

## Cobertura de la claridad de Fresnel en LoRa IoT Coverage of Fresnel clarity in LoRa IoT

C.E. Pérez-Trujillo <sup>a</sup>, L.M. Galicia-Santos Segura <sup>a</sup>, R. León-Paredes <sup>a</sup>, J.R. Cárdenas-Valdez <sup>b</sup>,  
A. Calvillo-Téllez <sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería en Control y Automatización, Instituto Politécnico Nacional, ESIME., 07738, CDMX, México.

<sup>b</sup> Tecnológico Nacional de México Campus Tijuana, 22414 Tijuana, B.C

<sup>c</sup> Instituto Politécnico Nacional, CITEDI, 22435, Tijuana, Baja California, México.

### Resumen

El desarrollo de sistemas de monitoreo de variables desde una perspectiva de cobertura amplia aplicado a lugares remotos, con la necesidad de telemetría en tiempo real sin acceso a energía y que funcionen por largos periodos, hace que las tecnologías actuales LoRa IoT, brinden servicios de conectividad en entornos como ríos, lagos, bosques, entre otros. Esto requiere de sensores que realicen una telemetría de variables propias de la agricultura, ganadería, piscicultura entre otras. Estos sensores se expanden creando redes inalámbricas que transmiten datos a grandes distancias. Para obtener una buena cobertura que garantice la conectividad es necesario que los sistemas de comunicación de largo alcance presenten un análisis de libramiento de la claridad de Fresnel que muestren las condiciones técnicas de operación. Se presenta el análisis de la claridad y despeje de cobertura de la primera zona de Fresnel de dispositivos IoT con conectividad LoRa. El análisis y diseño de la comunicación inalámbrica de dispositivos IoT, presentan un perfil de alturas de antenas, curvatura terrestre y la estimación del libramiento de obstáculos entre las antenas, garantizando que la pérdida de señal no rebase la claridad del 60% de la primera zona de Fresnel. Las métricas obtenidas del análisis son el primer radio de la Zona de Fresnel de 9.037 metros de radio a 0.5 km; 60% de radio sin obstáculos de 5.4319 metros, distancia total del enlace de 1 km, distancia del obstáculo de 0.5 km, frecuencia portadora de 915 MHz.

*Palabras Clave:* Fresnel, LoRa, IoT.

### Abstract

With the development of variable monitoring systems in remote places with a wide coverage perspective, telemetry in real-time without access to energy and that operate for long periods, current LoRa IoT technologies are able to provide connectivity in remote environments such as rivers, lakes, and forests. As a result, sensors can carry out telemetry of variables typical to agriculture, livestock, and fish farming, among other things. The sensors are connected to wireless networks that transmit data over great distances. Long-range communication systems must present a Fresnel clearance analysis showing the technical conditions of operation in order to achieve good coverage and connectivity. The analysis of the clarity and coverage detection of the first Fresnel zone of IoT devices with LoRa connectivity is presented. The analysis and design of the wireless communication of IoT devices, presents a profile of antenna heights, earth curvature, and the estimation of the clearance of obstacles between the antennas, guaranteeing that the signal loss does not exceed the clarity of 60% of the first zone of Fresnel. The metrics obtained from the analysis are the first radius of the Fresnel Zone of 9,037 meters with a radius of 0.5 km; 60% radius without obstacles of 5.4319 meters, a total link distance of 1 km, obstacle distance of 0.5 km, the carrier frequency of 915 MHz.

*Keywords:* Fresnel, LoRa, IoT.

### 1. Introducción

Los medios de transmisión inalámbrica de cada tecnología tienen características propias que las hace ideales para aplicaciones que se adaptan a necesidades específicas como

lo son, frecuencia de operación de tasa de transmisión energía consumida, corto mediano o largo alcance. Por ejemplo, la comunicación a través de Bluetooth su tasa es baja en su alcance menor a 10 metros con un gran consumo de energía.

