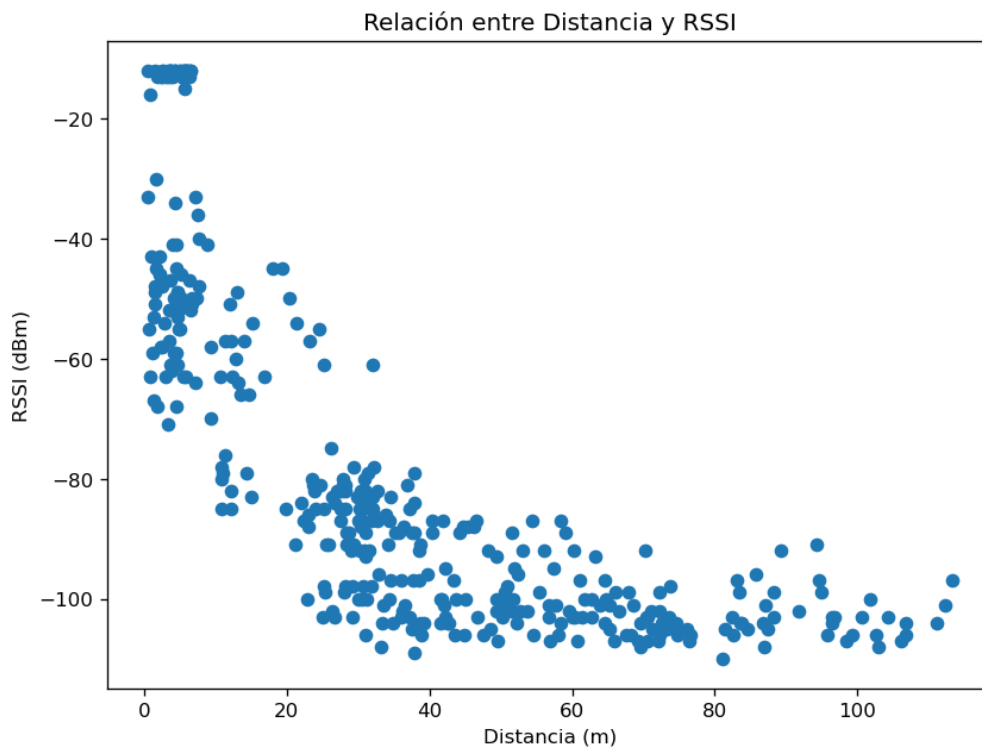


Figura 4-21. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

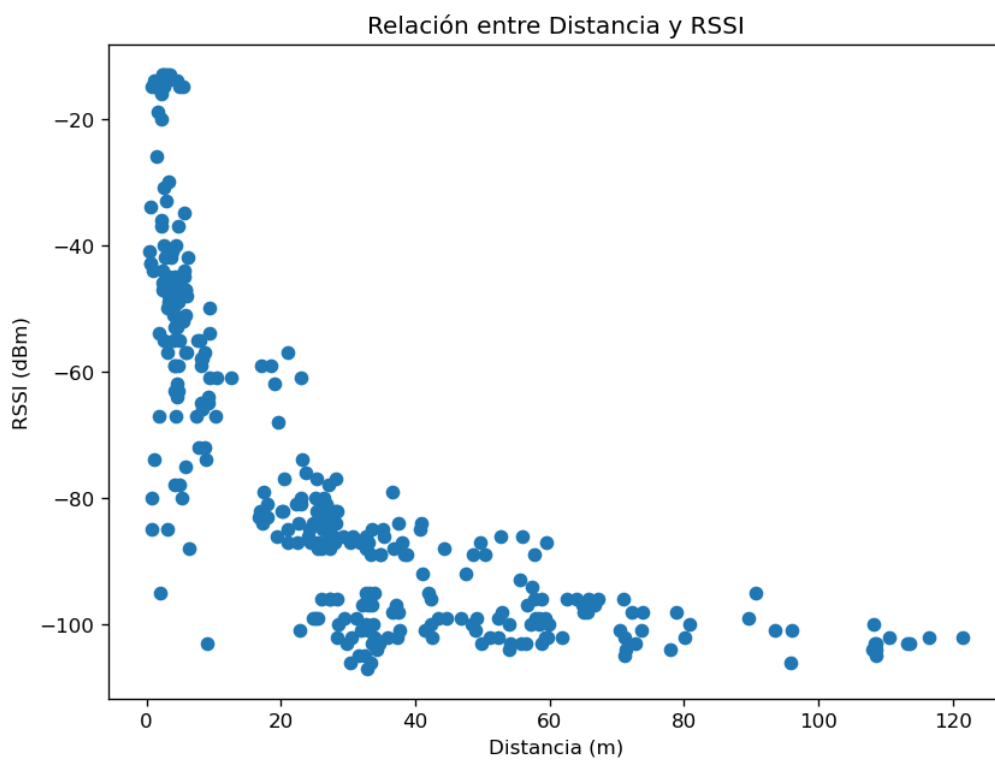


Figura 4-22. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor 7*, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

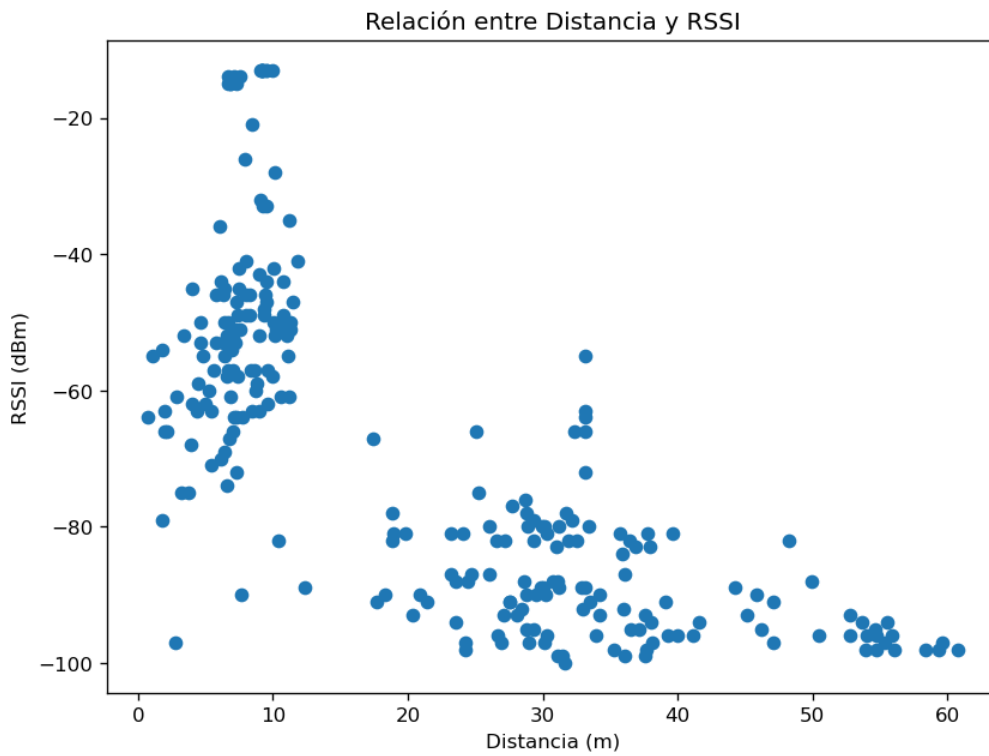


Figura 4-23. Relación entre la distancia y RSSI. SF 7, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor 12*, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 3dBm.

