



**Universidad  
Politécnica  
de Cartagena**



## **Evaluación de tecnologías LPWAN para escenarios de Smart Cities**

**Autor: Juan Ballesta Viñas**

**Directora: María Dolores Caño Baños**

**Codirector: Ramón J. Sánchez Iborra**

**Cartagena**

**2018**

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	2
ÍNDICE DE TABLAS .....	3
ABREVIATURAS .....	4
RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	6
1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. ESTUDIO TEÓRICO .....	14
3. PARTE EXPERIMENTAL .....	18
3.1 Materiales .....	18
3.2 Metodología .....	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	23
4.1 Resultados experimentales .....	24
4.2 Discusión de resultados .....	27
5. CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS .....	33
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Dispositivos IoT conectados mundialmente

**Figura 2.** Topología en estrella LoRaWAN

**Figura 3.** Mapa de cobertura de Murcia con antenas directivas

**Figura 4.** Mapa de cobertura de Murcia con antenas omnidireccionales

**Figura 5.** Mapa de cobertura de Cartagena con antenas directivas

**Figura 6.** Mapa de cobertura de Cartagena con antenas omnidireccionales

**Figura 7.** OBU en detalle

**Figura 8.** Placa RHF2S008

**Figura 9.** Antena estación base

**Figura 10.** OBU instalado en el automóvil

**Figura 11.** Antena instalada en la azotea para escenario urbano y suburbano

**Figura 12.** Antena instalada en la azotea para escenario rural

**Figura 13.** Mapa RSSI en el escenario urbano

**Figura 14.** Mapa RSSI en el escenario suburbano

**Figura 15.** Mapa RSSI en el escenario rural

**Figura 16.** Impacto de CR en la transmisión según los escenarios

**Figura 17.** Impacto de BW en la transmisión según los escenarios

**Figura 18.** Evolución del PDR con la distancia para cada DR en el escenario urbano.

CR=4/8, P=20B

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Comparación entre comunicaciones celulares, WSN y sistemas de IoT

**Tabla 2.** Alcance máximo (Km)

**Tabla 3.** Tiempo en el aire (ms) para las distintas configuraciones LoRaWAN

## **ABREVIATURAS**

ACK: Acknowledgment (asentimiento)

BTLE: Bluetooth Low Energy

CR: Coding Rate

CRC: Codificación de error cíclica

GPRS: General Packet Radio Service

GSM: Global System for Mobile communications

IoT: Internet of Things (Internet de las cosas)

ISM: Industrial, Scientific and Medical

ITM: Irregular Terrain Model

LoRaWAN: Long-Range Wide Area Network

LPWAN: Low-Power Wide-Area Network

M2M: Machine to machine

OBU: Unidad de abordó

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PDR: Packet Delivery Ratio

SF: Spreading Factor

TIC: Tecnologías de la información y la comunicación

ToA: Time on Air

WSN: Wireless Sensor Network (Red de Sensores Inalámbrica)

## RESUMEN

Con el avance de las tecnologías de comunicaciones, se está demostrando que el Internet de las Cosas (IoT) es, cada vez más, una realidad. Una de las tecnologías que más está avanzando en este campo es la tecnología LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) o tecnología de red amplia y baja potencia. Dentro de ella, destaca la plataforma LoRaWAN, sobre la que se realizará un estudio de su desempeño en diferentes escenarios reales. El presente trabajo consta de dos partes, un estudio teórico del despliegue de antenas necesario para dar cobertura LoRaWAN al centro urbano de Murcia y de Cartagena y una parte experimental cuyo objetivo es hacer un análisis del funcionamiento de esta tecnología mediante las distintas pruebas que se han llevado a cabo. A través de estas pruebas se ha intentado encontrar el rango de cobertura y fiabilidad de LoRaWAN en tres escenarios diferentes: urbano, suburbano y rural. Para el análisis de la comunicación, se han ido cambiando distintos parámetros de configuración de la misma como el Spreading Factor (SF), el Coding Rate (CR) y el tamaño de Payload con el fin de ver las variaciones en las métricas de red en los distintos escenarios y, una vez obtenidos todos los datos, se ha realizado un estudio para analizar las mejores condiciones adaptadas a cada escenario en relación con la variación de cada uno de estos factores.

## **ABSTRACT**

With the advance of communication technologies, it is clear that Internet of Things (IoT) is becoming a reality. One of the technologies that is advancing the most in this area is Low-Power Wide-Area Network technology (LPWAN). Following this paradigm, LoRaWAN platform stands out, so it will be the focus of this study. The present work consists of two parts, a theoretical study of the deployment of antennas necessary to provide with LoRaWAN coverage the urban center of Murcia and Cartagena, and an experimental part whose objective is to make an analysis of this technology through the different tests that we have carried out. Through these tests we have tried to find the range of coverage and reliability of LoRaWAN in three different scenarios: rural, semi-rural, and urban. For the analysis of the communications, we have tuned different configuration parameters of LoRaWAN such as Spreading Factor (SF), Coding Rate (CR) and Payload length in order to evaluate the variations of the network performance in the different scenarios and, once all the data have been obtained, we have made a study of the best conditions adapted to each scenario in relation to the variation of each of these factors.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los tipos de redes inalámbricas más comunes hoy en día son Bluetooth, usado normalmente en redes de área personal, Wi-Fi, para redes de área local, y redes celulares como 2G, 3G, 4G-LTE para redes de área amplia. En la actualidad, se están desarrollando nuevos tipos de redes como son las redes de baja potencia y de área amplia Low-Power Wide-Area Network (LPWAN), las cuáles se proyectan como una alternativa sólida para soportar una parte importante de los miles de millones de dispositivos previstos para el Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things).

El concepto de Internet de las cosas o IoT hace referencia a una red en la que una serie de objetos inteligentes interconectados generan continuamente datos y los transmiten a través de Internet [1]. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de los sistemas, una única tecnología no puede servir a todas las aplicaciones y volúmenes de dispositivos proyectados para IoT. Wi-Fi y Bluetooth Low Energy (BTLE) son estándares ampliamente adoptados y sirven para las aplicaciones relacionadas con la comunicación de dispositivos personales y la tecnología celular es de gran utilidad para aplicaciones que necesitan un alto rendimiento de datos y tienen una fuente de alimentación. LPWAN ofrece a sus dispositivos duración de batería de varios años y está diseñado para sensores y aplicaciones que necesitan enviar pequeñas cantidades de datos con poca frecuencia a largas distancias desde distintos entornos.

Las principales ventajas que todas las plataformas LPWAN poseen son: (i) alta escalabilidad y alcance, necesarios para las redes superpobladas desplegadas en áreas amplias; (ii) roaming, útil para el seguimiento de la entrega de mercancías; (iii) alertas de eventos en tiempo real, que son configuradas por el cliente y activadas automáticamente desde el sistema de gestión del operador LPWAN; y, (iv) nodos finales de bajo consumo de energía y coste.

Si bien es cierto que hemos sobrevivido hasta ahora con las ya existentes tecnologías WSN (Wireless Sensor Networks) como ZigBee, Bluetooth, o incluso

Wi-Fi (tecnologías de corto alcance), el foco principal de las tecnologías M2M (Machine to Machine) es acoger el inmenso crecimiento del número de dispositivos que las forman y el crecimiento de las áreas de funcionamiento de las redes [2]. Se estima que las conexiones globales de dispositivos serán de 28 billones para 2020 (Figura 1).



**Figura 1.** Dispositivos IoT conectados mundialmente. Datos extraídos de [3]

Este crecimiento del número de dispositivos se produce a la par de un proceso de urbanización de la población en todas las partes del mundo. Un estudio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) señala que, por primera vez en la historia, más de la mitad de la población del planeta (54,6% o 3.600 millones de personas) vive en ciudades. Además, según este estudio, para 2050 el 70% de la población mundial (más de 6.000 millones) vivirá en ciudades: 64,1% de las personas en los países en desarrollo y 85,9% de los habitantes en los países desarrollados.

En este sentido, transformar “ciudades tradicionales” en Smart Cities, o Ciudades Inteligentes, es una demanda cada vez más importante. Una Ciudad Inteligente y Sostenible es una ciudad innovadora que utiliza las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y otros medios para mejorar la toma de decisiones, la eficiencia de las operaciones, la prestación de los servicios urbanos y su competitividad [4]. Al mismo tiempo, procura satisfacer las necesidades de las generaciones actuales y futuras en relación con los aspectos económicos, sociales y medioambientales. Asimismo, resulta atractiva para los

ciudadanos, empresarios y trabajadores, pues genera un espacio más seguro, con mejores servicios y con un ambiente de innovación que incentiva soluciones creativas, genera empleos y reduce las desigualdades. De esa manera, las Ciudades Inteligentes promueven un ciclo virtuoso que produce no solo bienestar económico y social, sino también el uso sostenible de sus recursos con miras a elevar la calidad de vida a largo plazo.

