

Comparación de una red LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con vegetación de soja

Adrián Jaszczyszyn

Instituto de Investigación y
Transferencia en Tecnología
Junín, Argentina

adrian.jaszczyszyn@itt.unnoba.edu.ar

Marcelo Guiguet

Instituto de Investigación y
Transferencia en Tecnología
Junín, Argentina

marcelo.guiguet@itt.unnoba.edu.ar

Hugo Ramón

Instituto de Investigación y
Transferencia en Tecnología
Junín, Argentina

hugo.ramon@itt.unnoba.edu.ar

Resumen— Las redes LPWAN son redes inalámbricas de bajo consumo de energía y largo alcance que se utilizan principalmente para conectar dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) a internet. En el ámbito agroindustrial, IoT está transformando el futuro de la industria mediante la implementación de técnicas de agricultura inteligente o de precisión y una forma de lograr esto es mediante la tecnología LoRa con arquitectura de red LoRaWAN en las prácticas agrícolas tradicionales. El siguiente trabajo compara las mediciones de nodos ubicados a diferentes alturas contra un gateway, con los modelos de pérdidas de propagación, sumado a varios modelos de propagación con exceso de vegetación, en una infraestructura de red con tecnología LoRaWAN en un entorno rural sembrado con soja.

Palabras claves— IoT, LoRaWAN, modelos de propagación, vegetación

I INTRODUCCIÓN

En los sistemas de comunicación inalámbrica, la señal emitida por la antena del transmisor experimenta múltiples transformaciones a lo largo de su trayectoria por el medio de propagación, llegando al receptor sólo una pequeña parte de la señal original, dado que en los sistemas de radiofrecuencia, existen fenómenos como la reflexión, la difracción y la dispersión que impacta en la propagación de la señal que recibe el receptor. Los modelos de propagación son un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos diseñados para representar las características de la transmisión de radio en un entorno determinado. Existen diferentes modelos para predecir la atenuación de señales, cada uno con enfoques distintos. Los modelos empíricos se basan en fórmulas derivadas de la experiencia y se ajustan de manera genérica al entorno específico de aplicación. En contraste, los modelos deterministas emplean principios físicos para calcular la atenuación, proporcionando resultados basados en leyes físicas en ese entorno particular[1][2][3].

La recomendación UIT-R P.525-4 [4], última aprobada y puesta en vigor en agosto de 2019, para el cálculo de la atenuación en el espacio libre, indica que para enlaces punto a punto, la pérdida básica de transmisión en el espacio libre se expresa como:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

donde, L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre y d : distancia, λ : longitud de onda; se expresan en las mismas unidades.

El L_{bf} se expresa en decibelios (dB) y puede representarse en función de la frecuencia en lugar de la longitud de onda [3][5], y se formula de la siguiente manera:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \text{ [dB]} \quad (2)$$

donde, f : frecuencia en Megahertz (MHz) y d : distancia en kilómetros (km).

Otro modelo es el de reflexión terrestre de dos rayos o también conocido como Two-Ray Model Path Loss, se fundamenta en los principios de la óptica geométrica y considera el componente de la transmisión directa desde el transmisor al receptor y el componente de reflexión en la superficie terrestre. La ecuación incorpora la distancia entre las antenas del transmisor y el receptor y las alturas de la antenas expresadas en metros, como muestra la ecuación:

$$L_{pe} = 40 \log d - 20 \log h_t - 20 \log h_r \text{ [dB]} \quad (3)$$

En presencia de vegetación, el modelo de espacio libre o el modelo de reflexión terrestre de dos rayos no predicen adecuadamente la atenuación del canal. Esto se debe a la obstrucción causada por cultivos o árboles, que puede provocar que la señal se refleje, se difracte o se disperse, resultando en un desvanecimiento de la señal. Además, factores como los cambios en la densidad de la vegetación, el movimiento de los componentes vegetales, y condiciones ambientales como el viento, la lluvia y la humedad, también influyen en la atenuación de la señal [3].