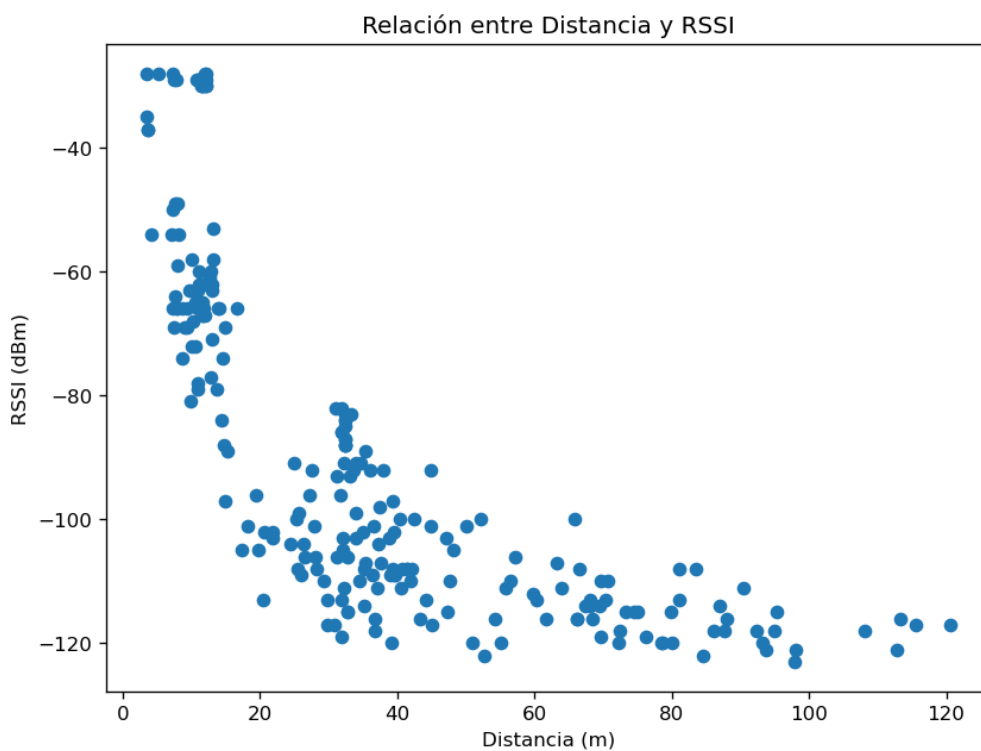


Figura 4-24. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor* 12, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 3dBm.

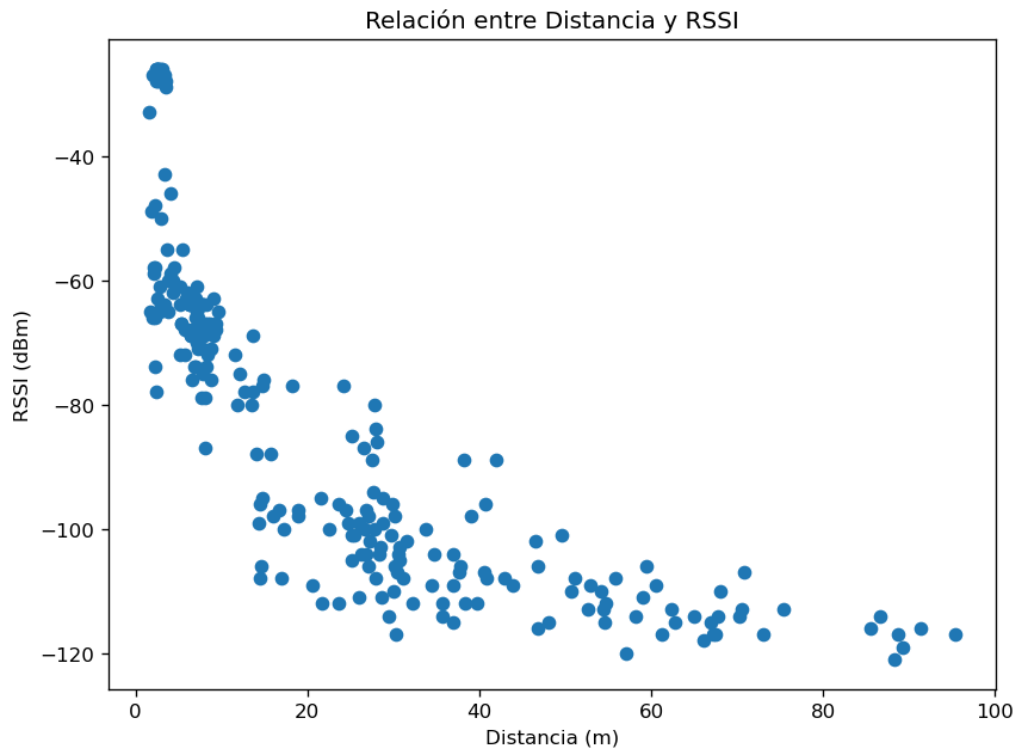


Figura 4-25. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor* 12, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 3dBm.

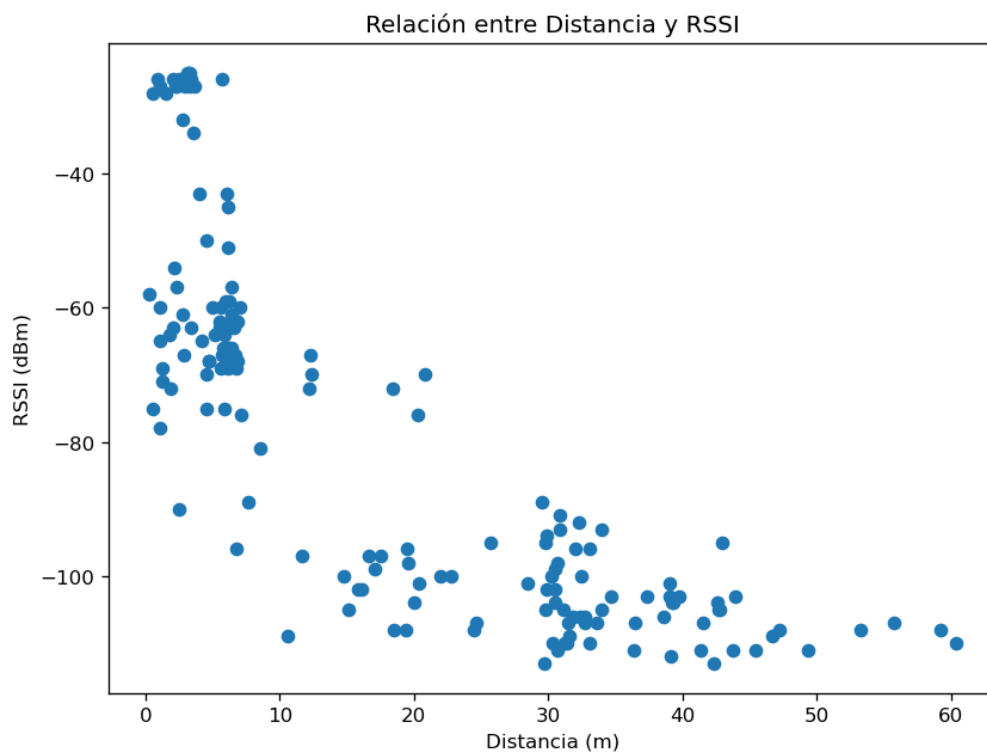


Figura 4-26. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 3 dBm.

