

# **EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE SISTEMAS LORA EN ZONAS MONTAÑOSAS**

## *PERFORMANCE EVALUATION OF LORA SYSTEMS IN MOUNTAIN ENVIRONMENTS*

### **Josué Enrique Chávez Lara**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*20160409@itoaxaca.edu.mx*

### **Luis Fernando José González**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*19160463@itoaxaca.edu.mx*

### **Josué Hueto López**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*15160559@itoaxaca.edu.mx*

### **Aldo Eleazar Pérez Ramos**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*dr.aldo@itoaxaca.edu.mx*

### **Roberto Tamar Castellanos Baltazar**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*roberto.castellanos@itoaxaca.edu.mx*

### **Juan José Martínez Caballero**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*juan.martinez@itoaxaca.edu.mx*

**Recepción:** 13/noviembre/2024

**Aceptación:** 27/diciembre/2024

## **Resumen**

Los sistemas LoRa/LoRaWAN se han propuesto recientemente para el rastreo de personas y el monitoreo de parámetros ambientales, industriales y biomédicos en áreas urbanas. Sin embargo, se plantea la hipótesis de que también pueden ser efectivos para el rastreo de senderistas, ciclistas de montaña y/o la detección de incendios forestales en áreas montañosas con vegetación densa. Antes de su despliegue, es necesaria una evaluación tecnológica exhaustiva que valide esta suposición. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una evaluación experimental del rendimiento de sistemas LoRa/LoRaWAN, con diversas configuraciones de capa

física, realizada en la Sierra Juárez, Oaxaca, México. Los resultados obtenidos indican que la configuración DR0 de LoRaWAN establece enlaces de comunicación confiables. No obstante, es importante lograr un compromiso entre tasa de entrega de paquetes y número de bytes por paquete transmitido para cumplir con las regulaciones espectrales vigentes.

**Palabras Claves:** Evaluación tecnológica, LoRa, monitoreo, Montaña, Senderistas.

## **Abstract**

*LoRa/LoRaWAN systems have recently been proposed for tracking individuals and monitoring environmental, industrial, and biomedical parameters in urban areas. However, it is hypothesized that these systems may also be effective for tracking hikers, mountain bikers, and wildfire detection in mountainous regions characterized by dense vegetation. Prior to deployment, a thorough technological assessment is necessary to validate this assumption. Therefore, this study presents an experimental performance evaluation of LoRa/LoRaWAN systems with various physical layer configurations, conducted in the Sierra Juárez, Oaxaca, Mexico. The results indicate that the DR0 configuration of LoRaWAN establishes reliable communication links. However, it is crucial a tradeoff between packet delivery rate and number of bytes per packet transmitted to comply with current spectral regulations.*

**Keywords:** *Hikers, LoRa, Mountain, Monitoring, Technological assessment.*

## **1. Introducción**

El Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) ha emergido como el nuevo paradigma de comunicación entre objetos físicos cotidianos y sofisticados, dotados de sensores integrados, software y tecnologías para intercambiar información a través de Internet, [Alobaidy, 2022]. El concepto de IoT se ha materializado recientemente debido a los avances en la muy alta integración de sensores, sistemas embebidos, tecnologías inalámbricas, mecanismos y protocolos de comunicación, análisis informático, entre otras. Cisco espera hasta 500 mil millones

de dispositivos IoT conectados a Internet para el 2030, frente a solo 26 mil millones de dispositivos en 2020 [Nguyen, 2021].

Recientemente, la tecnología LoRa ha ganado mayor popularidad en los sectores industriales y de investigación debido a su capacidad para establecer enlaces de comunicaciones de largo alcance y bajo consumo de energía, [Queralta, 2019], [Ferreira, 2020]. Las características técnicas de LoRa han sido de gran interés para varios grupos de investigación, por lo que han evaluado su rendimiento en escenarios diversos como se puede observar en las referencias 1 a 15 de [Parri, 2019], [Liang, 2020]. En la mayoría de estos trabajos se evalúan el alcance máximo de los enlaces de comunicación, el consumo de energía de los dispositivos, la confiabilidad de las comunicaciones, etc. De igual manera, estos estudios han sido propuestos para aplicaciones IoT implementando redes inalámbricas de sensores (WSN por sus siglas en inglés) dentro de entornos urbanos, y otros pocos han considerado entornos rurales con vegetación abundante y/o terreno accidentado (p. ej. cañones, montañas, bosques, etc.), [Di Renzone, 2022], [Ferreira, 2020].