\*Autor para la correspondencia: [acalvillo@ipn.mx](mailto:acalvillo@ipn.mx)

Correo electrónico: [trujilloclaudiaelizabeth@gmail.com](mailto:trujilloclaudiaelizabeth@gmail.com) (C.E. Pérez-Trujillo), [galias1301@alumno.ipn.mx](mailto:galias1301@alumno.ipn.mx) (L. M. Galicia-Santos Segura), [rulix1999@gmail.com](mailto:rulix1999@gmail.com) (R. León-Paredes), [jose.cardenas@tectijuana.edu.mx](mailto:jose.cardenas@tectijuana.edu.mx) (J. R. Cárdenas-Valdez), [acalvillo@ipn.mx](mailto:acalvillo@ipn.mx) (A. Calvillo-Téllez).

El caso de la comunicación Wi-Fi, transmite grandes cantidades de datos a altas velocidades, mientras que su alcance promedio oscila entre los 10 metros a alta velocidad, con un consumo energético mayor (Baek, 2018). Para el caso de las aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), que requieren de adquisición de datos remota en tiempo real, como el control de iluminación urbana, el monitoreo del clima y la agricultura como se puede observar en la figura 1 (Sánchez, 2016), (Baek, 2018). Algunas de las variables que monitorean estas aplicaciones, son las condiciones climáticas, los niveles de humedad del suelo o el alumbrado público, cambian de valor lentamente durante un período prolongado (Aden, 2019).

Este tipo de aplicaciones centra su demanda en nodos de sensores de amplia cobertura por la separación que presentan, y donde deben funcionar con baterías, por lo que el protocolo inalámbrico óptimo debe adaptarse para enviar pequeños paquetes de datos de manera eficiente a largas distancias con un consumo mínimo de energía. Estas necesidades de telemetría son cubiertas justo por el protocolo LoRa que se adapta exactamente para solucionar la problemática de conectividad inalámbrica de censado y telemetría de cobertura amplia y autonomía de energía por largos periodos de tiempo (Tian, 2021), (Pickering, 2017).



Figura 1: Alcance de tecnologías inalámbricas.

La telemetría mediante Redes de Área Amplia con un consumo Bajo de Potencia (LPWAN) a través de bandas clasificadas como espectro de uso libre permiten aplicaciones de telemetría a costos bajos y coberturas amplias (Dai, 2022), (Davide, 2017). Con la incursión de la tecnología LoRa en este segmento de aplicaciones se aprovecha las características técnicas como la modulación del tipo espectro esparcido (Aden, 2019), (Baek, 2018). El espectro esparcido tolera la comunicación inalámbrica en presencia de ruido electromagnético, así como cierto grado de dispersión de la señal radioeléctrica que sufre difracción por obstáculos y la señal toma múltiples trayectorias, manteniendo bajo consumo de energía. El costo de lograr esto es el ancho de banda, que es bajo comparado con otras tecnologías inalámbricas.

El desarrollo de sistemas de monitoreo de variables que amplíe la cobertura de zonas de censado, en lugares remotos y que puedan funcionar por largos periodos de tiempo, hace que las tecnologías actuales brinden servicios de conectividad no solo en servicios de ciudades inteligentes sino también atender

telemetría de variables propias de la agricultura, ganadería, piscicultura entre otras (Hudiono, 2021), (Elijah, 2021). Los sistemas embebidos que realizan la función de nodos de sensores con mejoras en la eficiencia energética que incorporan la capacidad de comunicarse a larga distancia cuyo costo es bajo y que se comunican a través de Internet (IoT) se muestra en la figura 2 (Sánchez, 2018), (Almuhaya, 2022).



Figura 2: Conectividad inalámbrica IoT de dispositivos de sensores y actuadores realizando telemetría remota LoRa.

El medioambiente que rodea a un radioenlace LoRa se ve gravemente afectado por las obstrucciones que pudieran encontrarse en la trayectoria de visión entre las antenas (Jiang, 2020), (Khutsoane, 2017). La forma en se atiende la problemática que representan las obstrucciones y plantear el despeje del radioenlace, es esquematizar la zona de Fresnel (Barriquello, 2018). La Zona de Fresnel no es más que el área alrededor de la línea de visión en la dirección en que se propagan las ondas de radio después de emanar de la antena. Es deseable una línea de visión despejada para mantener la intensidad de la señal, especialmente para los sistemas inalámbricos. Los cuerpos de agua como el mar, lagos o ríos afectan de igual forma a las ondas de radio. Para garantizar la viabilidad del radioenlace LoRa la obstrucción no debe superar un 40 % del lóbulo que describe la ecuación de Fresnel. Este cálculo se basa en un radioenlace que no rebasa la longitud de un kilómetro para que la pérdida de señal no sea significativa porque para esta distancia la curvatura de la tierra no es significativa y el horizonte de la tierra se considera plana. Cuando el trayecto es lo bastante largo se debe realizar el análisis de trayectoria estimando la altura de curvatura de la tierra.