El entendimiento de los datos generados por la población en el medio urbano, recabados por sensores, dispositivos digitales y centrales de comunicación, permite corregir una gran cantidad de problemas que afectan la vida diaria y perjudican la eficiencia de las ciudades como, por ejemplo: el tiempo necesario para ir a al trabajo; los sistemas de seguridad pública; el monitoreo de calles, casas y edificios; la gestión del consumo de energía y agua; el acceso a servicios públicos; e incluso, alertas de la calidad del aire y preparación para situaciones de emergencia. Además, el análisis de los datos obtenidos permite que las ciudades perfeccionen una serie de aspectos relativos a la calidad de la gestión local, en la medida en la que los ciudadanos provean información de calidad y periódica, apoyando el monitoreo de las acciones en curso y generando instrumentos para retroalimentar una planificación más integrada en el futuro.

Sensores distribuidos en varios puntos de la ciudad brindan información en tiempo real sobre el flujo de los ciudadanos, el nivel de ruido y otras formas de contaminación ambiental, así como sobre el tráfico y las condiciones climáticas. Esto permite a las autoridades optimizar las operaciones de la ciudad.

Algunos ejemplos incluyen la instalación de paradas de autobuses inteligentes, que ofrecen a los usuarios información en tiempo real sobre la llegada del próximo autobús, y estacionamientos que identifican la presencia de automóviles por medio de una combinación de sensores y comunicación inalámbrica, permitiendo que los conductores conozcan la disponibilidad de plazas en tiempo real. Asimismo, los sistemas de iluminación pública conectados a una red de datos son altamente eficientes y permiten manejar de forma dinámica el nivel de iluminación de acuerdo con las condiciones del entorno, resultando en ahorros significativos de energía. En el ámbito del saneamiento, los contenedores de residuos sólidos pueden conectarse a través de redes inalámbricas y equiparse con sensores que monitorean el volumen de residuos,

la humedad, la temperatura e inclusive el tipo de contenido existente. Los datos llegan a las secretarías y empresas de limpieza y permiten una mejor planificación de las rutas de recolección, brindando información actualizada a los conductores de los camiones en tiempo real en relación con los trayectos, lo que posibilita la optimización del costo del servicio de gestión de residuos.

Este tipo de tecnologías permite que las autoridades optimicen las operaciones de la ciudad, incluyendo una mejor gestión ambiental, movilidad urbana más eficiente y sostenibilidad económica y social. En el área de seguridad, las tecnologías disponibles ayudan a preservar la integridad del agente público y contribuyen a mejorar los procedimientos adoptados.

En la ciudad tradicional, hay hombres que patrullan las calles. En la Ciudad Inteligente, hay cámaras de seguridad, que además de identificar acciones sospechosas, previenen delitos, ahorran tiempo y recursos humanos de forma significativa, y vinculadas a software de análisis, son capaces de identificar situaciones de anormalidad y hacer reconocimiento de imágenes. Además, la georreferenciación de datos y el análisis de la incidencia de crímenes en diferentes áreas de la ciudad aseguran que la policía sea más eficiente en su represión de los delitos y permiten que el gobierno y la sociedad civil puedan tomar medidas preventivas. Con ese tipo de información es posible, por ejemplo, prestar más atención a jóvenes habitantes de áreas consideradas marginadas y con baja presencia gubernamental, mediante la formulación de políticas y programas de educación y cultura, con miras a revertir el futuro de quienes se encuentran en situación de vulnerabilidad.

El crecimiento de las redes y la continua implantación de sensores y dispositivos digitales requiere: (i) minimizar el coste por unidad, (ii) optimizar el consumo de energía de los dispositivos, (iii) aumentar la escalabilidad de las redes, y (iv) mayor cobertura de red. La necesidad de una mayor cobertura fue solucionada con las redes celulares como GSM (Global System for Mobile communications), GPRS (General Packet Radio Service), etc. o conexión por satélite (comunicaciones de larga distancia). Sin embargo, el incremento de los costes y su consumo de potencia las hacen incompatibles para las redes M2M de larga distancia y un número alto de dispositivos.

**Tabla 1.** Comparación entre comunicaciones celulares, WSN y sistemas de IoT

<b>Redes celulares</b>	<b>WSN</b>	<b>IoT</b>
Alto ancho de banda	Ancho de banda limitado	Ancho de banda limitado
Tráfico continuo	Tráfico esporádico	Tráfico esporádico
Número limitado de dispositivos	Alto número de dispositivos	Enorme número de dispositivos
Pequeñas celdas de cobertura	Área de cobertura pequeña	Celdas de coberturas amplias
Dispositivos caros	Coste reducido de red y dispositivos	Coste reducido de red y dispositivos

Estas redes de larga distancia y un número alto de dispositivos son las redes LPWAN. Existen diferentes plataformas dentro de las redes LPWAN pero en este trabajo se ha utilizado el estándar LoRaWAN. Este estándar es promovido por LoRa-Alliance, un grupo de miembros que incluye diferentes empresas multinacionales de telecomunicaciones. LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red mientras que la capa física LoRa habilita el enlace de comunicación de largo alcance (nivel físico) [5]. El protocolo y la arquitectura de red tienen una gran influencia en la determinación de la duración de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la variedad de aplicaciones atendidas por la red.

LoRa presenta tres parámetros configurables, Spreading Factor (SF), Coding Rate (CR) y el tamaño de Payload. Con la variación de estos factores se pueden ajustar algunos parámetros de la comunicación, como la tasa de transmisión, la capacidad de corrección de errores o el rango de transmisión,

entre otras. En relación al SF, la modulación de espectro ensanchado se realiza representando cada bit de información de carga mediante múltiples chips de información. Por lo tanto, el SF representa la relación entre la velocidad de chip y la velocidad de información de banda base. Los valores típicos de SF varían entre 7 y 12, cuanto más alto sea el valor del SF más robusto será el enlace de comunicación, aumentando la sensibilidad del equipo de recepción en este enlace. Por otro lado, cuanto más bajo sea el valor de SF se aumenta la tasa de transmisión, pero la señal transmitida necesita ser recibida con un nivel de potencia más alto para su correcta decodificación.

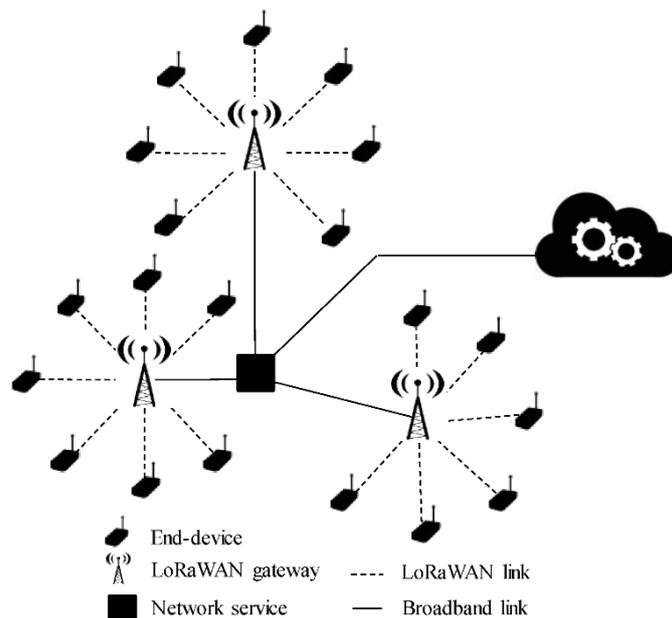
LoRa emplea una codificación de error cíclica (CRC) para mejorar la detección y corrección de errores. Esta codificación incluye una cabecera de transmisión que está determinada por el parámetro CR, que puede tener los valores 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8. Por último, el ancho de banda más utilizado en LoRa es 125 kHz, aunque también soporta anchos de banda de 250 y 500 kHz.

Muchas redes implementadas existentes utilizan una arquitectura de red en malla. En una red en malla, los nodos finales envían la información de otros nodos para aumentar el rango de comunicación y el tamaño de la red. Si bien esto aumenta el alcance, también agrega complejidad, reduce la capacidad de la red y disminuye la duración de la batería, ya que los nodos reciben y reenvían información de otros nodos que probablemente sea irrelevante para ellos. La arquitectura de red de LoRaWAN se trata de una topología de red en estrella, recomendada para preservar la duración de la batería de los dispositivos cuando se quiere lograr conectividad a largo alcance (Figura 2). En una red LoRaWAN los nodos no están asociados con una estación base específica, los datos transmitidos por un nodo suelen ser recibidos por varias estaciones base. Cada estación base enviará el paquete recibido desde el nodo final al servidor de red a través de una red de distribución (backhaul) (ya sea celular, Ethernet, satélite o Wi-Fi). La inteligencia y la complejidad se encuentran en el servidor de red, que gestiona la red, filtra los paquetes recibidos redundantes, realiza comprobaciones de seguridad, programa los reconocimientos a través de la puerta de enlace óptima y gestiona la velocidad de datos adaptativa [6].

En el protocolo LoRaWAN existen tres clases de nodos. Los nodos finales varían según su aplicación y los requerimientos del servicio. La selección de un tipo u otro varía según las necesidades de ahorro de batería y latencia del 'downlink'. El primer tipo son los denominados nodos de clase A, son los más utilizados y se caracterizan porque sólo entran en modo escucha después de haber enviado datos al Gateway, son los más eficientes energéticamente.