Por ejemplo, [Di Renzone, 2022] propone un sistema híbrido para el seguimiento de personas utilizando GPS y la adquisición de indicadores de intensidad de señal recibida (RSSI por sus siglas en inglés) de enlaces LoRa en la zona de interés. [Ferreira, 2020] proporciona un estudio del rendimiento de la tecnología LoRa en entornos urbanos, suburbanos y bosque tropical. Con respecto a este último, realiza una evaluación de la tecnología de forma estática en periodos cortos y largos. En ambos trabajos utilizan la métrica RSSI para evaluar su desempeño, [Ferreira, 2020] agrega la métrica de tasa de entrega de paquetes (PDR por sus siglas en inglés) para evaluar la confiabilidad del enlace, pero no propone un sistema para el rastreo de personas en estos entornos. El trabajo de [Yim, 2018] proporcionan evaluaciones en entornos rurales para aplicaciones agrícolas, pero los escenarios de prueba no contemplan el impacto del terreno irregular.

Es importante mencionar que la implementación del concepto de WSN con tecnología LoRa en estos entornos montañosos facilitaría el monitoreo de los ecosistemas subyacentes y la detección oportuna de posibles amenazas como incendios, plagas, tala inmoderada, caza furtiva, contaminación, etc. Además, estas

redes podrían ser utilizadas como un medio de comunicación para aquellas personas que dentro de estas regiones montañosas realizan actividades como senderismo, escalada, ciclismo de montaña, etc. La implementación WSN-LoRa para recolectar información brindaría seguridad a las personas que realizan estas actividades debido a que en cualquier momento podrían enviar mensajes de alerta a las autoridades y/o particulares compartiendo su ubicación geográfica.

En este trabajo se presentan un estudio experimental del rendimiento de la tecnología LoRa en cuatro escenarios dentro del municipio de Santa María Tepantlali, Sierra Juárez del Estado de Oaxaca, México. La orografía de este municipio, terreno irregular y vegetación abundante, fueron propicias para evaluar sistemas LoRa en términos de PDR y RSSI con configuraciones de tasas de datos (DR0-DR4) del protocolo LoRaWAN. Además, con el mejor de nuestro conocimiento este trabajo es el primero que se realiza en la Sierra del Estado de Oaxaca por lo que se espera recabar información suficiente para el eventual despliegue de redes LoRa para rastrear y monitorizar signos vitales de personas en entornos montañosos.

### **Tecnología LoRa-LoRaWAN**

LoRa (acrónimo proveniente del inglés Long-Range) es una tecnología inalámbrica de largo alcance, de bajo consumo de energía y baja tasa de datos. En su capa física utiliza el esquema de modulación de espectro esparcido en chirp (CSS por sus siglas en inglés) que puede ser modificado con factores de esparcimiento (SF por sus siglas en inglés) que van desde SF7 a SF12. Este parámetro determina en gran medida la tasa de datos y la duración de la transmisión del mensaje conocido como tiempo en el aire (ToA por sus siglas en inglés). Otros dos parámetros relevantes de la capa física de LoRa son el ancho de banda (BW, acrónimo del inglés Bandwidth), que puede seleccionarse desde los 10 kHz hasta 500 kHz y la tasa de codificación (CR por sus siglas en inglés). El valor de la tasa de codificación debe elegirse entre 4 opciones: 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8. Esto denota que cada 4 bits útiles van a ser codificados por 5, 6, 7 u 8 bits de transmisión dependiendo de su valor utilizando un codificador Hamming, [Afisiadis, 2020]. Es

importante mencionar que los parámetros BW, SF y CR tienen el mayor impacto en la confiabilidad de la transmisión y el alcance o radio de cobertura, [Queralta, 2019]. LoRaWAN es un protocolo de red inalámbrica de área amplia y baja potencia (LPWAN por sus siglas en inglés) que define cómo los dispositivos LoRa o nodos sensores se comunican con las estaciones base (EB) y cómo se gestionan y enrutan los datos en una red IoT, [Queralta, 2019]. Con este protocolo se determina aspectos como los modos de funcionamiento de los dispositivos (Clase A, Clase B y Clase C), los canales para establecer enlaces entre dispositivos LoRa y la estación base, configuración de los parámetros <SF, BW, CR> para determinar las tasas de datos (DR por sus siglas en inglés), aspectos sobre la arquitectura de red, entre otros. En lo que respecta al DR es importante mencionar que LoRaWAN también determina la cantidad de bytes permitidos para cumplir con las regulaciones emitidas por los organismos como la Comisión Federal de las Comunicaciones (FCC por sus siglas en inglés) en Estados Unidos o el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) en México. Por ejemplo, en [Castells-Rufas, 2018] se menciona que el tiempo promedio de ocupación de un canal en la banda Industrial Científica y Médica (ICM) de 902 – 928 MHz no debe exceder los 0.4 segundos en un período de 20 segundos cuando el ancho de banda de la señal LoRa sea igual o mayor a 250 KHz. En el caso de señales con anchos de banda inferiores a 250 KHz, el tiempo promedio de ocupación no deberá ser superior a 0.4 s cada 10 segundos. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros antes mencionados en donde se puede observar que existe limitaciones en el número de bytes por mensaje o paquete para cada DR.