## 2. Cobertura de la claridad de Fresnel

Abordaremos los temas relevantes de presupuesto de radiotransmisión LoRa, considerando ganancias de las antenas potencia del transmisor, atenuación por pérdidas de trayectoria en el espacio libre y sensibilidad del receptor (Balacco, 2011). Se estimar el libramiento del 60% de claridad de la zona de Fresnel, sobre la línea de vista del radioenlace. Para validar que es viable el máximo rango con el presupuesto del enlace, se calcular la corrección de la altura del centro de la tierra cuando es significativa por arriba del kilómetro de separación entre antenas (Ezeh, 2017).

### 2.1. Presupuesto del radioenlace LoRa

El presupuesto del radioenlace LoRa se observa en la tabla 1 la cual tiene de los datos de los componentes empleados en este caso la predicción de la propagación de ondas de radio, a una frecuencia de operación de 915 MHz, entre un transmisor y receptor LoRa (Balacco, 2011). El procedimiento de predicción se realizó en tres pasos. Se presenta el presupuesto del radioenlace considerando ganancias de las antenas, potencia del transmisor, atenuación por pérdidas de trayectoria en el espacio libre y sensibilidad del receptor.

Tabla 1: Márgenes de página (cm)

Región	América
Banda de frecuencia	902-928 MHz
Canales	64 + 8 + 8
Canal BW subida	125/500 kHz
Canal BW bajada	500 kHz
Potencia de TX subida	+20 dBm nominal (+30 dBm Norma)
Potencia TX bajada	+27 dBm
SF subida	7-10
Tasa de Tx	980 Bps – 21.9 kbps
Presupuesto subida	154 dB
Presupuesto bajada	157 dB
Pérdidas por propagación en el espacio libre a 1 km y frecuencia de 915 MHz	91.66 dB
Potencia de Recepción	65.66 dBm
Margen	88.34 dB

### 2.2. Primera Zona de Fresnel

Otro tema importante para obtener la mejor cobertura posible es identificar que la línea de visión sea clara entre el transmisor y el receptor. En comunicación por radio, el área de radiación se describe utilizando zonas de Fresnel. Una zona de Fresnel es un elipsoide entre el transmisor y el receptor. El tamaño del elipsoide está determinado por la frecuencia de transmisión y la distancia entre los dos sitios (ver figura 3).

La claridad de línea de vista, se considera la altura resultante debido a la curvatura de la tierra, que se expresa en (1), la altura del obstáculo y una altura mínima correspondiente a un 60% de la primera zona de Fresnel, se determina en (7). Lo anterior se representa en la figura 3, donde  $h_o$  es altura del obstáculo,  $H_{Tx}$  la altura de la antena transmisora y  $H_{Rx}$  la altura de la antena receptora, expresada en metros.

El radio de la primera zona de Fresnel se expresa mediante (1) (He, 2012).

Para un punto a una distancia dada a lo largo de la ruta de propagación, el radio de la primera zona de Fresnel,  $1F$ , se puede determinar a partir de la ecuación

$$1F = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

donde:

$\lambda(m)$  = es la longitud de onda de la señal que se propaga,

$d_1(m)$  = es la distancia del transmisor al obstáculo,

$d_2(m)$  = es la distancia del receptor al obstáculo.

$$F1_{Max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{d_1 + d_2}} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

donde:

$f(Hz)$  = es la frecuencia de operación,

$c(m/s)$  = es la velocidad de la luz ( $299.792 \cdot 10^6$  m/s).