- *Spreading factor 12*, frecuencia 902 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

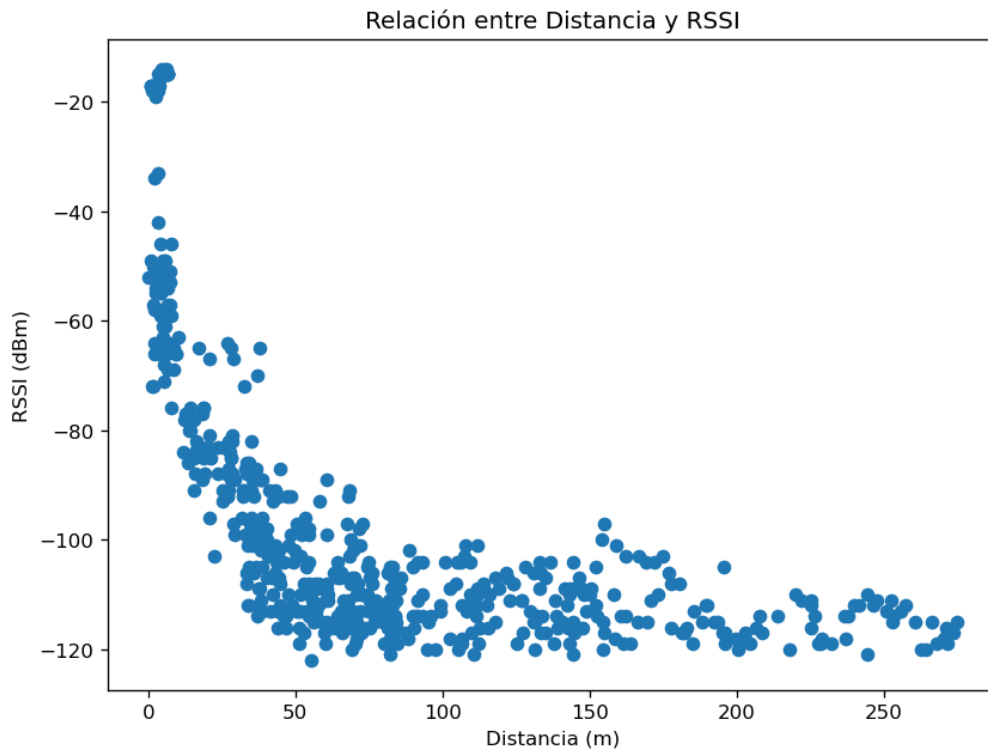


Figura 4-27. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 902 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor 12*, frecuencia 915 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

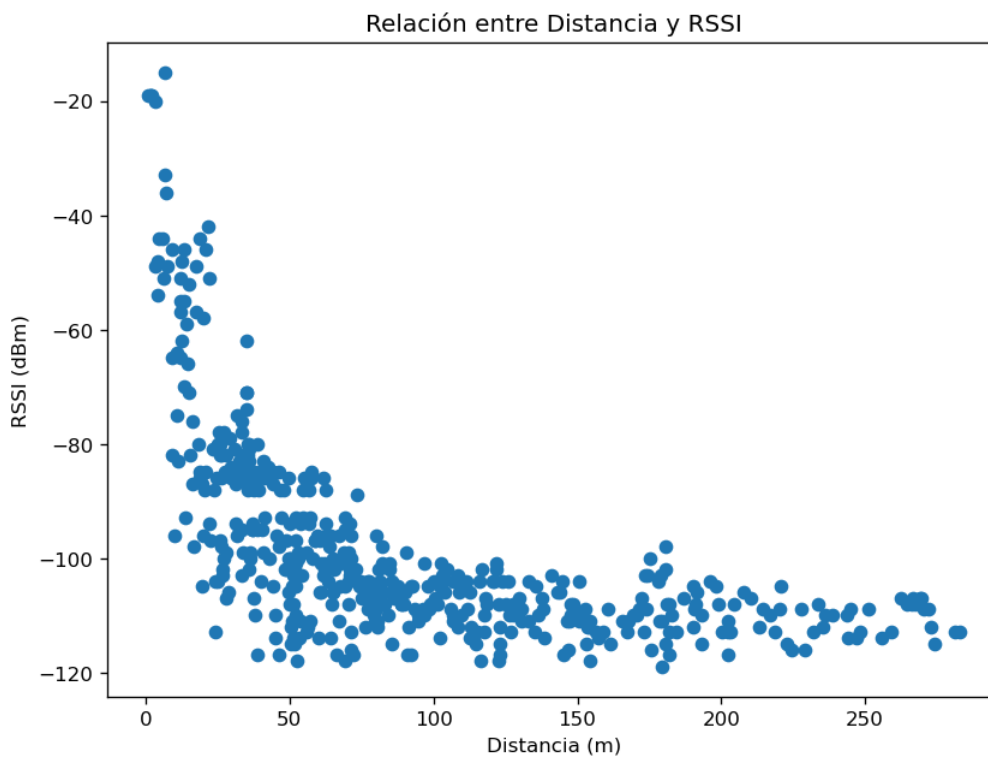


Figura 4-28. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 915 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

- *Spreading factor* 12, frecuencia 928 MHz, potencia transmitida 18,5dBm.

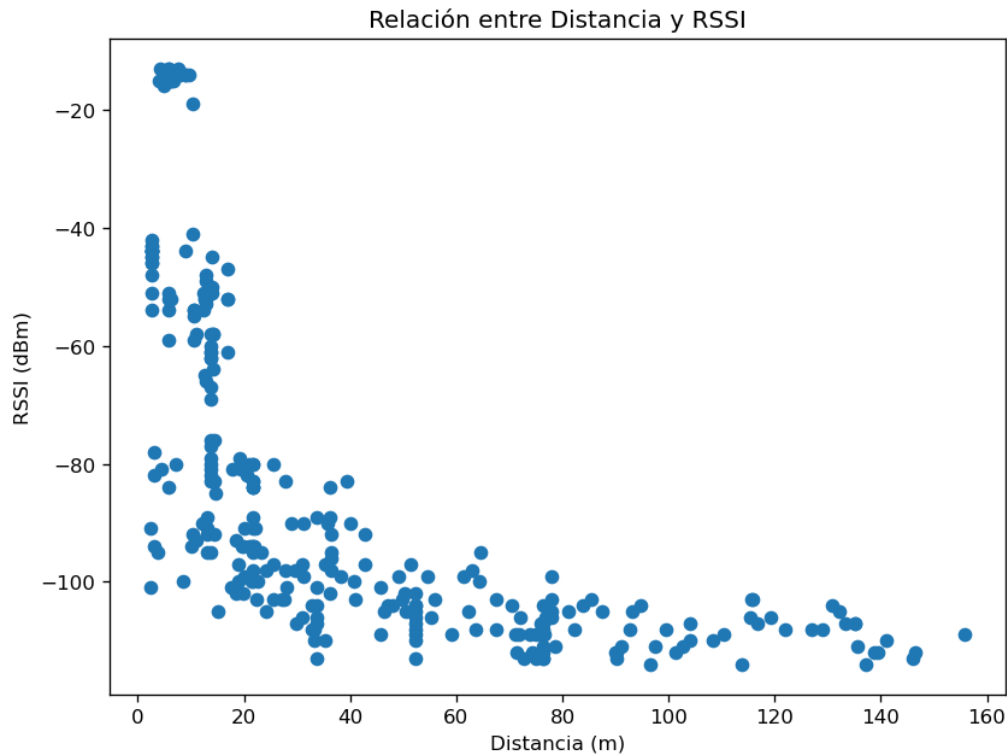


Figura 4-29. Relación entre la distancia y RSSI. SF 12, Frecuencia 928 MHz, P_{TX} 18,5 dBm.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, todas siguen el mismo patrón, a medida que la distancia aumenta la potencia de señal recibida desciende exponencialmente generando una curva. Al estar en un entorno urbano, las reflexiones generadas por los obstáculos hacen que esta curva no sea una línea delgada y precisa, sino que existe cierta dispersión en los valores.