El segundo tipo son los nodos de clase B, este tipo de dispositivos tiene las ventanas de recepción con base a tiempos predeterminados con el Gateway, puede usar una batería o una fuente externa, dependiendo de los tiempos asignados de escucha.

Por último, están los nodos de clase C, estos nodos se encuentran siempre en modo de escucha y no presentan latencia, pero son los que mayor gasto energético tienen [7].



**Figura 2.** Topología en estrella LoRaWAN

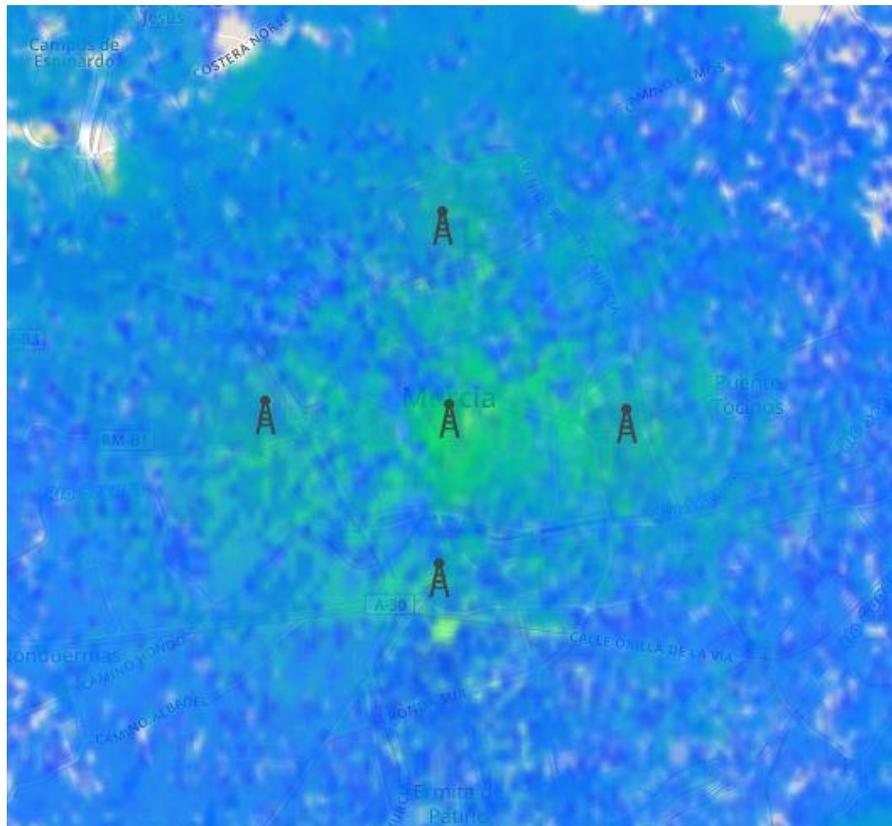
## 2. ESTUDIO TEÓRICO

Antes del estudio experimental, se muestra un estudio teórico a través del cual se busca dar cobertura al centro urbano de Murcia y al de Cartagena. Para ello, se hace uso de una herramienta de planificación de radio [8] que permite estimar con precisión el nivel de señal dentro del área cubierta por la estación base. Esta herramienta emplea mapas topográficos para considerar el impacto de las elevaciones del terreno en la señal de propagación y presenta opciones altamente configurables para simular de forma precisa las características y condiciones del equipo real. El estudio se ha realizado tanto con antenas directivas como omnidireccionales para hacer la comparación y buscar la mejor opción. Para las antenas se utiliza una ganancia de 8 dBi y 0.025 W (14 dBm) de potencia de transmisión y una ganancia de 2 dBi y sensibilidad de -110 dBm para la recepción. Se utiliza la banda de frecuencia 868 MHz y el modelo de propagación Irregular Terrain Model (ITM)-Longley-Rice. Por lo tanto, se ha configurado esta herramienta con las características correspondientes a la configuración que se utiliza para las pruebas de la parte experimental, obteniendo los resultados que se pueden observar en la Figura 3, la Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6.

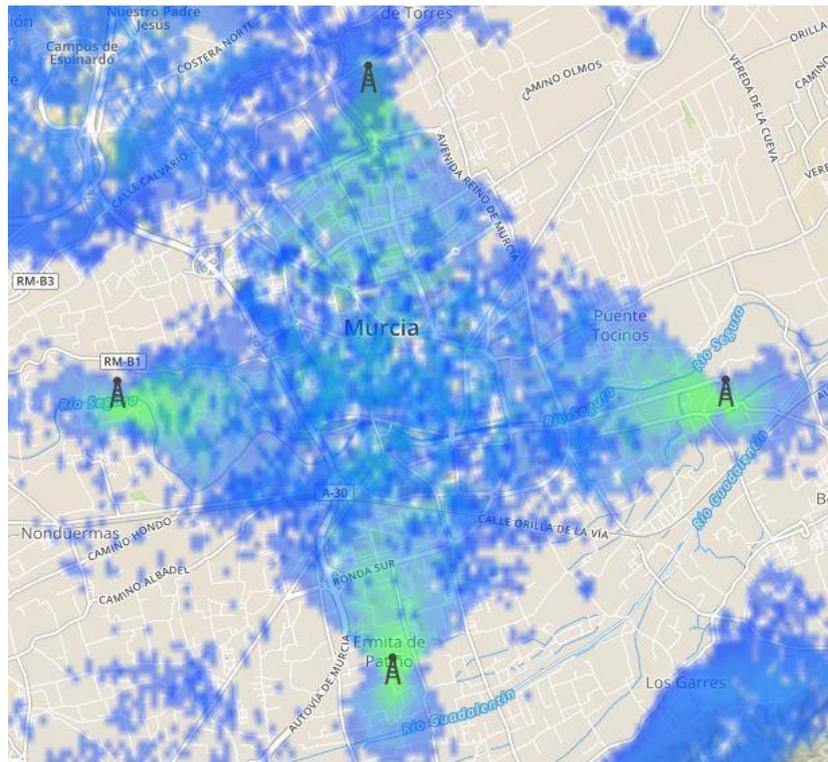
Para el caso de Murcia, con el uso de antenas omnidireccionales (Fig. 3) se puede observar que el área cubierta por la estación base es homogénea, ya que estas antenas radian la energía de forma uniforme en todas las direcciones. Se utilizan cinco antenas para cubrir la superficie y en el mapa se puede observar que predominan las áreas verdes que representan las zonas con niveles de potencia recibida más alta frente a las zonas más oscuras que son las zonas en las que el nivel de potencia recibido está por debajo de la sensibilidad del receptor. Por el contrario, las antenas directivas radian su energía de manera localizada y son ideales cuando se desea concentrar gran parte de la radiación en una dirección deseada. Continuando con el caso de Murcia (Fig. 4), las antenas están situadas en la periferia de la ciudad buscando orientar toda su radiación al interior. Se colocan cuatro antenas emitiendo en direcciones distintas buscando cubrir todo el centro urbano.

Para el caso de Cartagena, sucede un comportamiento parecido al de Murcia, con las antenas omnidireccionales se consigue abarcar un espacio de cobertura más amplio y uniforme que con las antenas directivas. En el caso de Cartagena podemos cubrir el centro urbano con tres antenas omnidireccionales (Fig. 5), mientras que, debido a la focalización de las antenas directivas, se necesita usar cuatro antenas para cubrir todo el territorio (Fig. 6).

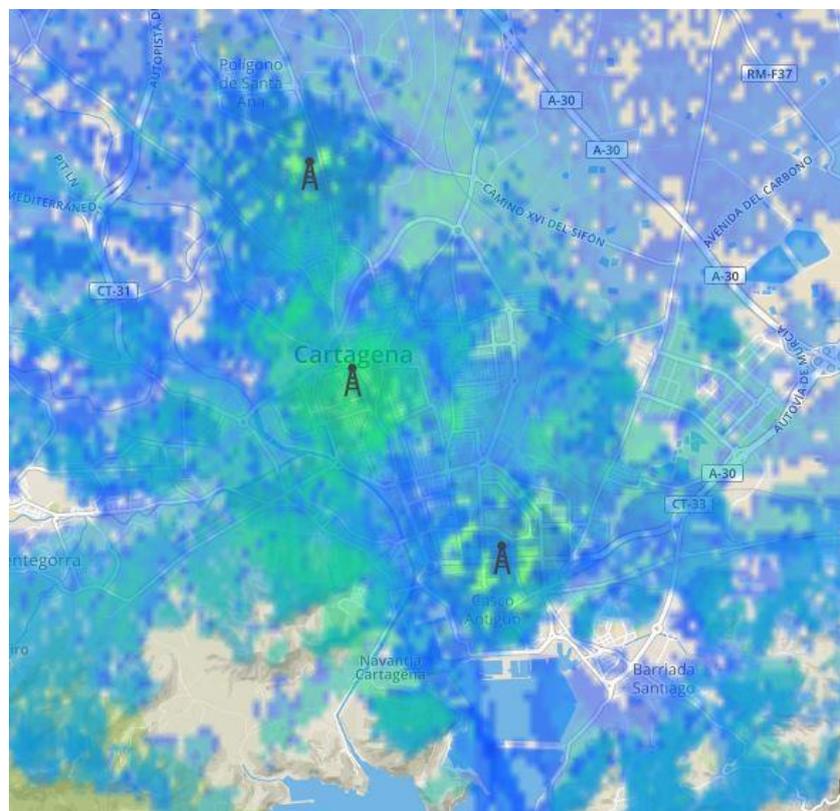
LoRaWAN es una tecnología que busca proporcionar conectividad prolongada a implementaciones de IoT en diferentes escenarios con diversas condiciones de propagación. La elección de las diferentes configuraciones de LoRa en un enlace está determinada por el equilibrio entre la sensibilidad de los receptores y la velocidad de transmisión de datos, por lo que, dependiendo de las condiciones del enlace en cuanto a su adversidad a las transmisiones inalámbricas y a la movilidad del nodo final, el sistema debería adoptar una configuración más o menos conservadora.