Para predecir la pérdida de la señal de propagación en presencia de vegetación, se utilizan modelos de propagación con exceso de atenuación vegetativa, algunos de los modelos empíricos de pérdida de trayectoria más utilizados se expresan en función de la frecuencia de la señal y la profundidad de la vegetación en función del modelo de decaimiento exponencial, ver Fig.1. Los modelos que proporcionan una explicación de la propagación de ondas de radio en presencia de vegetación pueden ser el modelo ITU-R (International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector), el modelo FITU-R (Fitted ITU-R), el modelo LITU-R (Lateral ITU-R), el modelo COST235 (European Cooperation in Science and Technology - COST) y el modelo Modified Exponential Decay (MED) de Weissberger [6][7][8].

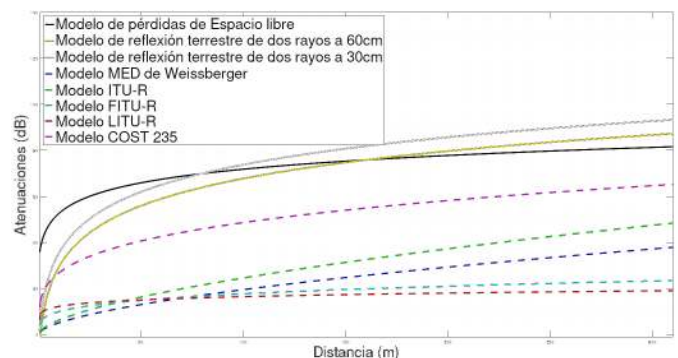


Fig.1. Modelos de pérdidas de propagación y modelos de atenuaciones en presencia de vegetación

La atenuación debida a la vegetación tiene un formato general que puede ser expresado por la siguiente expresión:

$$Att_{(atenuaciones\ de\ propagación\ con\ vegetación)} = X f^Y d^Z [dB] \tag{4}$$

donde X, Y, y Z son variables de valores ajustados obtenidos de medidas. Una tabla resumen sería la siguiente:

Modelo	X	Y	Z	Condiciones
MED de Weissberger	1,33	0,284	0,588	14m <d <= 400m
	0,45	0,284	1	0m <= d <= 14m Para f [MHz] entre 230 - 95000
ITU-R	0,2	0,3	0,6	0m <= d <= 400m Para f [MHz] entre 230 - 95000
FITU-R	0,37	0,18	0,59	árboles sin follaje
	0,39	0,39	0,25	árboles con follaje Para f entre 11,2 GHz and 20 GHz
LITU-R	0,48	0,43	0,13	Para bandas VHF y UHF Para f [MHz] entre 240 - 700
COST235	26,6	-0,2	0,5	árboles sin follaje
	15,6	-0,009	0,26	árboles con follaje Para f entre 9,6GHz-57,6GHz y arboledas pequeñas menores a 200 metros

Tabla I. Resumen de valores empíricos para distintos modelos con vegetación, en color azul son los utilizados en los cálculos

II DESARROLLO

Se evalúa la calidad de la señal de los nodos ubicados a diferentes alturas y el gateway, analizando la influencia de obstrucción de la vegetación de la soja. Se toma como base la potencia de recepción que va a ser igual a la potencia de transmisión, más las ganancias del transmisor y receptor, menos las atenuaciones de pérdida de espacio libre o dos rayos, según sea el caso de evaluación, menos las atenuaciones provistas por la vegetación:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{of} o L_{pr} - Att_{(atenuaciones\ de\ propagación\ con\ vegetación)} \tag{5}$$

Se utiliza el RMSE, la raíz cuadrática media, para medir la desviación promedio de las predicciones del modelo con respecto a los valores reales.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_{real} - x_{pred})^2} \tag{6}$$

Siendo, n el número de observaciones en el conjunto de datos de prueba; x_{pred} son las predicciones del modelo; y_{real} son los valores reales observados. Cuanto menor sea el valor del RMSE, mejor será la precisión del modelo.

