

Pérdidas de señal por trayectoria en función del tipo de entorno

Autor: Luis Córdón
Asesor: Nelson Estrada

9 de mayo de 2025

Introducción

La propagación de señales en entornos urbanos y suburbanos representa un desafío importante para el diseño de redes de comunicación inalámbrica, especialmente en escenarios donde la línea de vista entre el transmisor y el receptor no está garantizada. Para predecir las pérdidas de señal en estos entornos, se han desarrollado diversos modelos empíricos, entre los cuales destacan el modelo ITU-R P.1411 y el modelo de Weissberger. Estos modelos permiten estimar la atenuación adicional debida a obstáculos como edificios, vegetación y otros elementos característicos del entorno.

El modelo ITU-R P.1411 proporciona estimaciones de pérdida de propagación en función de parámetros empíricos ajustados a distintos tipos de entornos urbanos, diferenciando entre situaciones de transmisión debajo y encima de tejado. Por su parte, el modelo de Weissberger se enfoca en estimar pérdidas debido a vegetación, utilizando como variables la frecuencia y el espesor de la cubierta forestal.

En este informe se presentan los resultados de simulaciones realizadas con ambos modelos para distintos entornos de propagación, considerando tanto las pérdidas adicionales como las pérdidas totales. Estas simulaciones se llevaron a cabo implementando los modelos en un sistema en Python, el cual permite seleccionar el entorno, la distancia de propagación y la frecuencia de transmisión.

Se analizan los resultados obtenidos para las cuatro bandas de frecuencia utilizadas en Nicaragua (B2, B4, B5 y B28), considerando distintas distancias de propagación. El objetivo principal es comparar las pérdidas totales y adicionales estimadas por cada modelo, destacando las diferencias, ventajas y limitaciones de cada enfoque en función del tipo de entorno.

1. Modelos de Pérdida por Propagación

1.1. Modelo ITU-R P.1411

El modelo ITU-R P.1411 es un modelo empírico recomendado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones para calcular las pérdidas de propagación en entornos urbanos y suburbanos. Su fórmula general es:

$$L_b(d, f) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) \quad (1)$$

donde:

- $L_b(d, f)$: pérdidas medias en decibelios (dB)
- d : distancia entre transmisor y receptor, en metros
- f : frecuencia de operación, en GHz
- α, β, γ : coeficientes empíricos determinados según el tipo de entorno

Además, el modelo incluye una desviación estándar σ que representa la dispersión estadística de las pérdidas.

Los coeficientes para distintos entornos son:

Entorno	α	β	γ	σ (dB)
<i>Debajo de tejado</i>				
Residencial denso	3.01	18.8	2.07	3.07
Urbano	4.00	10.2	2.36	7.60
Urbano denso	5.06	-4.68	2.02	9.33
Industrial	2.12	29.2	2.11	5.06
<i>Encima de tejado</i>				
Manzanas de edificios	2.29	28.6	1.96	3.48
Edificios altos	4.39	-6.27	2.30	6.89

Cuadro 1: Coeficientes del modelo ITU-R P.1411 para distintos entornos

1.2. Modelo de Weissberger

Este modelo estima las pérdidas por propagación en entornos con vegetación, como bosques o áreas rurales, considerando el grosor de la vegetación atravesada. La pérdida total se expresa como:

$$L_{\text{ewb}}(dB) = P_{\text{fsl}}(dB) + P_{\text{wb}}(dB) \quad (2)$$

donde:

- $P_{\text{fsl}}(dB)$: pérdidas en espacio libre
- $P_{\text{wb}}(dB)$: pérdidas adicionales por vegetación según Weissberger

Las pérdidas en espacio libre se calculan mediante:

$$P_{\text{fsl}}(dB) = 32,5 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (3)$$

con:

- f : frecuencia en GHz
- d : distancia en km

El término de pérdidas por vegetación es:

$$P_{\text{wb}}(dB) = \begin{cases} 0,45 \cdot f^{0,284} \cdot d_f & \text{si } 14 < d_f \leq 400 \\ 0,45 \cdot f^{0,284} \cdot 14 & \text{si } d_f \leq 14 \end{cases} \quad (4)$$

donde:

- f : frecuencia en GHz
- d_f : grosor del follaje (espesor de vegetación atravesado, en metros)

Este modelo es aplicable típicamente en frecuencias de 230 MHz a 95 GHz.

Para entornos con diferentes tipos de vegetación, se asumen los siguientes valores de d_f :

- Bosque denso: $d_f = 400$ m
- Bosque disperso: $d_f = 200$ m
- Vegetación baja: $d_f = 100$ m
- Terreno árido: $d_f = 40$ m

2. Resultados

Entorno	Adicionales (dB)	Totales (dB)
Residencial Denso	76,85	114,87
Urbano	98,75	136,78
Urbano Denso	114,73	152,75
Manzanas de edificios	64,74	102,76
Edificios altos	93,82	131,84
Industrial	60,66	98,68
Bosque denso	92,69	130,71
Bosque disperso	61,66	99,69
Vegetación baja	41,02	79,05
Terreno árido	23,93	61,96
Agua interior	10,00	48,03
Mar abierto	10,00	48,03
Espacio urbano abierto	0,00	38,03
Residencial con árboles	69,25	107,28
Residencial con pocos árboles	58,93	96,96
Pueblo	80,21	118,23
Humedal	35,83	73,86
Aeropuerto	NA	NA

Cuadro 2: Pérdidas por entorno a 1.90 GHz (B2) para una distancia de 1.00 km.
Pérdidas en espacio libre: 38.03 dB.