Además de las reflexiones, existen otros problemas que afectan a las gráficas. En algunos casos, la curva es más difícil de ver ya que dependiendo de la configuración de parámetros utilizada, la conexión entre ambos equipos es peor, por lo que la cantidad de mensajes recibidos disminuye y la gráfica no llega a ser tan precisa como en otros casos. En adición, las interferencias generadas por transmitir en una banda de frecuencia ocupada junto con la posibilidad de que el módulo GPS no obtenga los datos de localización más precisos posibles, hacen que en algunas figuras se pueda apreciar más dispersión de lo normal.

A modo de validación, mencionar que la envolvente sigue la siguiente expresión matemática [27]:

$$\varepsilon = r - f - 10\eta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4-1)$$

Siendo ε la pérdida de propagación en dB, r la potencia de señal recibida en dB, f la frecuencia de la señal en Hz, η el factor de ajuste, d la distancia entre el receptor y emisor y d_0 la distancia de referencia.

Obteniéndose una gráfica, con el mismo tipo de envolvente que las ya representadas a diferencia de que en este caso los valores RSSI se han tomado positivos.

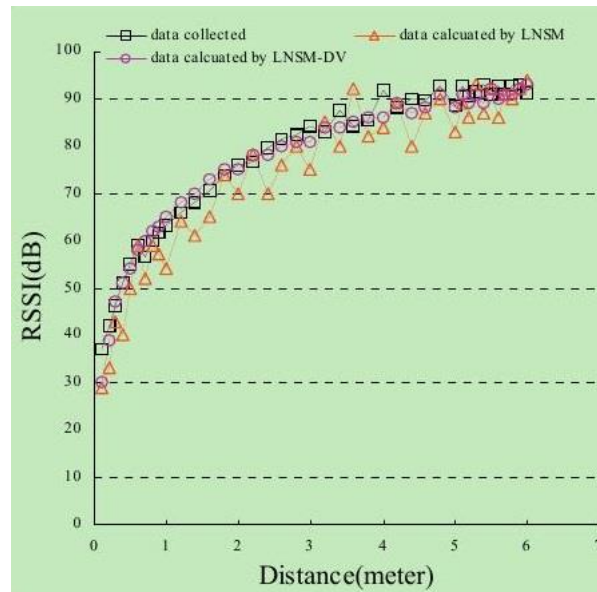


Figura 4-30. Representación de la envolvente en relación entre la distancia y RSSI [4].

4.2.3 Interpretación de los resultados

Durante los siguientes epígrafes se van a interpretar los resultados obtenidos tanto en los mapas de cobertura como en las gráficas, desde el punto de vista de cada parámetro estudiado en el proyecto.

4.2.3.1 Efecto del *spreading factor*

En la introducción de LoRa, se ha podido ver el efecto teórico esperado en cuanto al factor de esparcimiento o *spreading factor*. Si hacemos un breve repaso, este parámetro permite espaciar los datos transmitidos de forma que el receptor sea capaz de escuchar a una mayor distancia o en entornos con mucho ruido. Si llevamos esto al experimento realizado, se espera que, al aumentar el factor de esparcimiento, se consigan obtener datos de cobertura a más distancia.

Para ver gráficamente el efecto de este parámetro, se compararán algunos mapas obtenidos con la misma configuración de potencia y frecuencia, pero diferente *spreading factor*. El siguiente es uno de los casos más llamativos. Se representa el *spreading factor* mínimo a la izquierda y el máximo a la derecha.

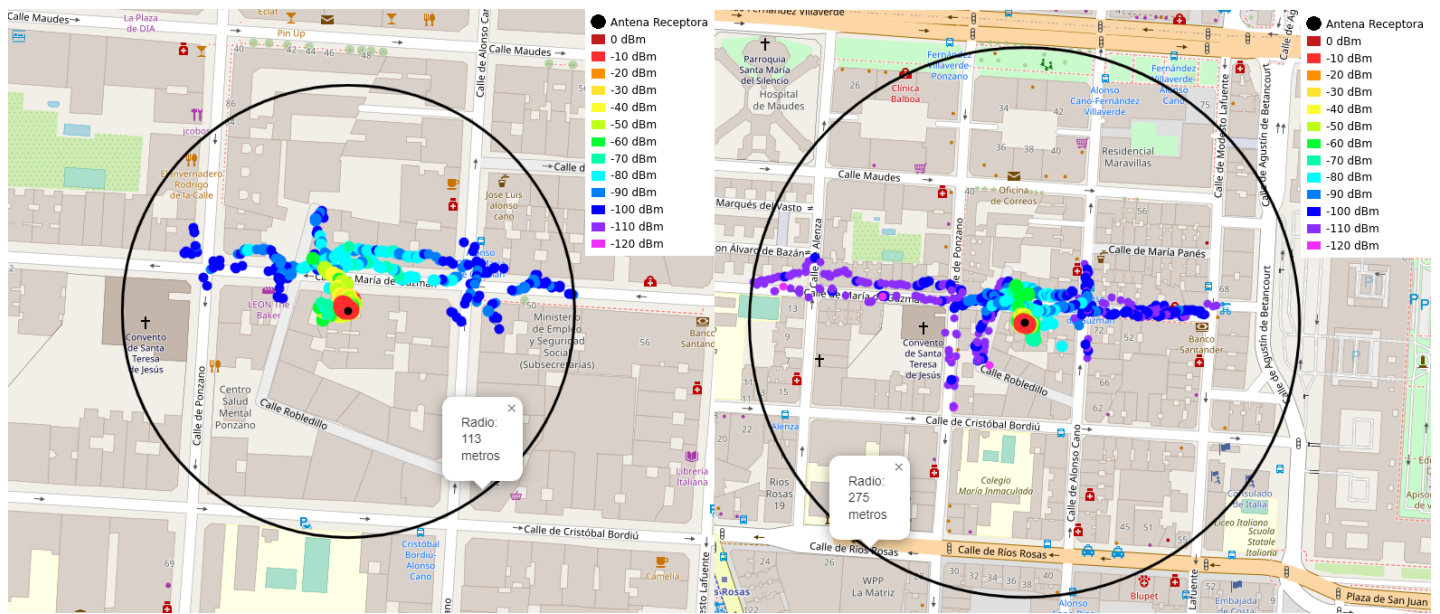


Figura 4-31. Comparativa entre SF=7, figura 4-8 (izquierda) y SF=12, figura 4-14 (derecha).