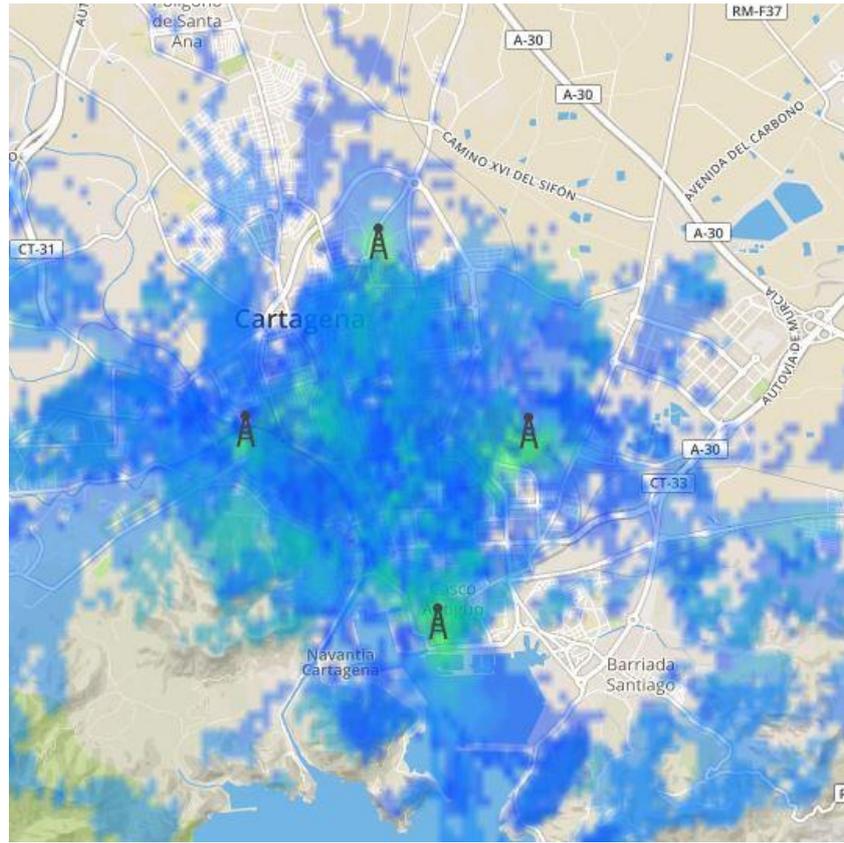
**Figura 3.** Mapa de cobertura de Murcia con antenas omnidireccionales



**Figura 4.** Mapa de cobertura de Murcia con antenas directivas



**Figura 5.** Mapa de cobertura de Cartagena con antenas omnidireccionales



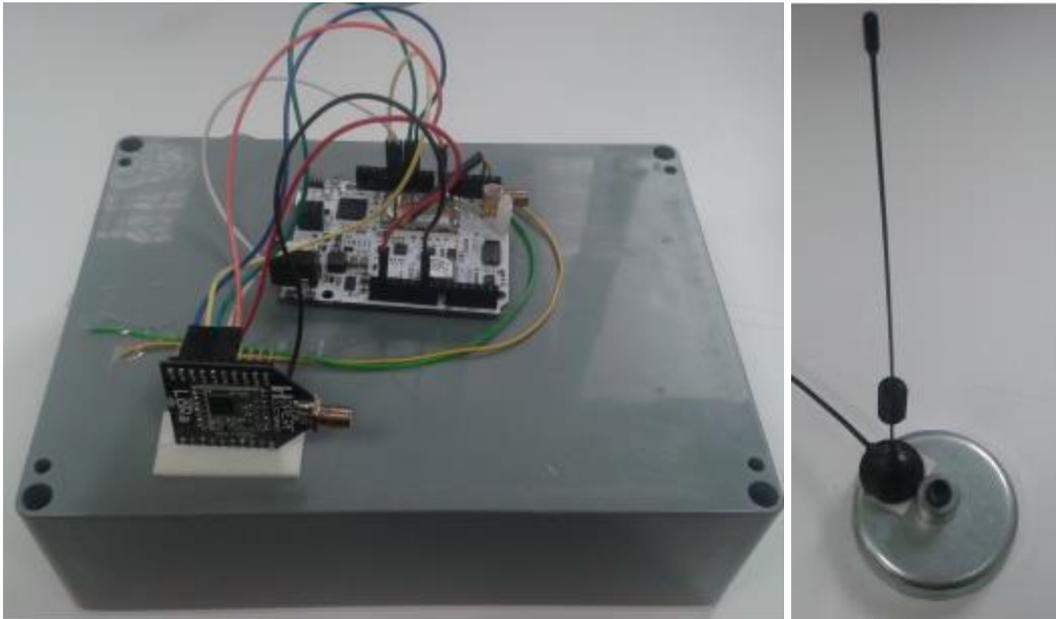
**Figura 6.** Mapa de cobertura de Cartagena con antenas directivas

### **3. PARTE EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Materiales**

Los parámetros configurables de LoRaWAN cuando se usa la modulación LoRa son SF, CR y longitud de Payload. Estos parámetros ajustables afectan a la velocidad de transmisión y la tasa de pérdida de paquetes de las transmisiones. Los posibles valores de rango asignados a los diferentes parámetros considerados fueron: (i) SF: 7 a 12, (ii) CR: 4/5 y 4/8, y (iii) Payload: 20 y 40 bits. Las transmisiones LoRaWAN hacen uso de las bandas ISM sin licencia, por lo que los dispositivos europeos LoRaWAN deben cumplir con la regulación ETSI 300-220. Para nuestras pruebas, además de los canales predeterminados de LoRaWAN, los canales 867.1, 867.3, 867.5, 867.7 y 867.9 MHz fueron configurados para ser utilizados tanto por el nodo final como por la estación base. El canal empleado por el dispositivo final se seleccionó pseudoaleatoriamente para cada transmisión.

Para realizar las pruebas de campo, el nodo final LoRaWAN se colocó a bordo de un automóvil, conforme a una Unidad de Abordo (OBU, On-Board Unit) llamada so-211, que se comunicó directamente con una estación base LoRaWAN. El microcontrolador usado en el OBU era la placa SmartEverything Fox compatible con Arduino de Arrow. Conectado a esa placa, el módulo de radio LoRaWAN utilizado fue el chip RN2483 de Microchip con una antena omnidireccional de ganancia de 5 dBi para dispositivos finales (Figura 7). El chip del transceptor es un dispositivo LoRaWAN Clase A con una potencia de salida de hasta 14 dBm. Por lo tanto, sólo se habilitaron las comunicaciones LoRaWAN en el OBU. La placa del microcontrolador OBU tenía un chip integrado de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que el dispositivo usó para obtener su ubicación.



**Figura 7.** OBU en detalle

El otro extremo de la comunicación, es decir, la estación base, empleó la placa RHF2S008 de RisingHF, que incluye un chip SX1301 de Semtech (Figura 8). Este módulo es capaz de decodificar hasta 8 recepciones diferentes en distintos canales, empleando cualquier SF simultáneamente.

Teniendo en cuenta estas características, se utilizó una única estación base en las pruebas experimentales; una antena sectorial de ganancia de 8 dBi y una anchura de campo de 65 grados se conectó a la placa de procesamiento (Figura 9). La estación base transmitía los paquetes de ida y vuelta al servidor de red LoRaWAN, por lo tanto, la estación base actuaba como puerta de enlace entre el controlador y el dispositivo final. A su vez, el servidor de red gestionaba el establecimiento de la conexión y la confirmación de la recepción del ACK definidas en la especificación LoRaWAN.