II.A Armado de escenario

El escenario de prueba se desarrolló en una parcela de una hectárea dedicada al cultivo de soja, ubicada en un campo de la zona núcleo del noroeste de la provincia de Buenos Aires. Esta parcela contenía hileras de plantación de aproximadamente 10 metros de longitud, con una separación de 1,5 metros entre cada hilera. La experiencia se llevó a cabo en cinco ubicaciones, con distancias que oscilan entre 230 y 310 metros entre el gateway y los nodos, además de una obstrucción máxima de 89 metros de soja. La toma de muestras se realizó durante el estadio fenológico R3-R4 de la soja, momento en el cual las hojas se encuentran completamente desarrolladas, lo que resultó propicio para el análisis de distintos modelos de propagación en un entorno con vegetación abundante.

Las ubicaciones de los cinco puntos de toma de datos, junto con las distancias al gateway y la distancia con vegetación en cada sitio, se presentan en la Tabla II:

Puntos	Distancia al Gateway	Distancia con soja
1er Punto	230m	0m
2do Punto	230m	12m
3er Punto	250m	30m
4to Punto	280m	64m
5to Punto	310m	89m

Tabla II. Puntos y distancias de toma de datos

La configuración y los parámetros del gateway y los nodos utilizados para la experiencia son los siguientes:

Altura del gateway	7 metros
Alturas de los nodos	Nodo RAK5205_01 - 0,3 metros Nodo RAK5205_03 - 0,6 metros
Altura de la soja	0,8 - 0,9 metros
Selección de parámetros	Protocolo LoRaWAN V1.0.2b frecuencia: AU915 Activación por OTAA Clase:A Sin confirmación Sin ADR CR:4/5 BW:125kHz PTx : 20 dBm GTx : 3 dB GRx : 2 dB DR2: LoRa: SF10, 125 kHz, sensibilidad:-130dBm DR5: LoRa: SF7, 125 kHz, sensibilidad:-123dBm Envío de 43 bytes en intervalos de 60 segundos

Tabla III. Parámetros de configuración de los nodos y gateway

III RESULTADOS

El RMSE del modelo de espacio libre, junto con las atenuaciones de los modelos en presencia de vegetación, arrojó el siguiente resultado:

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	27,534	27,012	7,774	29,781	27,052

RAK5205_01 a 0,3m con DR5	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	26,727	26,441	4,358	28,603	25,592

RAK5205_03 a 0,6m con DR2	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	17,994	17,376	9,589	20,488	18,012

RAK5205_03 a 0,6m con DR5	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	15,125	14,681	11,278	17,365	14,784

Tabla IV. Tabla de RMSE con el modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación

Los resultados del RMSE para el modelo de reflexión terrestre de dos rayos y las atenuaciones con los modelos en presencia de vegetación se presentan en la siguiente tabla:

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	17,541	16,967	10,682	19,892	17,417

RAK5205_01 a 0,3m con DR5	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	16,423	16,146	9,694	18,361	15,498

RAK5205_03 a 0,6m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	13,995	13,277	13,355	16,662	14,485

RAK5205_03 a 0,6m con DR5	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	11,043	10,511	15,471	13,473	11,273

Tabla V. Tabla de RMSE con el modelo de reflexión de dos rayos y atenuaciones con vegetación

La propagación de las ondas de radio entre los nodos y el gateway se ve afectada por la presencia de soja, que bloquea la línea de visión a partir de los 230 metros. Esta obstrucción conlleva a una pérdida de potencia de la señal a medida que aumenta la distancia. La Fig. 3 presenta las curvas según la ecuación 5, que muestran las pérdidas de espacio libre, junto con los modelos de atenuación por vegetación para los nodos RAK5205_01 y RAK5205_03, ambos configurados con DR5 y los datos medidos con su curva de regresión.