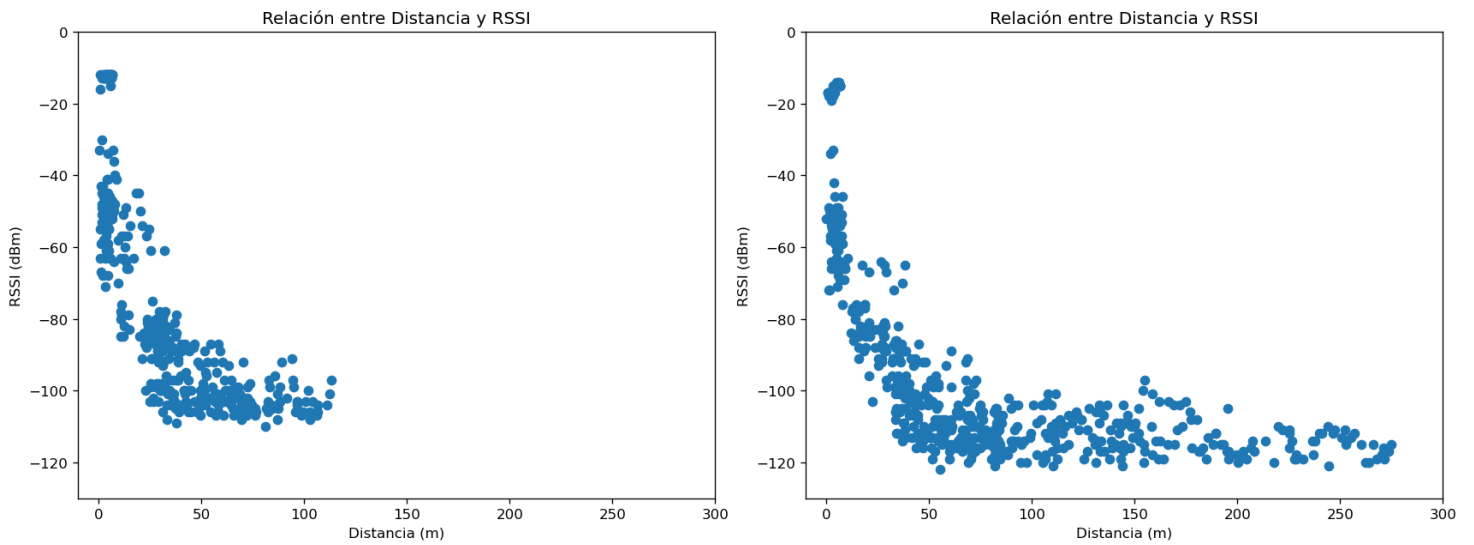


Figura 4-32. Comparativa entre SF=7, figura 4-20 (izquierda) y SF=12, figura 4-26 (derecha).

Con la configuración de 902 MHz de frecuencia y 18,5 dBm de potencia transmitida, al cambiar del *spreading factor* mínimo al máximo se pasa de tener conexiones a una distancia máxima de 113 metros a superar los 270 metros. El efecto del factor de esparcimiento también afecta a la sensibilidad del receptor, dado que al configurar los equipos con el *spreading factor* mínimo, no se recibe ninguna transmisión por debajo de los -110 dBm, mientras que al usar el factor de esparcimiento máximo se obtienen valores inferiores a los -120 dBm.

Asimismo, se puede apreciar que el número de comunicaciones realizadas utilizando el *spreading factor* máximo es superior. Esto puede parecer algo contradictorio debido a que al aumentar este parámetro estamos esparciendo más las transmisiones, por lo que la cantidad de paquetes transmitidos disminuye. La explicación sería que, aunque se transmitan menos paquetes, al aumentar el *spreading factor* el equipo transmisor y receptor están más tiempo comunicándose entre sí por lo que finalmente, la cantidad de envíos recibidos es superior.

Estos resultados aplican para cualquiera de las comparaciones realizables modificando únicamente el factor de esparcimiento. En el siguiente ejemplo con una configuración de 928 MHz y potencia transmitida de 18,5 dBm, la diferencia de alcance máximo es de casi 100 metros y los valores de RSSI mínimos pasan de no llegar a -100 dBm a ser inferiores a los -110 dBm.

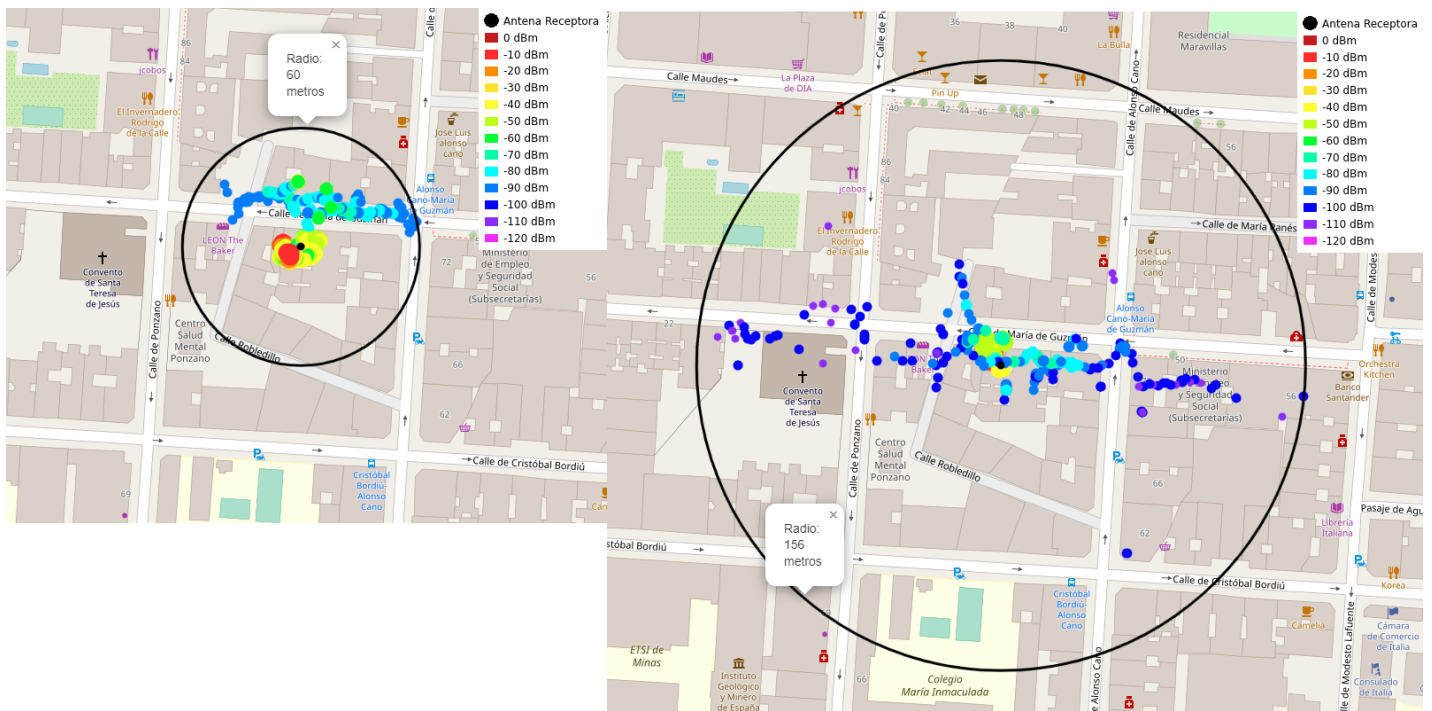


Figura 4-33. Comparativa entre SF=7, figura 4-10 (izquierda) y SF=12, figura 4-16 (derecha).