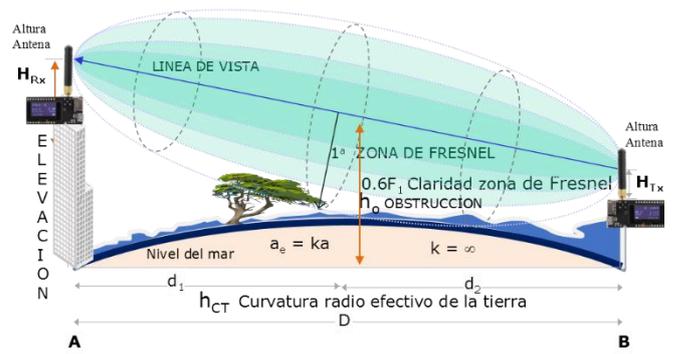


Figura 3: Trayectoria con un libramiento del 60% de claridad de la primera zona de Fresnel.

$$\text{Claridad} = 0.6 * (1F), \quad (4)$$

$$F1(m) = 17.31 \sqrt{\frac{d_1(km)d_2(km)}{f(GHz)D(km)}} \quad (5)$$

donde:

$f$  = frecuencia de operación (GHz),

$D = d_1 + d_2$ , separación entre sitios (km).

La fórmula para determinar el radio del punto más ancho de la zona de Fresnel en metros se expresa por (6).

$$1F_{1/2(m)} = 8.62 \sqrt{\frac{D(km)}{f(GHz)}} \quad (6)$$

La fórmula para determinar el radio del punto más ancho de la zona de Fresnel en pies se expresa por (7).

$$1^a F_{1/2(pie)} = 36.025 \sqrt{\frac{D(milla)}{f(GHz)}} \quad (7)$$

donde:

$d$  = Distancia (millas) entre las dos antenas

$f$  = es la frecuencia (en GHz).

### 2.3. Altura de corrección debido a la curvatura de la tierra

En el radioenlace resulta importante la altura que puede presentar la curvatura de la tierra  $h_{CT}$  si la separación de las antenas es lo suficientemente grande. Cuando la curvatura de la tierra es mayor a  $3/4$  esto puede causar que el radio se desvíe mucho de la Tierra. Si la curvatura es inferior a  $4/3$ , el haz se desvía hacia la Tierra. Donde  $K = 3/4$ , para  $d > 128,72$  km y,  $K = 4/3$ , para  $d < 128,72$  km. La Curvatura de la tierra es entonces  $h = 0.2632$  m. Este aumento o disminución de la curvatura terrestre se maneja matemáticamente agregando un factor  $K$  a (8).

$$h_{CT} = \frac{0.78(d_1)(d_2)}{K} \quad (8)$$

donde:

$h_{CT}$  = altura debido a la curvatura de la tierra [m],

$d_1$  = distancia del transmisor al obstáculo [km],

$d_2$  = distancia del obstáculo al receptor [km],

$K = 4/3$ , factor de curvatura de la tierra,

$1F$  = Radio de la primera zona de Fresnel [m].

### 2.4. Claridad en la Línea de vista del radioenlace

Para verificar que la trayectoria del radioenlace LoRa esta despejada se deben estimar las alturas de claridad de la línea de vista, que garantice que las pérdidas por difracción sean

mínimas por obstrucción de la línea de visión entre las antenas transmisor y el receptor como se observa en la figura 4 (Hernández, 2007), (Leija, 2014).

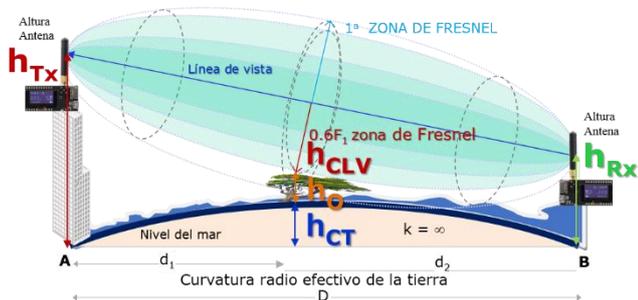


Figura 4: Trayectoria con un libramiento del 60% de claridad de la primera zona de Fresnel.