**Figura 8.** Placa RHF2S008



**Figura 9.** Antena estación base

### **3.2 Metodología**

Una vez que se ha descrito la configuración del hardware, a continuación, se presenta el comportamiento de los dispositivos involucrados. La OBU actuó como remitente periódico, por lo que no se incluyeron otros elementos o sensores más allá de los estrictamente necesarios. El funcionamiento general es

el siguiente: primero, la OBU obtiene su ubicación de GPS y transmite un paquete; después de transmitir cada paquete, la OBU espera un ACK desde la estación base usando la primera ventana de recepción especificada en el protocolo LoRaWAN [8]. Para cada transmisión, se emplea un conjunto diferente de los parámetros de configuración de LoRaWAN, es decir, SF, CR y longitud de Payload, para los enlaces ascendentes y descendentes. Este proceso se repitió periódicamente durante la duración de la prueba en un ciclo infinito. Esta estrategia permitió probar diferentes configuraciones de LoRaWAN correlativamente en los diferentes escenarios considerados. En este procedimiento, incluso si la OBU no recibe el ACK después de una transmisión de paquete, el sistema sigue funcionando, enviando un nuevo paquete después de un período de tiempo de espera determinado. La estación base escuchaba continuamente paquetes y responde con un ACK LoRaWAN a cada paquete recibido. Además, la estación base sólo se configuró para responder a los paquetes OBU, descartando cualquier otra posible transmisión recibida de LoRaWAN para evitar interferencias adicionales o transmisiones inesperadas.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas se llevaron a cabo en tres escenarios diferentes: urbano, suburbano y rural. En todos los escenarios, se utilizó el mismo equipo y software descritos anteriormente. La OBU se colocó en el vehículo que circulaba en las rutas seleccionadas para realizar las pruebas (Figura 10).

Las rutas fueron las mismas para todas las configuraciones posibles, por lo que los resultados se pueden analizar comparativamente en cada uno de los escenarios considerados. El escenario urbano se ubicó en la ciudad de Murcia, la ruta se desarrolló por el centro de la ciudad. La estación base se ubicó en la Facultad de Informática de la Universidad de Murcia, en el Campus de Espinardo. La ubicación de la estación base fue en el borde de la azotea de un edificio de cinco pisos (Figura 11). La ruta seguida durante la prueba incluyó las calles principales del centro con edificios altos y construcciones de hasta 15 pisos a través de calles con hasta tres carriles.

A su vez, el escenario suburbano tuvo menos condiciones adversas para las comunicaciones de radio. Para este escenario, la ubicación de la estación

base fue en el mismo punto que en el escenario urbano (Figura 12). La ruta se desarrolló a través de un área industrial, con construcciones de altura media (hasta 3 pisos) y algunos cambios de elevación de terreno suave. Finalmente, el escenario rural fue el más favorable ya que presentaba condiciones cercanas al espacio libre. El terreno en el que se realizaron las pruebas fue casi plano, con ausencia de grandes construcciones y vegetación baja. La estación base se colocó en la azotea del Centro de Transferencia de Tecnología en el Parque Tecnológico de Fuente Álamo, un edificio de 4 pisos (Figura 13). La ruta seleccionada viajó hasta 20 km al Este desde la ubicación de la estación base a través de vías abiertas y escasamente transitadas.



**Figura 10.** OBU instalado en el automóvil



**Figura 11.** Antena instalada en la azotea para escenario urbano y suburbano



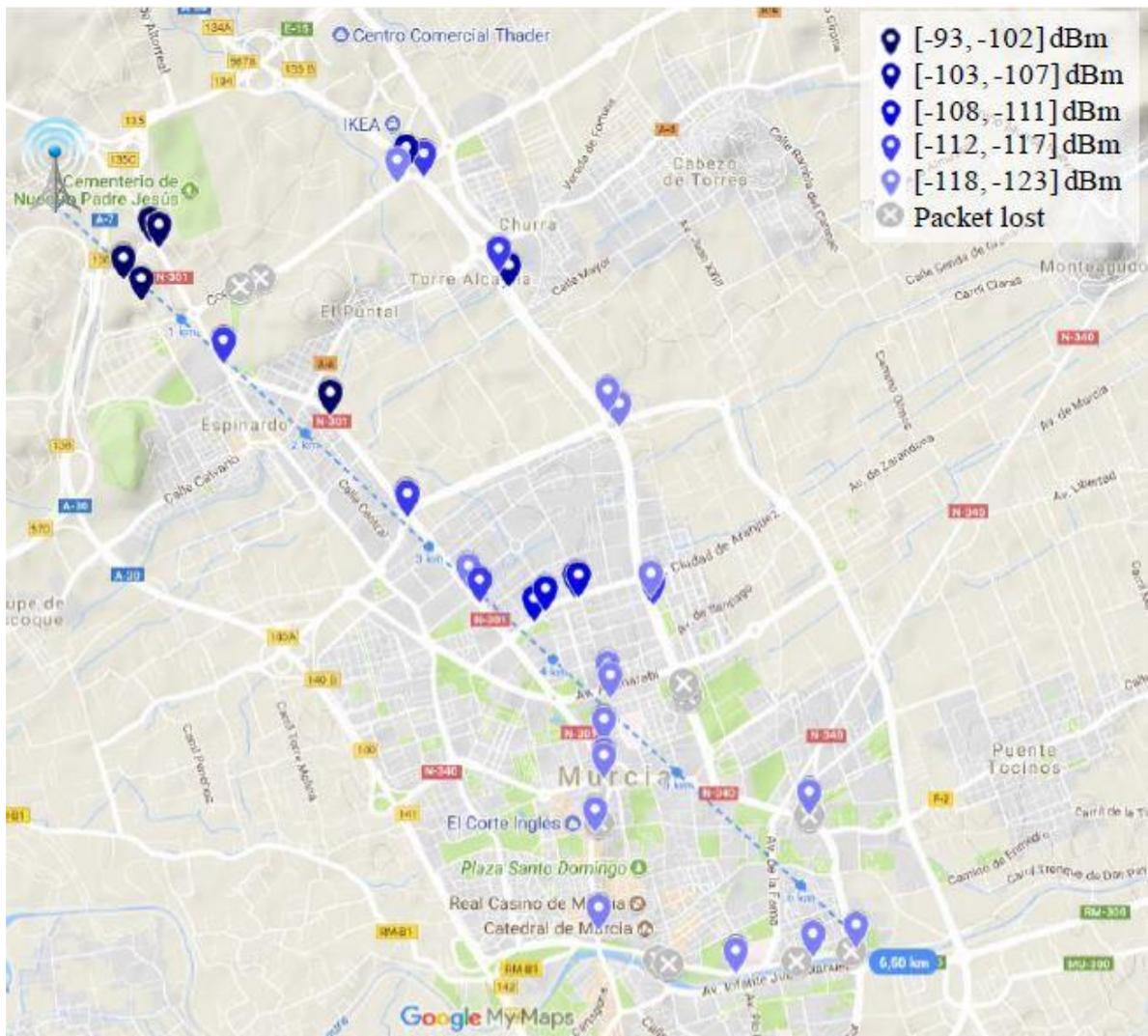
**Figura 12.** Antena instalada en la azotea para escenario rural

#### **4. Resultados y Discusión**

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en los diferentes escenarios bajo estudio. Como se explicó anteriormente, las diferentes configuraciones de LoRaWAN se han probado en tres entornos que presentan diferentes condiciones de adversidad frente a las transmisiones inalámbricas. Esta adversidad está determinada por el número y la densidad de obstáculos presentados en cada uno de ellos. Se han considerado los siguientes escenarios: (i) urbano: alta adversidad para las comunicaciones inalámbricas, (ii) suburbano: adversidad media para las comunicaciones inalámbricas, y (iii) rural: baja adversidad para las comunicaciones inalámbricas.

#### 4.1. Resultados experimentales

En el escenario urbano, que presentaba las condiciones más adversas para las comunicaciones, se alcanzó un rango máximo de 6.5 Km para DR0 (Figura 13 (a)). Se pueden observar claras diferencias en las transmisiones con la variación de DR (Figura 13 (a) y 13 (b)). Para DR0 se obtiene la longitud de alcance máxima, mientras que para DR5 se obtiene una distancia de 2.80 Km y la tasa de éxito de transmisión de paquetes va disminuyendo hasta un valor del 38%.