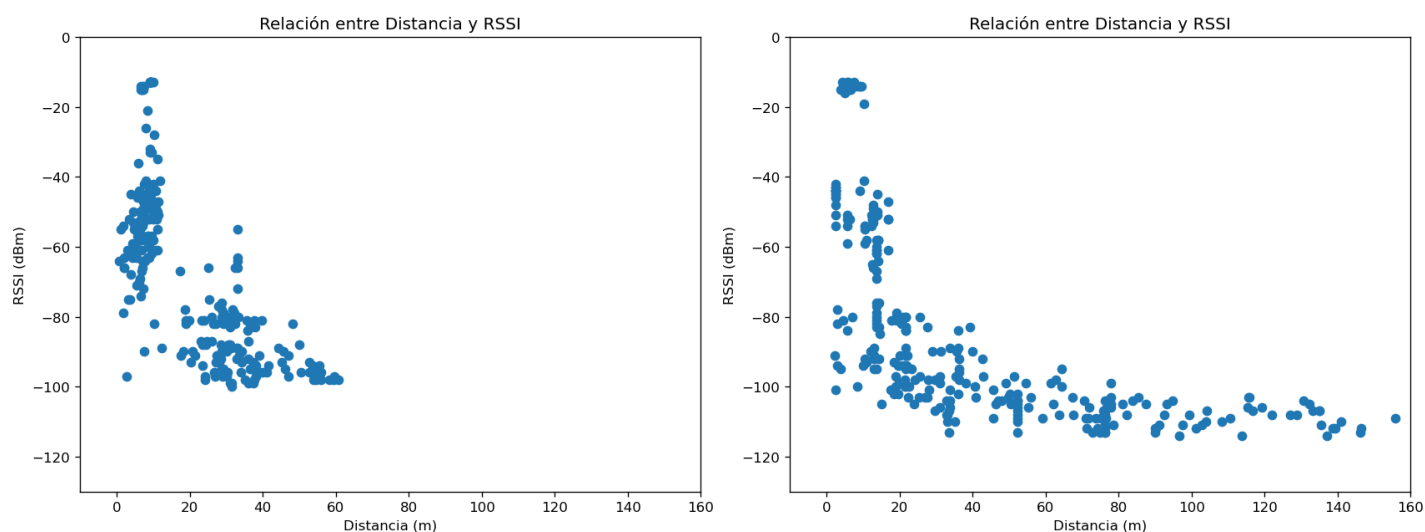


Figura 4-34. Comparativa entre SF=7, figura 4-22 (izquierda) y SF=12, figura 4-28 (derecha).

A modo de conclusión, se puede decir que se ha demostrado experimentalmente, que al aumentar el *spreading factor* se consiguen conexiones a una mayor distancia y se obtienen valores inferiores de RSSI. Por contra, mencionar que el aumento del factor de esparcimiento produce un incremento en el consumo energético, aunque al tratarse de transmisiones LoRa este aumento no suele ser muy significativo.

4.2.3.2 Efecto de la potencia transmitida

En esta sección se va a proceder de la misma forma que el apartado anterior, mediante comparativas entre las figuras ya vistas, se demostrará el efecto de la potencia transmitida en las comunicaciones LoRa.

En el marco teórico de este trabajo, se ha podido ver que al aumentar la potencia de transmisión se consiguen comunicaciones a mayor distancia. Comparando configuraciones en las que sólo se modifica la potencia se puede ver experimentalmente este efecto.

El ejemplo donde más claro se puede ver este efecto es en la configuración de frecuencia 915 MHz y SF 12. Se representa la potencia transmitida mínima a la izquierda y la máxima a la derecha.

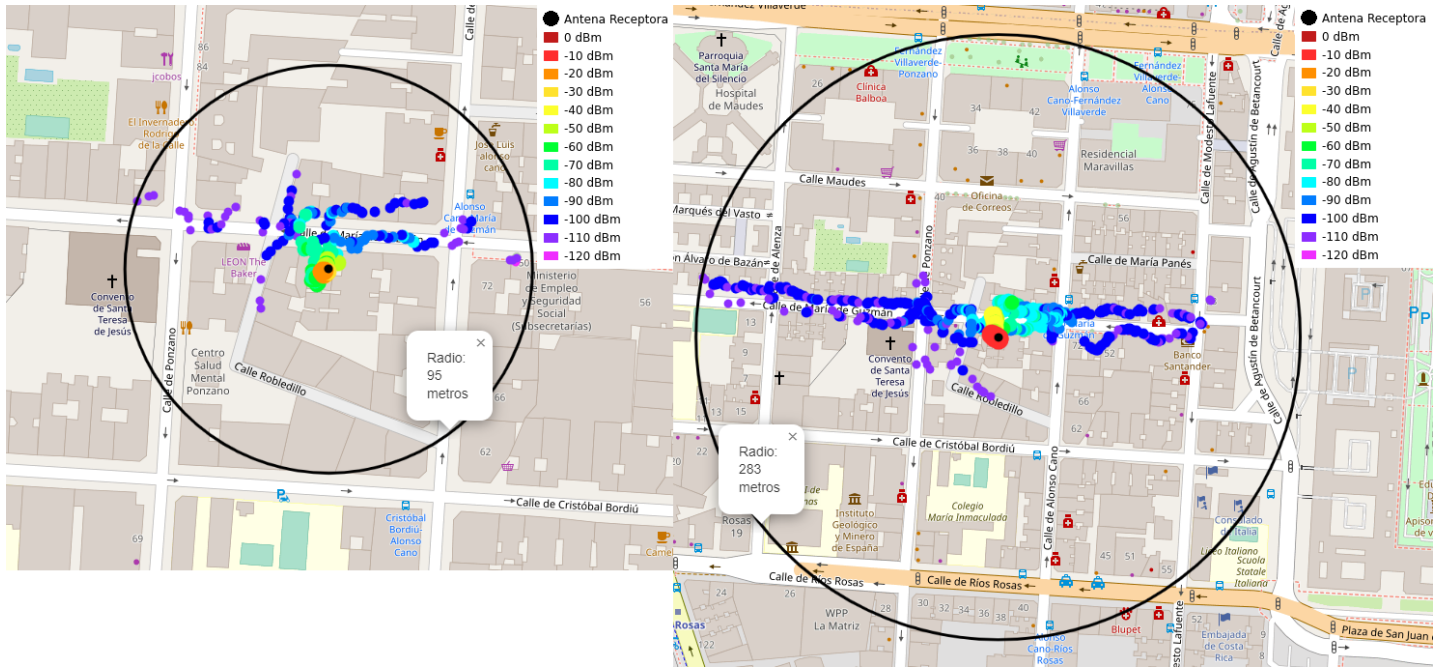


Figura 4-35. Comparativa entre $P_{TX} = 3$ dBm, figura 4-12 (izquierda) y $P_{TX} = 18,5$ dBm, figura 4-15 (derecha).