El valor de la altura de despeje de la línea de vista permitirá estimar en primera instancia si es viable el enlace cuando se tienen localizadas las alturas de las antenas y las alturas de los objetos en el trayecto del radioenlace se obtiene de la siguiente expresión:

$$h_{CLV} = h_1 \frac{h_{Tx} - h_{Rx}}{D} * d_1 - h_{ER} - h_o, \quad (9)$$

$$C_{1F} = C_{LV} - 0.6 * 1F. \quad (10)$$

donde:

- $h_{CLV}$  = altura de claridad en la línea de vista.
- $1F$  = radio de la primera zona de Fresnel
- $h_{Tx}$  = altura de la antena transmisora.
- $h_{Rx}$  = altura de la antena receptora
- $h_o$  = altura en metros de la obstrucción.
- $D$  = distancia total de la ruta ( $d_1 + d_2$ ).
- $h_{CT}$  = altura de la curvatura de la tierra.

### 3. Resultados

Los datos de la Tabla 2 muestran el máximo rango las alturas que deben librar el radioenlace los obstáculos, por encima de estos valores impedirían la propagación de la señal y provocarían la caída del radioenlace.

Tabla 2: Márgenes de página (cm)

Distancia (km)	1ª zona (m)	60% 1ª zona (m)	Curvatura terrestre (m)
0.010	0.9053	0.5431	0.00001
0.100	2.8629	1.7177	0.00146
1.000	9.0533	5.4319	0.14625
10.000	28.6290	17.1774	14.62500

El presupuesto del enlace, mediante el análisis de rendimiento, y el margen de desvanecimiento, hacen viable el radioenlace. Los resultados muestran que a partir de la obtención del máximo rango, los parámetros de diseño, el presupuesto del enlace, el análisis de rendimiento, y el margen de desvanecimiento. El enlace superó el nivel de sensibilidad del receptor, con las atenuaciones introducidas.

Para verificar que la trayectoria del radioenlace LoRa esta despejada se deben estimar las alturas de claridad de la línea de vista que permita garantizar que las pérdidas por difracción sean mínimas por obstrucción de la línea de visión entre las antenas del transmisor y el receptor como se observa en la figura 5.

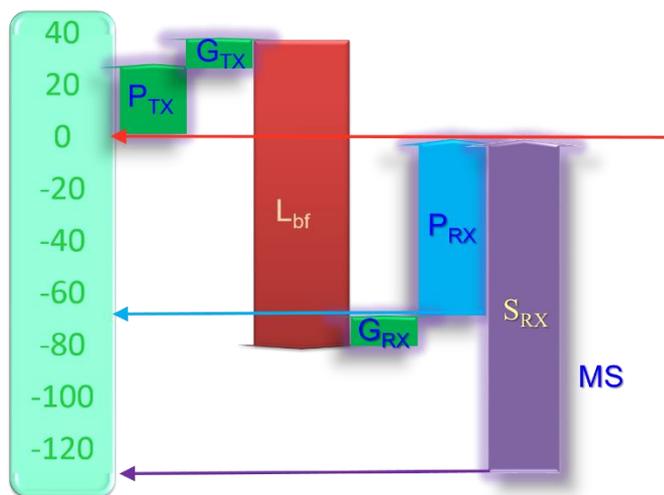


Figura 5: Presupuesto del Radioenlace LoRa.

### 4. Conclusiones

El análisis de la claridad de cobertura del 60 % de la primera zona de Fresnel es útil para garantizar un sistema de comunicaciones inalámbricas de larga distancia que cubra los requisitos técnicos. Sin embargo, es necesario hacer un recorrido por el trayecto anotando en la bitácora que tipo de vegetación se encuentra en el trayecto, así como si cruza por ríos lagos o mares se encuentra. La vegetación debe tener una proyección de alturas máximas y estaciones del año, los cuerpos de agua también requieren de analizar horarios en los que el mar se aleja o se acerca, y los ríos marcar en que temporada crece su afluente. Estos datos se deben de considerar para incluirlos en el diagrama de perfil de trayectoria para tener una imagen precisa del radioenlace y no se vean afectados cuando estos eventos se presenten.