Tabla 1 Configuraciones de LoRaWAN utilizadas en la evaluación.

<b>DR</b>	<b>Configuración</b>	<b>Bytes por paquete</b>	<b>Tasa de datos (bps)</b>	<b>ToA (ms)</b>
0	SF10,125 kHz,4/5	11	980	248
1	SF9,125 kHz,4/5	51	1760	329
2	SF8,125 kHz,4/5	51	3125	185
3	SF7,125 kHz,4/5	115	5470	195
4	SF8,500 kHz,4/5	222	12500	154

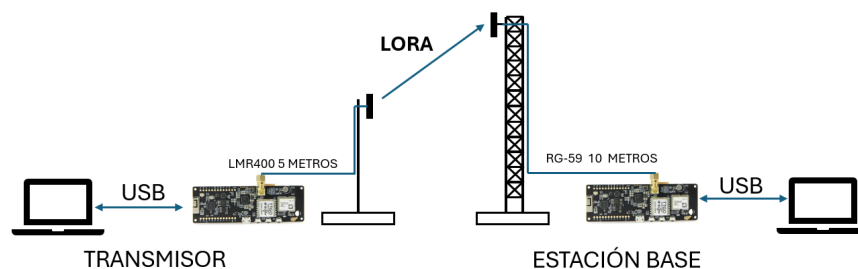
*Fuente: elaboración propia*

Con esta información es posible conocer de antemano cual configuración podría cumplir con el transporte de los bytes por paquete para una aplicación determinada. Por ejemplo, la estructura de paquete utilizada en el sistema de rastreo y monitoreo de signos vitales LPWAN-LoRa propuesto por [Velasco, 2020] utiliza 40 bytes para transmitir hora, ubicación geográfica, frecuencia cardiaca y saturación de oxígeno de la persona. Con este número de byte por paquete podrían utilizarse las configuraciones DR1 a DR4 sin la necesidad de aplicar algoritmos de compresión de datos.

## 2. Métodos

### Hardware y firmware del sistema de comunicaciones LoRa

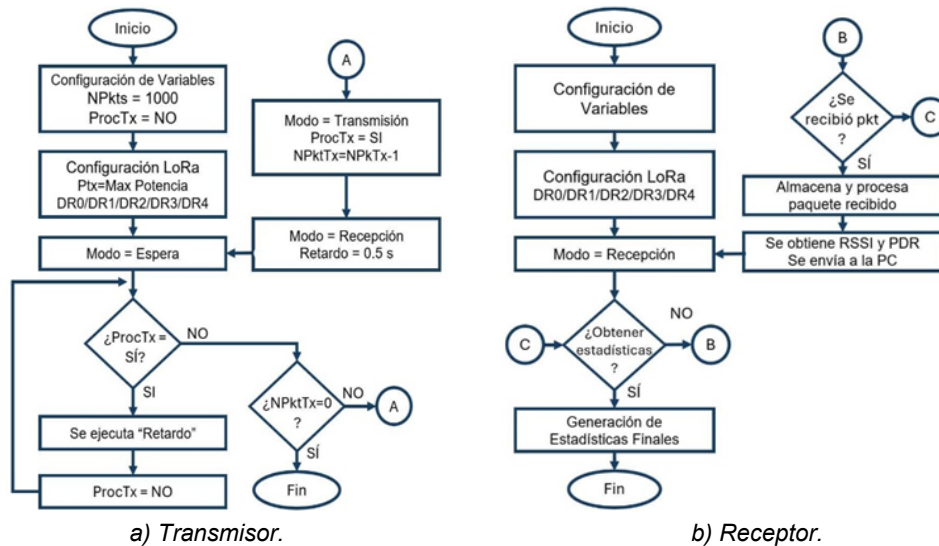
Se seleccionaron las tarjetas de desarrollo TTGO T-Beam ESP32 LoRa debido a las excelentes capacidades de procesamiento, memoria, consumo de energía, herramienta de desarrollo simple y amplia documentación técnica del microcontrolador ESP32 y el transceptor LoRa SX1276. Ambos dispositivos han sido utilizados ampliamente para diferentes aplicaciones del Internet de las Cosas. Por ejemplo, en [Azhar, 2022] se reportan los resultados de un estudio sobre el rendimiento de esta tarjeta para una aplicación de monitoreo de parámetros biomédicos en un entorno urbano. Las tarjetas son conectadas hacia una computadora personal que son utilizadas para programar el código fuente en la tarjeta y para proporcionar energía para su funcionamiento. Adicionalmente se utilizan líneas de transmisión de 5 metros, para el caso del transmisor LMR400 y para el receptor dos cables coaxiales modelo RG-59. El sistema de comunicaciones implementado en las zonas montañosas se muestra en la Figura 1.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama del sistema de comunicación LoRa.