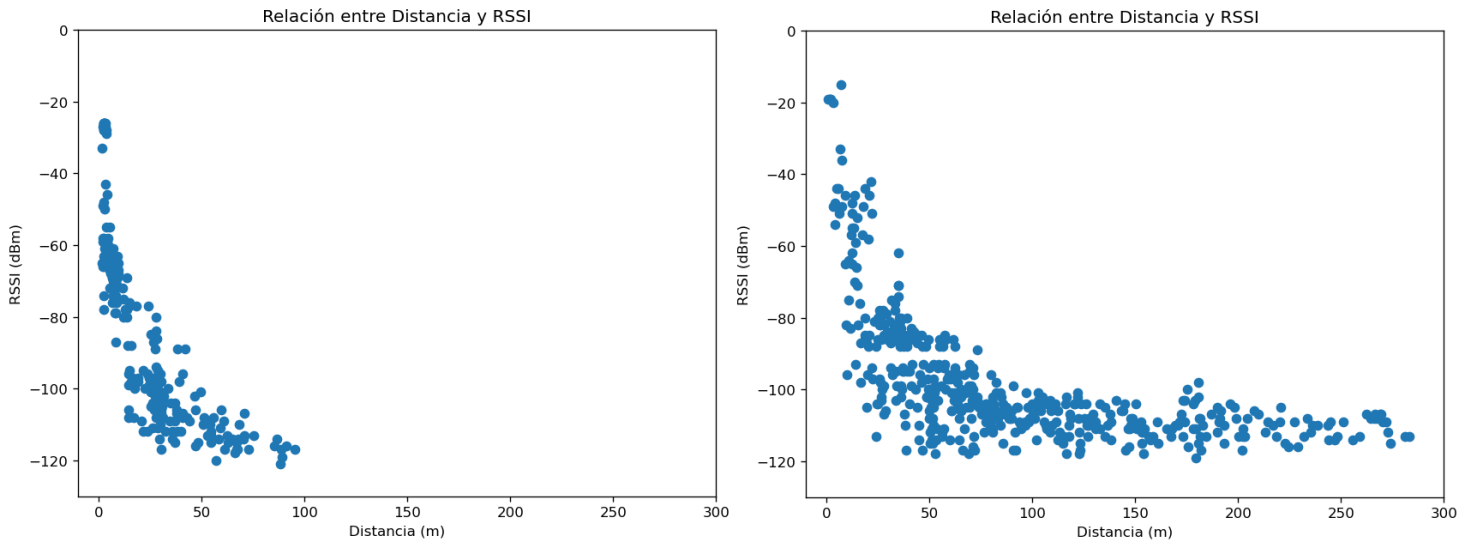


Figura 4-36. Comparativa entre $P_{TX} = 3$ dBm, figura 4-24 (izquierda) y $P_{TX} = 18,5$ dBm, figura 4-27 (derecha).

Al pasar de la potencia transmitida mínima a la máxima, se consigue que el alcance máximo se llegue a triplicar. De obtener que la comunicación más lejana sea a 95 metros, a alcanzar los 283 metros modificándose únicamente la potencia transmitida. La cantidad de conexiones también es mucho mayor al aumentar la potencia a pesar de que el *spreading factor* no varía, por lo que la cantidad de paquetes emitidos en ambos casos ha sido muy similar.

Al igual que en el caso del factor de esparcimiento, se ha podido demostrar experimentalmente el efecto esperado. La consecuencia negativa más significativa que tiene el aumento de la potencia transmitida es el gasto energético, al aumentarla el consumo se incrementa.

4.2.3.3 Efecto de la frecuencia

En este proyecto el efecto de la frecuencia en la cobertura LoRa es, de los 3 parámetros estudiado, el que menos impacto tiene. Esto sucede por el modelo de chip utilizado. Como ya se ha indicado en varias ocasiones, el transmisor LoRa RN2903 trabaja en el rango de frecuencia 902 MHz a 928 MHz. En España, este rango del espectro se encuentra dentro de las comunicaciones móviles, por lo que, al estar transmitiendo en una banda ocupada, no es posible conocer el efecto real de transmitir en distintas frecuencias debido a las posibles interferencias existentes.

Las comunicaciones LoRa en España se deben hacer dentro de la banda ISM. Esta banda, es una banda libre en la que cualquier persona puede transmitir. Por tanto, el problema de las interferencias es algo que muy probablemente también suceda. Sin embargo, es obvio que por muy concurrida que este la banda ISM, siempre será más fácil encontrar una frecuencia de trabajo con menos interferencias, que si transmitimos en una banda ya ocupada por las comunicaciones móviles.

A pesar de esto, podemos comentar que los resultados obtenidos a frecuencia media, 915 MHz, han sido los más significativos, ya que en esta frecuencia se ha conseguido la conexión a mayor distancia, 283 metros. En general, los mapas de cobertura obtenidos en esta frecuencia, independientemente de los demás parámetros, han sido los que más cobertura han conseguido. Aunque es cierto que los datos para la frecuencia mínima, 902 MHz, han sido muy cercanos a estos. No obstante, los resultados de los mapas de cobertura a la frecuencia máxima, 928 MHz, han sido los más pobres. Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, al haber realizado las pruebas en una banda ocupada, puede ser que estos resultados sean así porque de forma puntual durante el experimento, en unas frecuencias hubiera una mayor saturación que en otras.

5 CONCLUSIÓN

We especially need imagination in science. It is not all mathematics, nor all logic, but it is somewhat beauty and poetry.

Necesitamos especialmente de la imaginación en la ciencia. No todo es matemáticas y no todo es simple lógica, también se trata de un poco de belleza y poesía
- Maria Montessori -

Llegado este capítulo final, es el momento de analizar los resultados obtenidos y compararlos con los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de todo el trabajo. Además de esto, se expondrán algunas líneas futuras en las que continuar trabajando en las dos tecnologías principales implicadas en el trabajo LoRa y GPS.

El eje central de este trabajo son los mapas de cobertura, se ha empleado este tipo de herramienta para explorar el alcance real de la tecnología LoRa en un entorno urbano. Analizando los resultados, en términos de alcance y cobertura los valores obtenidos no son los esperados. Los valores de referencia de la tecnología LoRa, en cuanto a rango en entornos urbanos, indican que se pueden llegar a establecer conexiones de 2 a 5 Km dependiendo de las condiciones del entorno y de la configuración de los equipos. No obstante, esto difiere de los valores obtenidos experimentalmente donde el alcance máximo obtenido es de casi 300 m. No solo se diferencian estos resultados en cuanto a distancia, sino que también en cuanto a cobertura, ya que, prácticamente en todos los casos los mapas están despoblados, consiguiendo conectar el equipo emisor y receptor casi únicamente al tener visión directa entre ambos.

Sin eludir que los resultados obtenidos no han sido los esperados, existen diferentes hipótesis que pueden explicar estas diferencias.

En primer lugar, el transmisor LoRa empleado trabaja en la banda de los 915 MHz, frecuencia ocupada en España por las comunicaciones móviles. Al estar trabajando en una banda ocupada el nivel de interferencias que se presupone es bastante grande. Asimismo, en el caso de las pruebas realizadas, el lugar donde se han llevado a cabo los experimentos es el centro de Madrid, ciudad con más de 3 millones de habitantes y una densidad de comunicaciones móviles muy elevada.

Si en lugar de trabajar con este equipo transmisor se hubiese utilizado otro modelo, el cual trabaje a las frecuencias indicadas para la tecnología LoRa en Europa, banda ISM de los 868 MHz, no se puede afirmar que los efectos producidos por las interferencias sean menores, pero seguramente el volumen de comunicaciones sería inferior comparado con la telefonía móvil.

Otros aspectos del equipamiento a mejorar y que posiblemente también hayan afectado a los resultados son las antenas y placas empleadas. Las antenas se conectan a las placas a través de un conector SMA, para reducir las potenciales pérdidas lo mejor sería que la antena estuviera directamente soldada a la placa o en su defecto que se emplearan conectores con un bajo nivel de pérdidas. En adicción, el uso de antenas con una ganancia superior y mayor tamaño también mejoraría los valores obtenidos.