La telemetría de LoRa no se ve comprometida cuando los enlaces se realizan entre puntos elevados y el lóbulo principal de la primera zona de Fresnel no encuentra obstáculos intermedios que puedan afectar las señales de radio.

El presupuesto del radioenlace LoRa idealmente muestra una cobertura del enlace considerablemente lejana más de 1 km. Sin embargo, si la conectividad inalámbrica se lleva a cabo en ambientes urbanos, zonas boscosas, llanuras o áreas intermedias con cuerpos de agua, la señal de radio se ve fuertemente afectada por los fenómenos de difracción que se presentan cuando las señales radioeléctricas atraviesan por estas áreas.

### Referencias

Aden Hassan, A., & Karlsson Källqvist, R. (2019). Evaluating LoRa Physical as a Radio Link Technology for use in a Remote-Controlled Electric Switch System for a Network Bridge Radio-Node.

Almuhaya, M. A., Jabbar, W. A., Sulaiman, N., & Abdulmalek, S. (2022). A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions. *Electronics*, 11(1), 164.

Baek, J., & Choi, Y. (2018). A New GIS-Based Algorithm to Support Initial Transmitter Layout Design in Open-Pit Mines. *Energies*, 11(11), 3063.

Baek, J., & Choi, Y. (2018). Comparison of Communication Viewsheds Derived from High-Resolution Digital Surface Models Using Line-of-Sight, 2D Fresnel Zone, and 3D Fresnel Zone Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 322.

- Balacco, J. (2011). Radio enlaces digitales en un entorno urbano y suburbano (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Barriquello, C. H., e Silva, F. E. S., Bernardon, D. P., Canha, L. N., Ramos, M. J. D. S., & Porto, D. S. (2018). Fundamentals of wireless communication link design for networked robotics. *Service Robots*, 127-142.
- Dai, Z., Saputra, M. R. U., Lu, C. X., Markham, A., & Trigoni, N. (2021). Deep Odometry Systems on Edge with EKF-LoRa Backend for Real-Time Positioning in Adverse Environment. arXiv preprint arXiv:2112.05665
- Davide, M. A. G. R. I. N. (2017). Network level performances of a LoRa system. *Directores: Lorenzo Vangelista*.
- Elijah, O., Rahim, S. K. A., Sittakul, V., Al-Samman, A. M., Cheffena, M., Din, J. B., & Tharek, A. R. (2021). Effect of weather condition on Lora IoT communication technology in a tropical region: Malaysia. *IEEE Access*, 9, 72835-72843.
- Ezeh, I. H., Friday, N., & Runcie, A. (2017). Mathematical Model for Equivalent Fresnel Zone Line of Sight Percentage Clearance for Terrestrial Point-to-Point Line-of-Sight Communication Link. *World*, 2(2), 27-31.
- Hernández, J. C., & Parrao, E. (2007). Diseño de enlace terrestre por línea de vista. SEMINARIO DE TITULACION.
- Hudiono, H., Taufik, M., Perdana, R. H. Y., & Rakhmania, A. E. (2021). Digital centralized water meter using 433 MHz LoRa. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(4), 2062-2071.
- Jiang, L. (2020). Comparison of LoRa and NB-IoT in Terms of Connectivity.
- Khutsoane, O., Isong, B., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017, October). IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN. In *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 6107-6112). IEEE.
- Leija Hernández, G., López Bonilla, J. L., & Iturri Hinojosa, L. A. (2014). Metodología para el cálculo adecuado de las alturas de antenas en un radioenlace de microondas en Línea de Vista. *Nova scientia*, 6(12), 1-12.
- Pickering, P. "Develop with LoRa for Low-rate, long-range IoT applications." (2017).
- Sanchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors*, 16(5), 708.
- Sanchez-Iborra, R., Sanchez-Gomez, J., Ballesta-Viñas, J., Cano, M. D., & Skarmeta, A. F. (2018). Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions. *Sensors*, 18(3), 772.
- Tian, P., Yang, F., Ma, X., Boano, C. A., Tian, X., Liu, Y., & Wei, J. (2021, November). Environmental Impact on the Long-Term Connectivity and Link Quality of an Outdoor LoRa Network. In *Proceedings of the 19th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (pp. 565-568).