(a) DR0



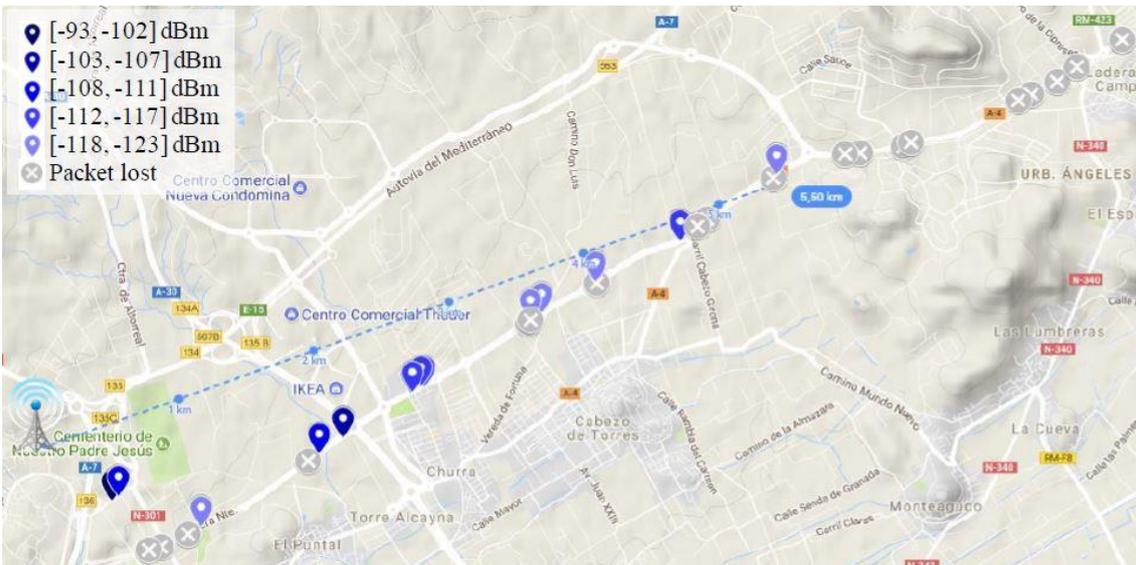
(b) DR5

**Figura 13.** Mapa RSSI en el escenario urbano.

El rango máximo alcanzado en el escenario suburbano es de 6.70 Km (Figura 14 (a)) y el mínimo es de 5.50 Km (Figura 14 (b)). En este escenario se observan más paquetes perdidos por la presencia aleatoria de obstáculos y el impacto de la movilidad del vehículo.



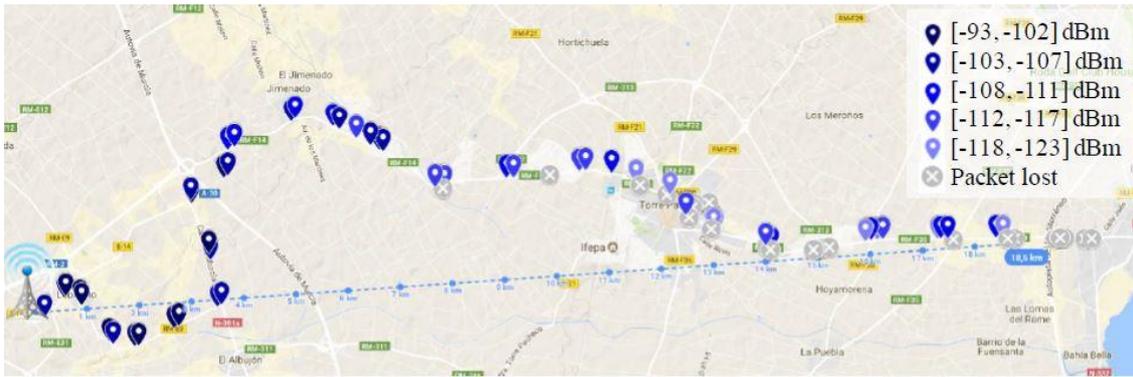
(a) DR0



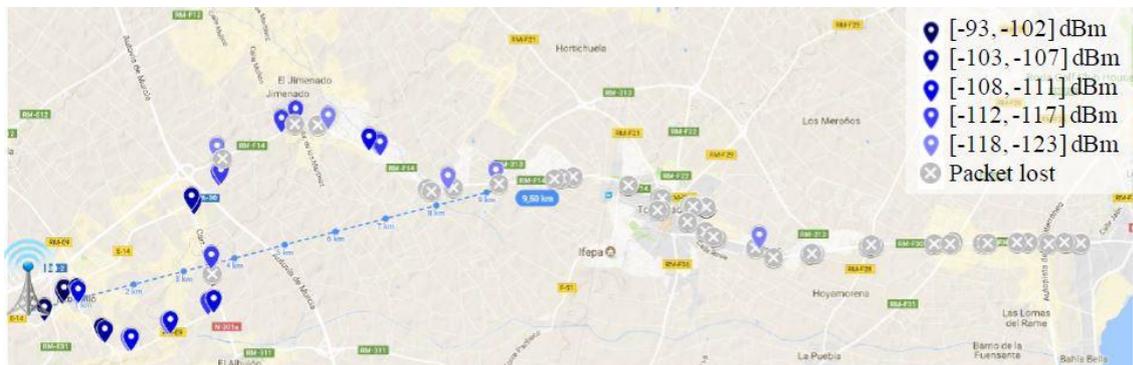
(b) DR5

**Figura 14.** Mapa RSSI en el escenario suburbano.

En el escenario rural había menos obstáculos para las comunicaciones, por lo que fue el escenario con mejores resultados obtenidos. La máxima distancia alcanzada en la comunicación fue de 18.5 Km y se produjo con la configuración DR0 (Figura 15 (a)) mientras que para DR5 se obtuvo un alcance de 9.5 Km (Figura 15 (b)).



(a) DR0



(b) DR5

**Figura 15.** Mapa RSSI en el escenario rural.

## 4.2. Discusión de resultados

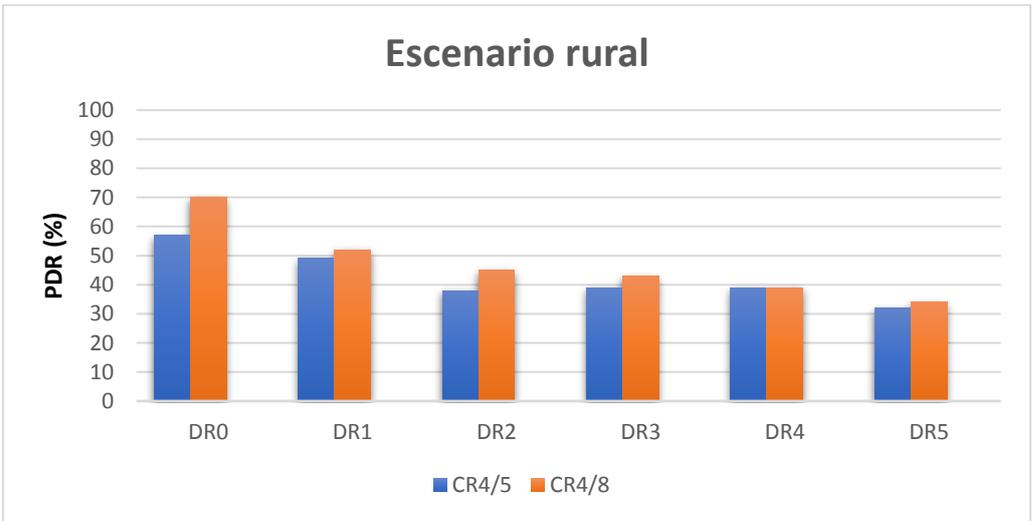
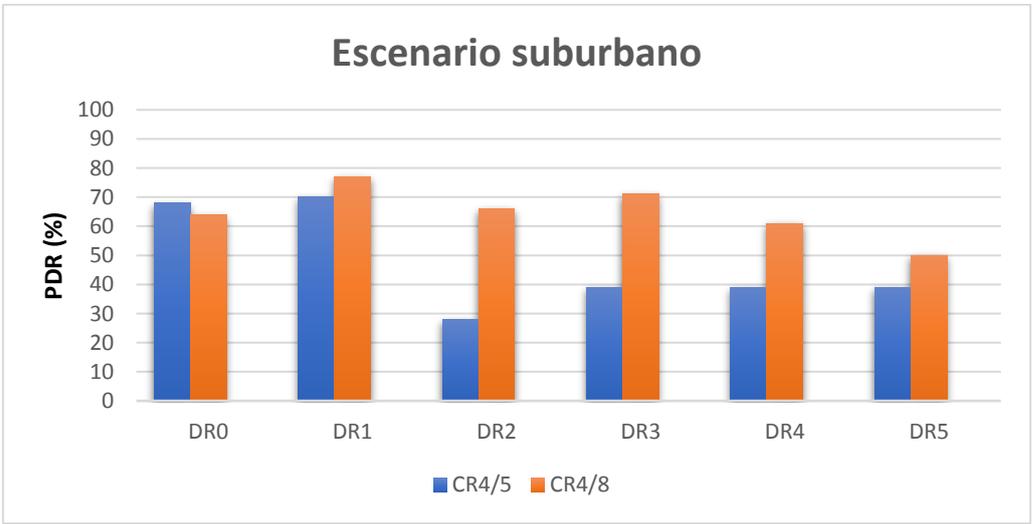
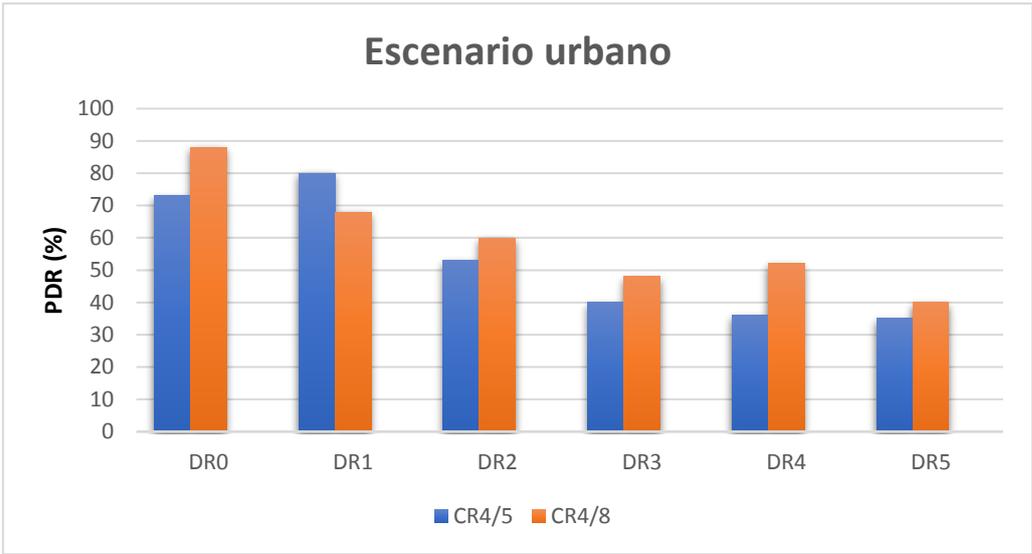
Analizando los resultados anteriores y, teniendo en cuenta que los diferentes valores posibles para CR y parámetros de longitud de paquete no se distinguen en los mapas anteriores, podemos observar las diferencias entre las distancias máximas alcanzadas para los tres escenarios debidas a la variación del factor DR. La Tabla 2 presenta el conjunto completo de resultados con respecto al enlace más largo establecido en los tres entornos de estudio considerando las seis configuraciones DR diferentes. El comportamiento obtenido es, como se esperaba, que una DR mayor conduce a distancias cubiertas más cortas. Algunas irregularidades en este comportamiento, por ejemplo, en el escenario suburbano, son justificadas por la presencia aleatoria de obstáculos y el impacto de la movilidad del vehículo.