Con respecto al firmware, se programaron los códigos fuente para habilitar un transmisor y un receptor (Estación Base) LoRa. En la Figura 2 se presentan los diagramas de flujo del código fuente programados en cada uno de los dispositivos.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Diagrama de flujo de los programas principales.

Es importante mencionar que el código contempla la modificación de los parámetros SF, BW y CR de acuerdo con la Tabla 1 para implementar enlaces con las configuraciones DR0, DR1, DR2, DR3 y DR4. Además, en esta evaluación se configuró el transceptor SX1276 con una potencia de  $-5\text{ dBm}$  (máxima potencia entregada por el dispositivo utilizado) emitiendo señales en  $915\text{ MHz}$ . De acuerdo con una evaluación espectral de sitio realizada antes de cada prueba, se pudo comprobar que el canal de comunicaciones se encontraba libre, por lo que solo los efectos del entorno serán registrados en el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI por sus siglas en inglés).

### Calibración del sistema de comunicaciones LoRa

Es importante mencionar que antes de llevar a cabo las mediciones en el entorno montañoso, se realizaron pruebas en laboratorio para calibrar y medir la potencia máxima emitida por el dispositivo transmisor, así también determinar la atenuación de los cables coaxiales utilizados en el sistema.

Para el desarrollo de estas pruebas se utilizó una tarjeta TTGO T-Beam ESP32 LoRa configurada como transmisor DR0, un analizador de espectros USB-SA44B de Signal Hound, atenuador de 10 dB y los cables coaxiales LMR400 y RG-59 utilizados en el sistema LoRa. En la Figura 3 se presentan las camas de pruebas implementadas para medir la potencia de emisión de la tarjeta y la atenuación causada por los cables.

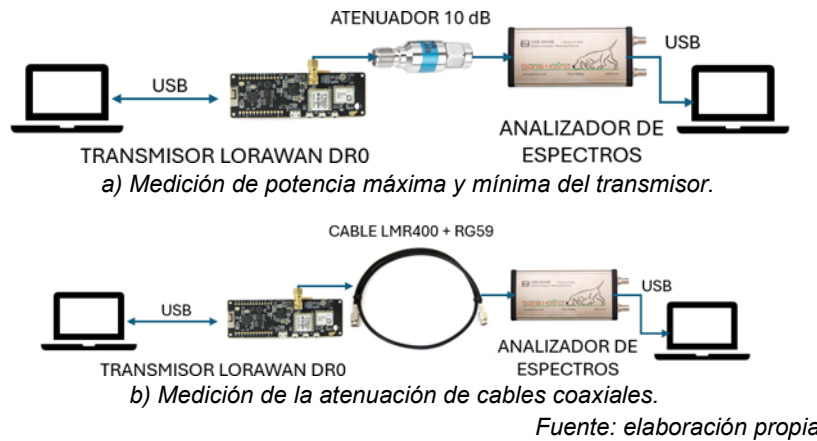


Figura 3 Camas de pruebas para calibración del transmisor.

En todas las mediciones realizadas se configuró el analizador de espectros con el software SPIKE para un RBW de 10 kHz, frecuencia central de 902 MHz, SPAN de 500 kHz, detector promediador, atenuación y ganancia cero.

Adicionalmente, se realizaron pruebas en un entorno libre de interferencias y objetos para validar el correcto funcionamiento del código fuente del transmisor y receptor. La zona deportiva del Instituto Tecnológico de Oaxaca fue seleccionada para realizar las pruebas, la altura de las antenas fue de 2 m y la separación entre transmisor y receptor fue de 15 m. Se transmitieron 1000 paquetes con la configuración de DR0.

### Descripción del Entorno Montañoso

El municipio de Santa María Tepantlali, ubicado en la Sierra Juárez del Estado de Oaxaca fue seleccionado debido a las características de vegetación abundante y terreno montañoso, las cuales también se pueden observar en la mayoría de los



municipios de la Sierra Norte y Sierra Sur en el estado. En la Figura 4 se presentan las ubicaciones seleccionadas para la evaluación del rendimiento de la tecnología LoRa. Como se observa en la Figura 4, se establecieron 4 enlaces hacia la estación base (EB), los cuales pueden considerarse como cuatro entornos montañosos distintos. Estas ubicaciones se seleccionaron considerando el perfil del terreno, la facilidad y seguridad del lugar para realizar las evaluaciones.



*Fuente: elaboración propia*

Figura 4 Puntos de prueba en el municipio de Santa María Tepantlali, Oaxaca México.