Asimismo, la colocación de las antenas también es un aspecto a tener en cuenta, sobre todo en este caso la ubicación de la antena receptora. Esta antena estaba situada en la ventana de un cuarto piso, sin embargo, la mejor situación posible sería un emplazamiento más alto como la azotea del edificio, no el lateral y evitando obstáculos cercanos que puedan bloquear las señales.

Hay otros aspectos propios de los entornos urbanos que dependiendo del lugar en específico donde se realice la prueba también puede tener un papel importante. La zona donde se han realizado las pruebas son calles estrechas, muy arboladas y con edificios altos, lo que perjudica directamente la visión directa entre el equipo receptor y emisor. Además del ruido producido por la reflexión y refracción de las ondas sobre los edificios y el suelo.

Después de lo expuesto y teniendo en cuenta el potencial de la tecnología LoRa, siendo destacada por encima de las demás tecnologías inalámbricas existentes en la actualidad, no se ha podido demostrar con los resultados obtenidos las cualidades y capacidades reales de esta tecnología tal y como se esperaba cuando se planteó la realización de este trabajo.

Por último, en referencia al GPS expresar que es un sistema extendido mundialmente por su buen funcionamiento y múltiples aplicaciones. No obstante, en este caso concreto, por las condiciones del lugar donde se han realizado los experimentos y el módulo GPS empleado, se han encontrado una serie de dificultades que han llevado a la ampliación de este proyecto. Es por ello que se podría concluir la importancia de entender cómo funciona el sistema GPS y el método de empleo de los receptores, con el fin de conseguir valores óptimos que no interfieran en los resultados del trabajo.

5.1 Líneas futuras

A modo de ampliación para este estudio, sería idóneo tener en cuenta para futuras investigaciones este proyecto, y trabajar sobre las limitaciones encontradas. Algunas formas de abordarlas en próximos estudios sería utilizando un transmisor LoRa que trabaje en la banda ISM europea, además de replicar el experimento en un entorno urbano menos saturado y en un entorno rural para poder comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los teóricos. De este modo se hipotetiza que, a través del tratamiento de estos aspectos los resultados obtenidos serían más consistentes, encontrándose en un entorno con menos ruido, interferencias y obstáculos que afectasen a las comunicaciones. Es así que se podría concluir con más certeza cuales son los verdaderos puntos fuertes de la tecnología LoRa y que aspectos debe mejorar.

Por último, al hilo de lo anterior, una de las posibles líneas futuras de la tecnología LoRa sería el funcionamiento en una banda de frecuencia de uso exclusivo, reduciendo en gran parte los problemas producidos por el uso de una banda libre como las interferencias o la seguridad.

REFERENCIAS

- [1] Agustin Bassi (2021). Intro a la tecnología LoRa. Recuperado de https://www.gotoiot.com/pages/articles/lora_intro/index.html#:~:text=La%20historia%20de%20LoRa%20comenz%C3%B3,convertir%20la%20idea%20en%20realidad
- [2] The LoRa Alliance. What are LoRa and LoRaWAN? Recuperado de <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan>
- [3] Laurens Slats (2020). A Brief History of LoRa: Three Inventors Share Their Personal Story at The Things Conference. Recuperado de <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference>
- [4] Patrick Gebhardt (2019). What Is LoRa? Recuperado de <https://blog.paessler.com/what-is-lora-a-beginners-guide-part-1>
- [5] Cotrim, J. R., & Kleinschmidt, J. H. (2020). LoRaWAN mesh networks: A review and classification of multihop communication. *Sensors*.
- [6] Semtech Corporation (2015). LoRa Modulation Basics. Recuperado de <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>
- [7] Eric B. (2018). LoRa. Recuperado de <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>
- [8] Edgar Solera (2018). Modulación LoRa: Long Range Modulation. Recuperado de <https://medium.com/pruebas-de-laboratorio-de-la-modulaci%C3%B3n-lora/modulaci%C3%B3n-lora-4ad74cabd59e>
- [9] Scott Joffe (2021). ¿Cuáles son los factores que afectan el rango de LoRaWAN? Recuperado de <https://www.mokolora.com/es/factors-affecting-the-lorawan-range/>
- [10] Belcobe Digital (2022). Conceptos técnicos básicos que te ayudarán a entender LoRa y LoRaWAN (Low Power Wide Area Network). Recuperado de <https://becolve.com/blog/conceptos-tecnicos-basicos-que-te-ayudaran-a-entender-lora-y-lorawan-low-power-wide-area-network-en-pocos-minutos/>
- [11] Paul Pickering (2017). Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance. Recuperado de <https://www.digikey.es/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>
- [12] Trakbondt (2020). What is GPS? Recuperado de <https://trakbond.zohodesk.com/portal/en/kb/articles/what-is-gps>
- [13] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (2022). Space Segment. Recuperado de <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

- [14] Space Geodesy Group. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Recuperado de [https://lweb.cfa.harvard.edu/space_geodesy/ATLAS/gps_es.html#:~:text=GPS%20\(Global%20Positioning%20System\)%20es,punto%20de%20la%20superficie%20terrestre](https://lweb.cfa.harvard.edu/space_geodesy/ATLAS/gps_es.html#:~:text=GPS%20(Global%20Positioning%20System)%20es,punto%20de%20la%20superficie%20terrestre)
- [15] TrakkitGPS (2023). How GPS Works (Step-by-Step). Recuperado de <https://trakkitgps.com/how-gps-works/>
- [16] Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M. C., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. (2000). Sistema de posicionamiento global (gps): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. ETS ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga.
- [17] Aarthi Ravikumar (2020). Historia de los satélites GPS y el seguimiento por GPS para uso comercial. Recuperado de <https://www.geotab.com/es/blog/historia-de-los-satelites-gps/>
- [18] John Kyes (2020). ¿Qué significa GPS? Recuperado de <https://www.geotab.com/es/blog/que-es-gps/>
- [19] Herring, T. A. (1996). The global positioning system. *Scientific American*, 274(2), 44-50.
- [20] Fernández-Rubio, J. A., Granados, G. S. (1997). Sistemas de posicionamiento: de GPS a GNSS. *Mundo electrónico*, (280), 46-52.
- [21] Guillermo Ven. ¿Qué es el GPS y cómo funciona? Recuperado de <https://www.tecnologia-informatica.com/que-es-gps-como-funciona-aplicaciones/>
- [22] Sonnenberg, G. J. (2013). *Radar and electronic navigation*. Elsevier.
- [23] Ward, N. (1997). *Understanding GPS. Principles and Applications*. Elliott D. Kaplan (Editor). Artech House Publishers, Boston & London. 1996.
- [24] Microchip. RN2903. Recuperado de <https://www.microchip.com/en-us/product/RN2903>
- [25] Josh (2023). Bandas de frecuencias de las operadoras móviles usadas en España para 2G, 3G, 4G y 5G. Recuperado de <https://bandaancha.eu/articulos/todas-bandas-frecuencias-2g-3g-4g-5g-10031>
- [26] u-blox. NEO-6 Data Sheet. Recuperado de https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf
- [27] Xu, J., Liu, W., Lang, F., Zhang, Y., & Wang, C. (2010). Distance measurement model based on RSSI in WSN. *Wireless Sensor Network*, 2(8), 606.