**Tabla 2.** Alcance máximo (Km)

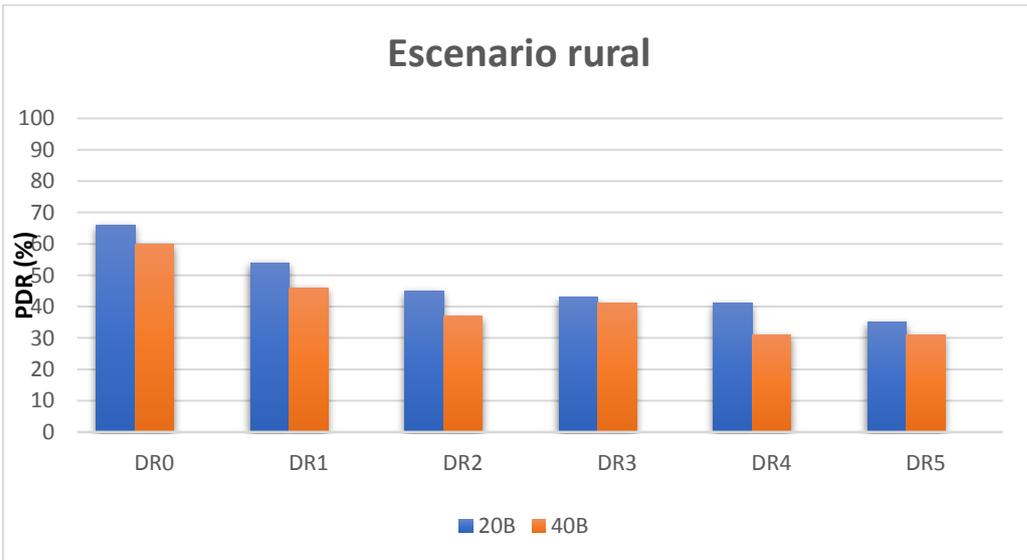
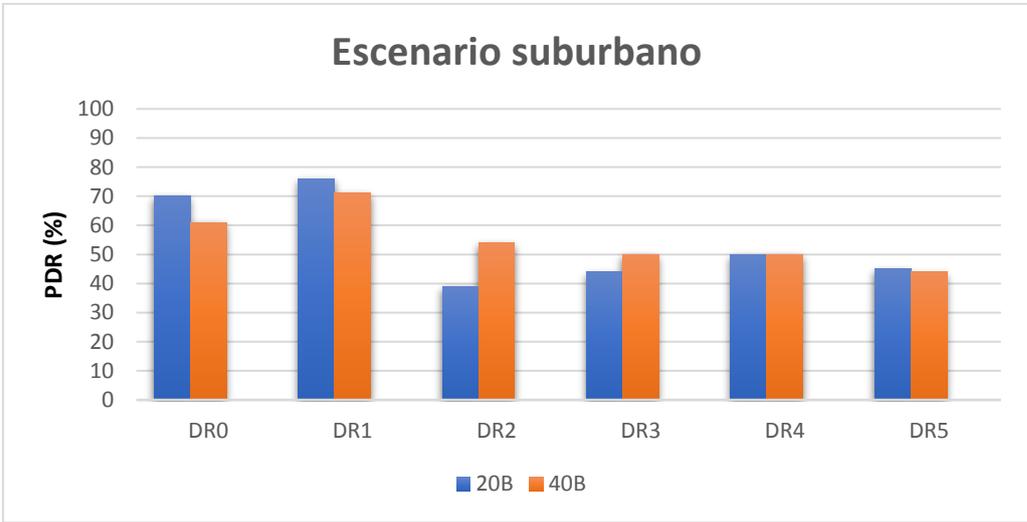
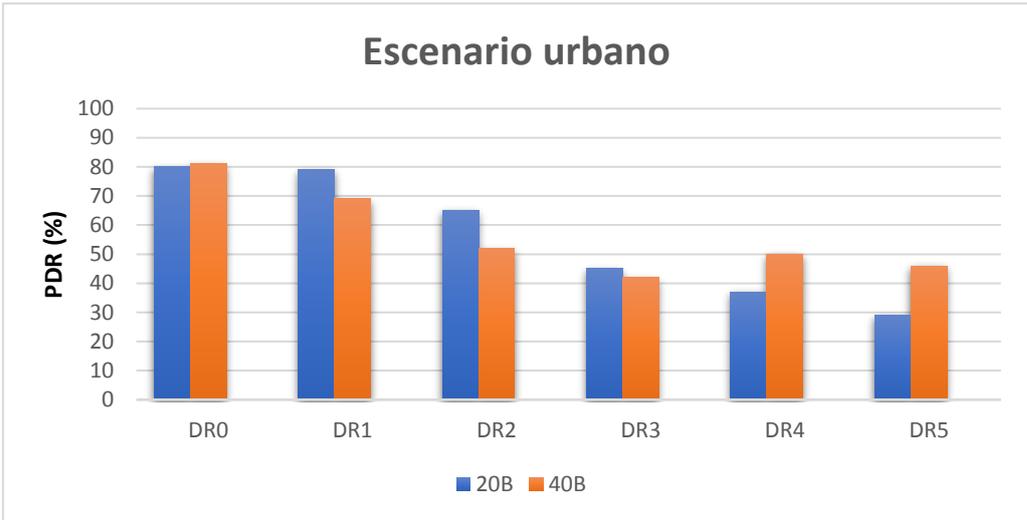
DR	Urbano	Suburbano	Rural
DR0	6.5	6.7	18.5
DR1	5.4	5.8	13.7
DR2	4.5	5.7	11.6
DR3	4.4	6.3	11.5
DR4	4	5.0	10.3
DR5	2.8	5.5	9.6

Con respecto a la influencia de la configuración LoRaWAN en el rendimiento del sistema, además del parámetro DR, el parámetro CR y la longitud de Payload también se han ajustado durante los experimentos. Centrándose en el impacto del CR (Figura 16) se puede observar que al agregar información redundante en el encabezado LoRaWAN (CR = 4/8), se obtiene una mejora notable en la fiabilidad del enlace para la mayor parte del escenario. Al observar este comportamiento, se puede concluir que muchas de las transmisiones se reciben parcialmente dañadas y luego son rectificadas en el receptor por el mecanismo de corrección de errores (FEC) de LoRaWAN. Por lo tanto, en este caso, la sobrecarga adicional es justificada a cambio de la mayor robustez del enlace proporcionada por el algoritmo FEC.

Centrándonos en la longitud de la carga útil (Figura 17), se observa que, incluso considerando dos longitudes de carga cortas, es decir, 20 B y 40 B, se logra una mejora de PDR perceptible cuando se emplea la más corta. Esto puede ser un resultado esperado, ya que las transmisiones más cortas son menos propensas a verse afectadas por el efecto de las interferencias, colisiones y otros efectos dañinos típicos inherentes a los sistemas inalámbricos.



**Figura 16.** Impacto de CR en la transmisión según los escenarios



**Figura 17.** Impacto de BW en la transmisión según los escenarios

A la luz de estos resultados, se podría afirmar que la mejor opción siempre es emplear un bajo DR, por ejemplo, DR0 y alto CR, por ejemplo, 4/8 para garantizar la conectividad a largo plazo y la fiabilidad del enlace.