### Entorno 1: PA – Estación Base

En este escenario el enlace tiene una longitud entre transmisor y receptor de 270 *metros*, es el menor de todos los enlaces. Sin embargo, no tiene línea de vista (NLOS por sus siglas en inglés) por el perfil de terreno accidentado y la presencia de algunos árboles en el trayecto. La altura de la antena transmisora fue de 3 *metros* sobre el nivel de terreno y la altura de la antena en la EB fue de 10 *metros* para todos los escenarios. En la Figura 5 se presenta el perfil de terreno y una fotografía del transmisor instalado en PA.



a) Perfil de terreno.



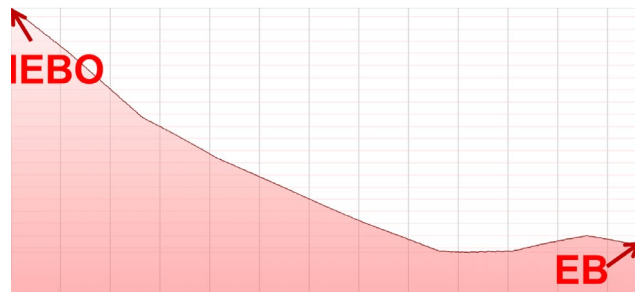
b) Transmisor instalado en PA.

*Fuente: elaboración propia*

Figura 5 Transmisor LoRa en la ubicación PA – Estación Base.

## Entorno 2: IEBO – Estación Base

En este entorno el enlace tiene una longitud de 630 m. En el trayecto se tienen estructuras metálicas y vegetación abundante que obstruyen el trayecto de forma parcial entre la antena transmisora que se colocó a una altura de 2 m y la antena de la EB. La Figura 6 muestra el perfil del terreno, la instalación de la antena transmisora y las condiciones del entorno.



a) Perfil de terreno.



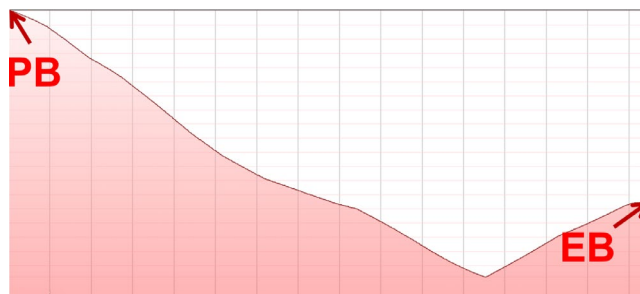
b) Transmisor instalado en IEBO.

Fuente: elaboración propia

Figura 6 Transmisor LoRa en la ubicación IEBO – Estación Base.

## Entorno 3: PB – Estación Base

En la Figura 7 se presenta el perfil del terreno del enlace con longitud de 760 m entre la ubicación PB y EB. La antena transmisora se instaló a 2.70 m de altura sobre el nivel del terreno. En la fotografía se puede observar abundante vegetación por debajo de la claridad del enlace. Este es el único enlace con línea de vista entre transmisor y receptor.



a) Perfil de terreno.



b) Transmisor instalado en PB.

Fuente: elaboración propia

Figura 7 Transmisor LoRa en la ubicación PB – Estación Base.

#### Entorno 4: PC – Estación Base

Este escenario es el que presenta mayores retos, no existe línea de vista, el terreno es irregular y existe vegetación abundante. Además, la distancia entre transmisor y estación base es la mayor de todos los escenarios con 930 metros. Se instaló la antena transmisora a una altura de 2.5 metros. En la Figura 8 se presenta el perfil de terreno y una fotografía del transmisor instalado en la ubicación PC.

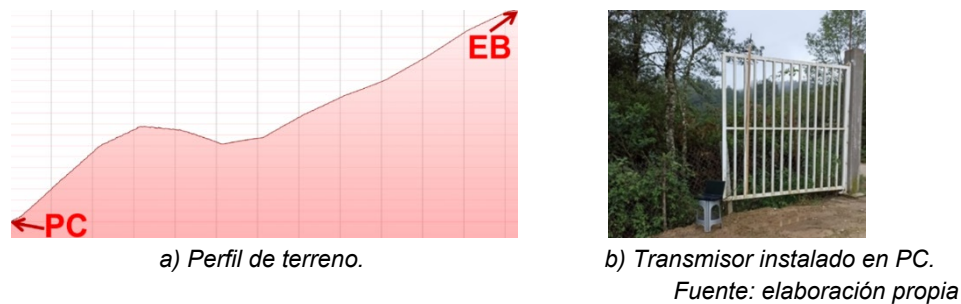


Figura 8 Transmisor LoRa en la ubicación PC – Estación Base.