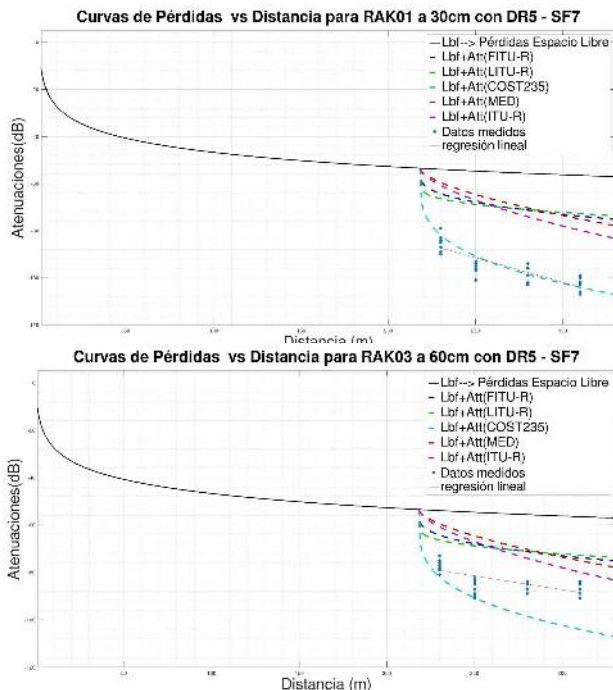


Fig. 3. Modelo de pérdidas de espacio libre y atenuaciones de vegetación para el nodo RAK5205_01 a 30 cm y RAK5205_03 a 60 cm con DR5

La Fig. 4 presenta las atenuaciones del modelo de dos rayos y los modelos de pérdida con vegetación de los nodos RAK5205_01 y RAK5205_03, ambos configurados con DR2.

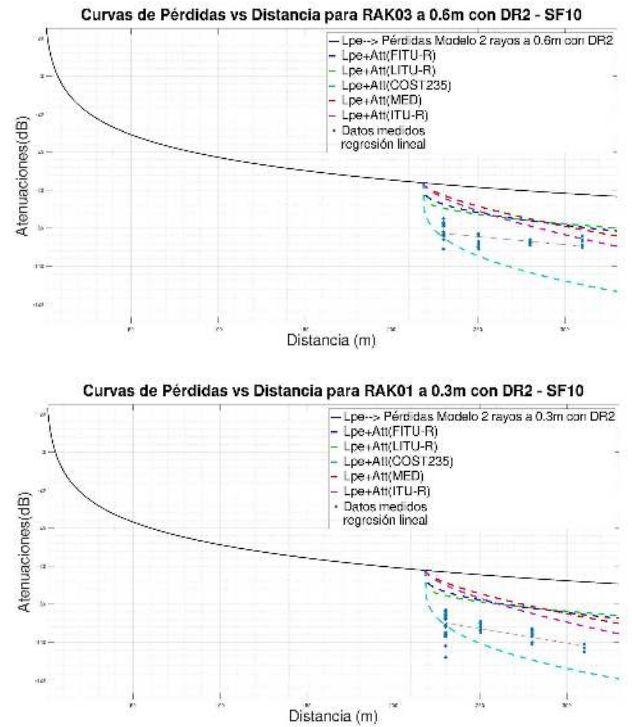


Fig. 4. Modelo de dos rayos y atenuaciones de vegetación para el nodo RAK5205_01 a 30 cm y RAK5205_03 a 60 cm con DR2

IV CONCLUSIONES

Según señala Farhad en [10], la ubicación y elevación de las antenas de los nodos, junto con el spreading factor (SF), son fundamentales para la cobertura. En este estudio de caso, todos los datos enviados por los nodos configurados con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) fueron recibidos por el gateway debido a las distancias cortas (menos de 310 metros). Sin embargo, se observaron diferencias significativas en las atenuaciones debido a la vegetación de la soja según la altura de los nodos, como se muestra en las Fig. 3 y 4. El nodo RAK5205_01, ubicado a 30 cm del nivel del suelo, exhibió una pendiente más pronunciada que el RAK5205_03, situado a 60 cm, a medida que la distancia con la vegetación aumentaba.