Sin embargo, hay una compensación importante relacionada con el tiempo-en-aire (Time-on-Air, ToA) de cada paquete transmitido, motivado por el ancho de banda escaso (125 kHz) y las bajas velocidades disponibles en LoRaWAN, que hacen que la ocupación del canal para cada transmisión no sea despreciable.

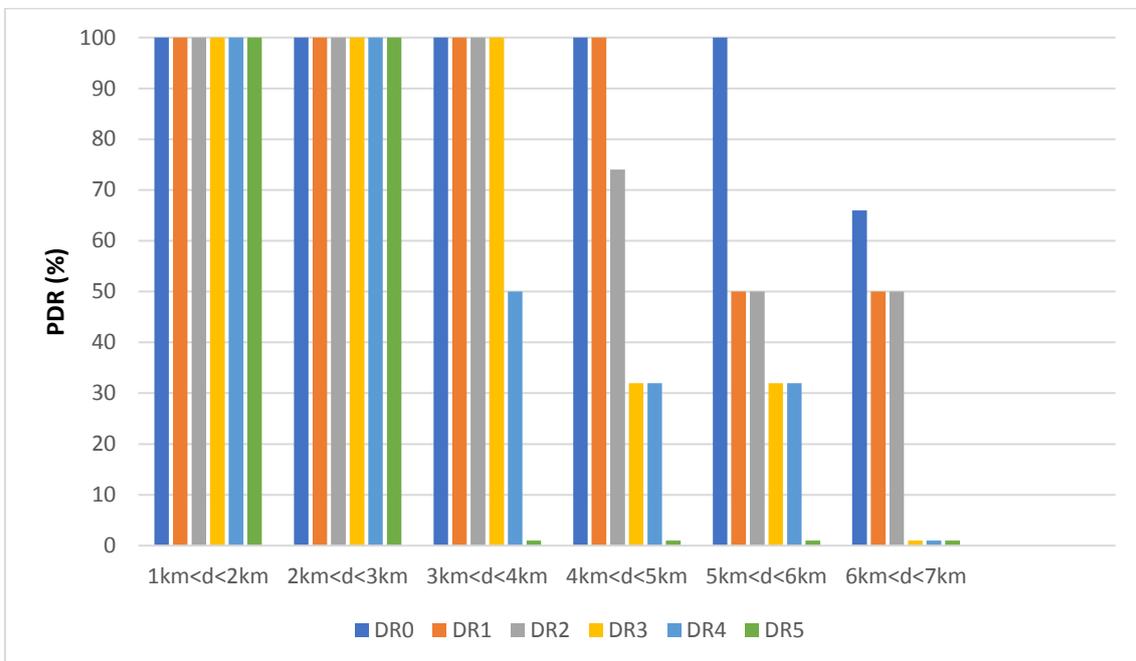
Para ilustrar esta afirmación, la Tabla 3 muestra el ToA para las diferentes configuraciones consideradas en nuestros experimentos. Como se discutió en [9], el ciclo de trabajo restringido en las bandas ISM junto con los largos ToA de LoRaWAN limita severamente el número de nodos que pueden conectarse simultáneamente a una sola estación base y, por supuesto, el número de transmisiones por nodo por día.

Por esa razón, es deseable mantener el ToA tan corto como sea posible, por lo tanto, dependiendo de la distancia del nodo final a la estación base, se deben emplear diferentes DR con el objetivo de equilibrar la fiabilidad de la transmisión y la ocupación de canales.

**Tabla 3.** Tiempo en el aire (ms) para las distintas configuraciones LoRaWAN

<b>DR</b>	<b>Payload = 20 bytes CR = 4/5   CR= 4/8</b>	<b>Payload = 40 bytes CR = 4/5   CR= 4/8</b>
<b>DR0</b>	1810   2499	2466   3547
<b>DR1</b>	987   1380	1315   1905
<b>DR2</b>	453   625	616   887
<b>DR3</b>	247   345	329   476
<b>DR4</b>	134   189	185   271
<b>DR5</b>	72   103	103   152

Para ejemplificar esta estrategia, la Figura 18 representa el PDR obtenido para cada DR, considerando la distancia del nodo final a la estación base en el entorno urbano, para la configuración más favorable, es decir, CR = 4/8 y carga útil de 20 B. Obsérvese que no es necesario emplear DR más bajo en distancias inferiores a 3 Km, ya que se alcanza un PDR del 100% para el DR más alto. Esto lleva a una reducción del 96% de los ToA de cada transmisión, de 2499 ms a 103 ms (Tabla 3). Además, hay que tener en cuenta que el mayor DR sólo sería recomendable en los enlaces lejanos de más de 5 km. Con esta estrategia, la fiabilidad del sistema se puede mantener si la ocupación del canal también se controla, lo que permite mejorar la escalabilidad del sistema [10].



**Figura 18.** Evolución del PDR con la distancia para cada DR en el escenario urbano.  
CR=4/8, P=20B

## 5. CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo, se ha presentado una evaluación integral del desempeño de LoRaWAN en varios escenarios realistas. Diferentes configuraciones de la modulación LoRa se exploraron para evaluar la más apropiada dependiendo de las condiciones de propagación. En primer lugar, se ha estudiado teóricamente el despliegue de antenas de cobertura para Murcia y Cartagena; en los mapas obtenidos podemos observar cómo el uso de antenas omnidireccionales produce un mejor resultado que las antenas directivas. Las antenas omnidireccionales, aparte de ser una opción más económica, cubren una zona mayor y más homogénea de cobertura ofreciendo un mejor servicio. Por otra parte, se han estudiado de forma experimental tres entornos típicos, a saber, urbano, suburbano y rural, con el objetivo de considerar su adversidad para las transmisiones inalámbricas y su correspondiente impacto en el rendimiento de LoRaWAN. En los escenarios más adversos, es decir, áreas urbanas y suburbanas, se alcanzaron rangos de 6 km; a su vez, en el escenario abierto (rural) se logró una distancia de transmisión de más de 18 Km. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que existe una relación de compromiso entre la robustez del enlace y la velocidad de datos (y en consecuencia, el tiempo en el aire del paquete); por lo tanto, dependiendo de las condiciones de propagación y la distancia entre la estación base y el nodo final, los parámetros de configuración de LoRaWAN deben ajustarse en consecuencia. Concretamente, en el escenario urbano, para enlaces de menos de 3 km, se alcanzaron los mismos niveles de PDR para los diferentes DR en evaluación. Por lo tanto, con el objetivo de reducir el tiempo en el aire para cada paquete, es más conveniente emplear DR altos. Cuando la distancia entre ambos extremos de la comunicación se agranda, los DR menores permiten aumentar la robustez del enlace a un costo de disminuir drásticamente la velocidad de transmisión.

A la luz de estos resultados, se puede concluir que LoRaWAN presenta un alto nivel de adaptabilidad para ser empleado en varias aplicaciones IoT, tales como ciudades inteligentes, seguimiento de flotas / bienes, etc., mediante la aplicación de la configuración más adecuada.

Como líneas de trabajo futuras, se plantea el despliegue de un sistema LoRaWAN en escenarios reales para dar servicio en distintos entornos altamente demandados, como agricultura inteligente, sensorización de edificios, etc.

Por otra parte, también se intentará proporcionar más inteligencia al sistema con el fin de que sea capaz de adaptar los ajustes de LoraWAN por sí mismo según las condiciones de propagación de los nodos finales. Además, se pueden agregar servicios adicionales a la estación base como el preprocesamiento de datos o el almacenamiento de datos en caché.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abu-Elkheir, M., Hayajneh, M., Abu Ali, N. Data Management for the Internet of Things: Design Primitives and Solution. *Sensors* 2013, 11, 14.
2. Sanchez-Iborra, R., Cano, M.D. State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors* 2016, 16, 708.
3. Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014–2020 Forecast: A Virtuous Circle of Proven Value and Demand. Available online: [https://www.business.att.com/content/article/IoT-worldwide\\_regional\\_2014-2020-forecast.pdf](https://www.business.att.com/content/article/IoT-worldwide_regional_2014-2020-forecast.pdf) (accessed on 10 May 2016).
4. Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., De Luca, C., Facchina, M. La ruta de las smart cities: Migrando de una gestión tradicional a la ciudad inteligente. Jul 2016.
5. LoRa<sup>®</sup> Alliance. A technical overview of LoRa<sup>®</sup> and LoRaWAN<sup>™</sup>
6. Sánchez-Iborra, R., Sánchez-Gomez, J., Ballesta-Viñas, J., Cano, M.D., Skarmeta, A. Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions. *Sensors* 2018, 3, 3.
7. Medium Corporation (US). <http://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora>
8. CloudRF - Online radio planning <https://cloudrf.com/> (accessed Dec 20, 2017).
9. LoRa-Alliance A technical overview of LoRa and LoRaWAN. *White Pap.* 2015.
10. Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., Watteyne, T. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Commun. Mag.* 2017, 55, 34.