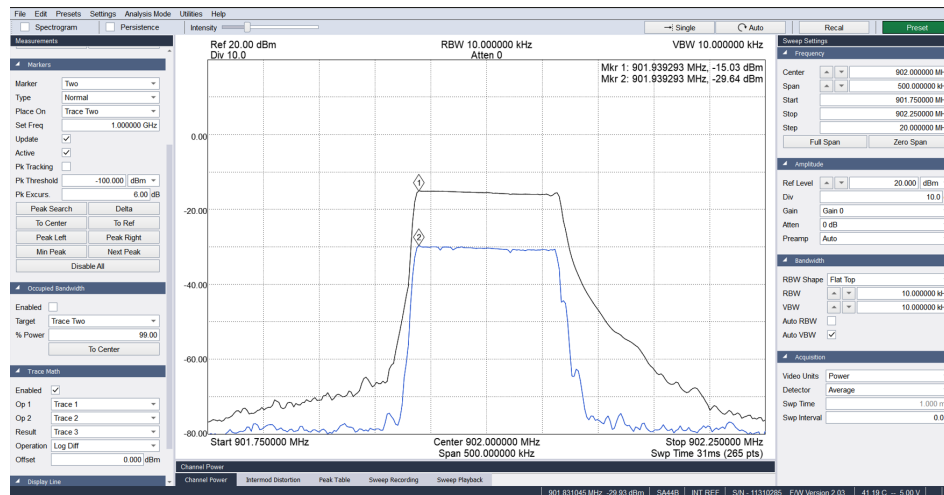
#### Procedimiento para la evaluación de rendimiento

Una vez realizada la validación del sistema de comunicaciones LoRa en ambiente de laboratorio con el propósito de depurar los errores de código y hardware, se implementó en cada uno de los entornos montañosos presentados en las Figuras 2 a 5. Se transmitieron 1000 paquetes con una carga útil para cada DR como la que se indica en la Tabla 1. El dispositivo receptor en la Estación Base (EB) recibió y procesó los paquetes, obtuvo el RSSI y también calculó la tasa de entrega de paquetes (PDR por sus siglas en inglés). Esta información se envió a una computadora personal conforme a lo programado en el código fuente del receptor. Es importante mencionar que la PDR se determina dividiendo el número total de paquetes recibidos en la EB entre el número total de paquetes transmitidos por el dispositivo transmisor multiplicando el resultado por 100%. Este procedimiento se repitió en los cuatro entornos antes descritos.

### 3. Resultados

El proceso de calibración y medición de la potencia máxima y mínima del transmisor utilizando la cama de pruebas de la Figura 3a son presentados en la

Figura 9. Se puede observar que la potencia máxima emitida por el transmisor es de  $-15.03\text{ dBm}$  y la mínima es de  $-29.64\text{ dBm}$ . No obstante,  $10\text{ dB}$  son debido al atenuador utilizado, por lo que la máxima potencia de emisión real de la tarjeta es de  $-5\text{ dBm}$  y la mínima de  $-19.64\text{ dBm}$ . Con respecto a la atenuación combinada de  $5\text{ metros}$  de cable LMR400 y  $10\text{ metros}$  de cable RG-59, se registró una atenuación de  $7\text{ dB}$  al implementar la cama de pruebas mostrada en la Figura 3 (b).



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Medición de la potencia de transmisión con el Software Spike.

Adicionalmente, durante las pruebas del sistema en un ambiente controlado libre de objetos e interferencias (Figura 10), se pudo registrar una tasa de entrega de paquetes (PDR por sus siglas en inglés) del 100%, esto es, se recibieron los 1000 paquetes transmitidos y se obtuvo una RSSI de  $-56\text{ dBm}$ .



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Cama de pruebas implementada en la zona deportiva del IT Oaxaca.

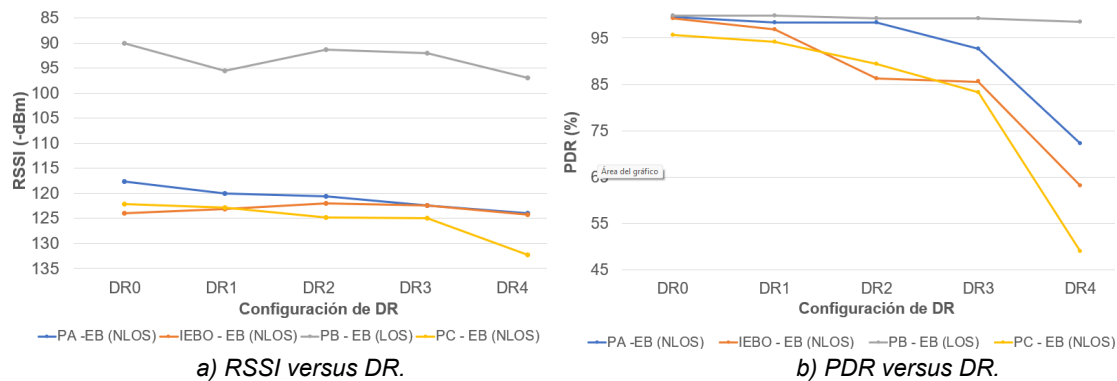
Es importante hacer notar que al utilizar la calculadora de la compañía Pasternack, la cual se basa en la ecuación de Friis, entrega un valor de  $-55.90 \text{ dBm}$ . Los parámetros de entrada a dicha herramienta fueron: ganancia de antena transmisora y receptora de  $2.15 \text{ dBi}$ , frecuencia de  $915 \text{ MHz}$ , distancia entre antenas de  $15 \text{ m}$ , potencia de transmisión de  $-5 \text{ dBm}$ . En la Figura 10 se presenta el área donde se realizaron las pruebas de PDR y RSSI al interior de la zona deportiva del Instituto Tecnológico de Oaxaca.