En cuanto a la evaluación del RMSE los cálculos arrojaron que los modelos de atenuación con vegetación considerados en este estudio estiman las pérdidas de cultivos de soja a niveles de uno a dos dígitos para los RMSE de los modelos analizados, como se vio en las tablas IV y V.

Se alcanza la misma conclusión que en la investigación de Raheemah en [11], donde el modelo $L_{bf} + Att_{(COST235)}$ mostró la mejor concordancia con las mediciones empíricas en comparación con otros modelos de atenuación con vegetación. Esta observación se confirma en la Fig. 3, donde el modelo $L_{bf} + Att_{(COST235)}$ se aproxima a la curva de regresión lineal de los datos observados para el nodo RAK5205_01, logrando el menor RMSE: 4,358 para DR5.

Para el modelo de reflexión terrestre de dos rayos con las atenuaciones de los modelos con vegetación, los valores observados se ubicaron entre el $L_{pe} + Att_{(COST235)}$ y los otros modelos con vegetación, como se observa en la Fig. 4. En el caso del nodo RAK5205_01 para ambos DR, el modelo que

mejor se ajusta es $L_{pe}+Att_{(COST235)}$, mientras que para el nodo RAK5205_03 en ambos DR, es $L_{pe}+Att_{(LITU-R)}$.

La precisión en la predicción de la pérdida de señal es crucial para el diseño y la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica eficientes y confiables. En entornos donde la vegetación como la soja en éste caso y otros obstáculos afectan la propagación de las ondas de radio, es fundamental utilizar modelos de atenuación precisos. En este estudio, observamos que el modelo $L_{bf}+Att_{(COST235)}$ demostró una notable concordancia con las mediciones empíricas, con un RMSE por debajo de los dos dígitos para el nodo RAK5205_01 configurado con DR5. Este resultado subraya la importancia de seleccionar y validar modelos de propagación que consideren adecuadamente las condiciones específicas del entorno, incluyendo la altura de los nodos y las características de la vegetación. Estos hallazgos son esenciales para predecir con precisión la cobertura de señal, optimizar el rendimiento del sistema y asegurar una comunicación robusta y confiable en aplicaciones prácticas.

Referencias

[1] Y. Okumura (1967). Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service (Vol. 16).

[2] Á.C. Aznar, J. R. Robert., J.M.R. Casals, L.J. Roca, S.B. Bori., & M.F. Bataller (2004). Antenas. Univ. Politèc. de Catalunya.

[3] T. Rappaport (2002). Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall PTR.

[4] Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2019). Recomendación UIT-R P.525-4 (08/2019)– Cálculo de la atenuación en el espacio libre. Consultado el 10 de abril de 2024, desde <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/es>.

[5] P. de Fornel & H. Sizun (2006). Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications. Springer Berlin Heidelberg.

[6] M.A. Weissberger (1982). An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees. ESD-TR-81-101, Electromagnetic Compatibility Analysis Center, Annapolis, Maryland USA, Final Report 833-7

[7] CCIR (1986). Influences of terrain irregularities and vegetation on troposphere propagation. CCIR Report, 235-236

[8] COST235. (1996). Radio propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems

[9] D. Santos (2010). Fenología en el Cultivo de Soja: una "hoja de ruta". Segunda edición (2010). Consultado 10 de abril de 2024, desde <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-fenologia-en-el-cultivo-de-soja-una-hoja-de-ruta.pdf>

[10] A. Farhad, D.H. Kim, & J.Y. Pyun (2019). Scalability of LoRaWAN in an urban environment: A simulation study. 2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 677-681

[11] A. Raheemah, N. Sabri, M. Salim, P. Ehkan & R.B. Ahmad (2016). New empirical path loss model for wireless sensor networks in mango greenhouses. Computers and Electronics in Agriculture, 127, 553-560.