Por otro lado, en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en los diferentes enlaces dentro de la comunidad de Santa María Tepantlali, Sierra Juárez, Oaxaca, México. Adicionalmente, en la Figura 10 se presentan los resultados en gráficas para mostrar el comportamiento con los diferentes obstáculos que se presentaron en los diferentes entornos.

Tabla 2 Resultados de las mediciones realizadas en Santa María Tepantlali.

Entornos	RSSI ( $- \text{dBm}$ )					PDR (%)				
	DR0	DR1	DR2	DR3	DR4	DR0	DR1	DR2	DR3	DR4
PA - EB (NLOS)	117.7	120	120.6	122.4	124	99.6	98.4	98.3	92.7	72.3
IEBO - EB (NLOS)	124	123.2	122	122.5	124.3	99.2	96.8	86.3	85.6	63.2
PB - EB (LOS)	90	95.6	91.4	92	96.9	99.9	99.8	99.2	99.3	98.5
PC - EB (NLOS)	122.2	122.9	124.8	125	132.3	95.7	94.2	89.4	83.3	48.9

Fuente: Elaboración propia



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Representación gráfica de los resultados obtenidos.

## 4. Discusión

Analizando los resultados del Entorno 1: PA-EB presentados en la Tabla 2 y Figura 11, se observa que la configuración con mejores niveles de RSSI y PDR

promedio es DR0. No obstante se debe considerar que se pueden transmitir solo 11 bytes por paquete y el tiempo en el aire (ToA por sus siglas en inglés) es de 248 *ms*. Con esta configuración, la transmisión de un paquete con la estructura que propuso [Velasco, 2020] no podría llevarse a cabo para rastrear a personas en zonas montañosas. Por tal motivo, debería considerarse el uso de DR1 o DR2 que pueden transmitir 51 bytes de información con una PDR superior al 98%, esto a pesar de los niveles de potencia recibida por debajo de los  $-115\text{ dBm}$ , demostrando la robustez de la tecnología LoRa con respecto a otros sistemas de comunicación.

Los resultados del entorno 2: IEBO-EB, donde también el canal es NLOS, se registraron valores de RSSI promedio por debajo de los  $-122\text{ dBm}$ . En este escenario la diferencia de RSSI entre todas las configuraciones de DR es de solo 2 *dB*. Sin embargo, se observan marcadas diferencias en la tasa de paquetes correctamente entregados (PDR). Esto permite observar que solo las configuraciones DR0 y DR1 proporcionaron una PDR por encima del 96% y las otras configuraciones están por debajo del 87% incluso llegando a 63.2% para DR4. Los autores consideran que estas variaciones en RSSI y PDR se deben a la estructura metálica que se encuentra en el trayecto la cual provoca reflexiones en la señal transmitida ocasionando interferencia constructiva y destructiva. Para comprobar este fenómeno deberían realizarse pruebas en periodos de tiempo extendidos como las realizadas por [Ferreira, 2020], por lo que se deja como trabajo a futuro.

El rendimiento de la tecnología LoRa evaluada en el entorno 3: PB-EB es superior en todo sentido a los obtenidos en los otros tres escenarios. Al contar con línea de vista entre la antena transmisora y receptora, todas las configuraciones reportan una PDR superior al 98%, esto a pesar de la distancia de 760 *metros* y las características de terreno irregular y vegetación abundante por debajo de la claridad del enlace.

Finalmente, el entorno 4: PC-EB, es el de mayor distancia, con 960 *metros*, y también en el que las condiciones de vegetación abundante y terreno irregular provocan que no exista línea de vista entre transmisor y receptor. Con la configuración DR0 se obtuvo una PDR de 95.7% con RSSI promedio de 122.2 y con DR4 se obtuvo una PDR 48.9% con RSSI promedio de  $-132.3\text{ dBm}$ . Esto

comprueba que el entorno 4 es el más agresivo de todos y a pesar de estas condiciones la configuración DR0 y DR1 pudieron entregar una PDR superior al 90%. Es importante tener en cuenta estos resultados debido a que se deberá tener presupuestado la pérdida de paquetes en este tipo de escenarios. Además, no se recomendaría utilizar las configuraciones DR3 y DR4 en estos entornos debido a los datos obtenidos en estas evaluaciones.

## **5. Conclusiones**

En condiciones de vegetación densa y/o terreno montañoso, el alcance máximo de la transmisión se reduce significativamente en comparación con entornos despejados. Las diferentes configuraciones de la capa física LoRa permiten apreciar estos cambios en las transmisiones. Por ejemplo, una configuración DR0 responde mejor en distintos tipos de entornos debido a su mayor alcance, pero sacrifica otros factores como la capacidad de transmisión, el tiempo en el aire y la direccionalidad de la cobertura. En contraste, una configuración DR3 ofrece un mayor rango de cobertura y una mayor tasa de transmisión de datos, pero a costa de un alcance reducido.

La calidad de la señal medida a través del RSSI depende en gran medida de la topografía del área. Por ejemplo, puedes estar muy cerca de la estación base, pero si hay un obstáculo denso, esto afectará la calidad de la señal, resultando en valores de RSSI más bajos en comparación con un dispositivo ubicado a mayor distancia, pero con una línea de vista despejada. Diversos factores pueden afectar la calidad de la señal en estos entornos, como la vegetación densa, las montañas y las edificaciones. Se observó que la calidad de la señal varía significativamente en función de la línea de vista entre la estación base y los nodos.

El porcentaje de PDR muestra mayores pérdidas en terrenos accidentados con vegetación abundante y menores pérdidas en entornos con vegetación abundante, pero con claridad en la línea de vista. La configuración DR0 mostró menor pérdida de paquetes, aunque también implica un mayor tiempo en el aire. Por otro lado, una configuración DR4, aunque produce una mayor tasa de datos, también reduce el alcance y aumenta la susceptibilidad a las interferencias. Por lo tanto, las diferentes



configuraciones pueden seleccionarse según las necesidades específicas de cada aplicación.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Alobaidy, H. A. H., Jit Singh, M., Behjati, M., Nordin R. and Abdullah, N. F. (2022). Wireless Transmissions, Propagation and Channel Modelling for IoT Technologies: Applications and Challenges in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 24095-24131, 2022.
- [2] Afisiadis, O., Burg, A., & Balatsoukas-Stimming, A. (2020, June). Coded LoRa frame error rate analysis, in *ICC 2020-2020. IEEE International Conference On Communications*.
- [3] Azhar Muzafar, M. I. Z., Mohd Ali, A., & Zulkifli, S. (2022). A study on lora SX1276 performance in IoT Health Monitoring, *Wireless Communications and Mobile Computing*.
- [4] Castells-Rufas, D., Galin-Pons, A., & Carrabina, J. (2018). The regulation of unlicensed sub-GHz bands: Are stronger restrictions required for LPWAN-based IoT success?. *arXiv preprint arXiv:1812.00031*.
- [5] Di Renzone, G., Giorgi, G., & Pozzebon, A. (2022, July). Outdoor sports tracking by means of hybrid GPS-LoRaWAN localization. In *2022 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)* (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., Costa, L. H. M., Foubert, B., Amadou, I., & Mitton, N. (2020). A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. *Annals of Telecommunications*, 75, 333-351.
- [7] Liang, R., Zhao, L., & Wang, P. (2020). Performance evaluations of LoRa wireless communication in building environments. *Sensors*, 20(14), 3828.
- [8] Nguyen, D. C., Ding, M., Pathirana, P. N., Seneviratne, A., Li, J., Niyato, D., ... & Poor, H. V. (2021). 6G Internet of Things: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(1), 359-383.
- [9] Parri, L.; Parrino, S.; Peruzzi, G.; Pozzebon, A. (2019). Low Power Wide Area Networks (LPWAN) at Sea: Performance Analysis of Offshore Data



- Transmission by Means of LoRaWAN Connectivity for Marine Monitoring Applications. *Sensors*, 19, 3239.
- [10] Queralta, J. P., Gia, T. N., Zou, Z., Tenhunen, H., & Westerlund, T. (2019). Comparative study of LPWAN technologies on unlicensed bands for M2M communication in the IoT: Beyond LoRa and LoRaWAN. *Procedia Computer Science*, 155, 343-350.
- [11] Velasco R., A., Pérez-Ramos, A. E., Galaviz-Mosqueda, G. A., Villarreal-Reyes, S., & Jiménez-Ramos, V. M. (2020). Diseño, Implementación y Evaluación de un oxímetro de pulso inalámbrico LP-WA para el Internet de las Cosas Médicas (IoMT). *Pistas Educativas*, 42(137).
- [12] Yim, D., Chung, J., Cho, Y., Song, H., Jin, D., Kim, S., ... & Riegsecker, A. (2018, March). An experimental LoRa performance evaluation in tree farm. In 2018 IEEE sensors applications Symposium (SAS) (pp. 1-6).