Entorno	Adicionales (dB)	Totales (dB)
Residencial Denso	76,81	113,87
Urbano	98,58	135,64
Urbano Denso	114,72	151,78
Manzanas de edificios	64,76	101,82
Edificios altos	93,67	130,73
Industrial	60,60	97,66
Bosque denso	89,80	126,86
Bosque disperso	59,74	96,80
Vegetación baja	39,75	76,80
Terreno árido	23,19	60,25
Agua interior	10,00	47,06
Mar abierto	10,00	47,06
Espacio urbano abierto	0,00	37,06
Residencial con árboles	68,28	105,34
Residencial con pocos árboles	58,28	95,34
Pueblo	79,16	116,22
Humedal	34,87	71,93
Aeropuerto	NA	NA

Cuadro 3: Pérdidas por entorno a 1.70 GHz (B4) para una distancia de 1.00 km.
Pérdidas en espacio libre: 37.06 dB.

Entorno	Adicionales (dB)	Totales (dB)
Residencial Denso	76,88	115,77
Urbano	98,91	137,80
Urbano Denso	114,73	153,63
Manzanas de edificios	64,72	103,62
Edificios altos	93,95	132,84
Industrial	60,70	99,60
Bosque denso	95,36	134,25
Bosque disperso	63,44	102,33
Vegetación baja	42,20	81,10
Terreno árido	24,62	63,52
Agua interior	10,00	48,89
Mar abierto	10,00	48,89
Espacio urbano abierto	0,00	38,89
Residencial con árboles	70,16	109,05
Residencial con pocos árboles	59,54	98,43
Pueblo	81,17	120,07
Humedal	36,72	75,61
Aeropuerto	NA	NA

Cuadro 4: Pérdidas por entorno a 2.10 GHz (B4) para una distancia de 1.00 km.
Pérdidas en espacio libre: 38.89 dB.

Entorno	Adicionales (dB)	Totales (dB)
Residencial Denso	76,60	107,64
Urbano	97,50	128,53
Urbano Denso	114,66	145,69
Manzanas de edificios	64,88	95,92
Edificios altos	92,77	123,81
Industrial	60,27	91,31
Bosque denso	73,76	104,80
Bosque disperso	49,07	80,11
Vegetación baja	32,64	63,68
Terreno árido	19,05	50,08
Agua interior	10,00	41,04
Mar abierto	10,00	41,04
Espacio urbano abierto	0,00	31,04
Residencial con árboles	62,83	93,87
Residencial con pocos árboles	54,62	85,66
Pueblo	73,28	104,32
Humedal	29,53	60,57
Aeropuerto	NA	NA

Cuadro 5: Pérdidas por entorno a 0.85 GHz (B5) para una distancia de 1.00 km.
Pérdidas en espacio libre: 31.04 dB.

Entorno	Adicionales (dB)	Totales (dB)
Residencial Denso	76,54	105,89
Urbano	97,19	126,54
Urbano Denso	114,64	143,99
Manzanas de edificios	64,91	94,26
Edificios altos	92,52	121,87
Industrial	60,18	89,53
Bosque denso	69,80	99,15
Bosque disperso	46,44	75,79
Vegetación baja	30,89	60,24
Terreno árido	18,02	47,38
Agua interior	10,00	39,35
Mar abierto	10,00	39,35
Espacio urbano abierto	0,00	29,35
Residencial con árboles	61,49	90,84
Residencial con pocos árboles	53,72	83,07
Pueblo	71,81	101,17
Humedal	28,22	57,57
Aeropuerto	NA	NA

Cuadro 6: Pérdidas por entorno a 0.70 GHz (B28) para una distancia de 1.00 km.
Pérdidas en espacio libre: 29.35 dB.

3. Discusión

El objetivo principal de esta investigación fue estimar las pérdidas teóricas por kilómetro recorrido para 18 distintos tipos de *clutter*. Para ello, se utilizaron dos modelos de propagación: la Recomendación ITU-R P.1411 y el modelo de Weissberger, además del modelo de pérdidas por espacio libre. El modelo ITU-R P.1411 está orientado principalmente a entornos urbanos, mientras que el modelo de Weissberger se enfoca en la vegetación.

El modelo ITU-R P.1411 se basa en coeficientes empíricos (Cuadro 1) que varían según la posición relativa de la antena transmisora respecto a la altura promedio de los tejados. En este estudio, se consideró que el receptor siempre se encuentra por debajo de dicha altura. Por ello, los entornos *Residencial denso*, *Urbano*, *Urbano denso* e *Industrial* se clasificaron como debajo del tejado, mientras que los entornos de *Manzanas de edificios* y *Edificios altos* se trataron como encima del tejado.

Los resultados obtenidos muestran que las pérdidas adicionales para estos entornos no son inferiores a 60 dB. En particular, los entornos *Urbano*, *Urbano denso* y *Edificios altos* presentan pérdidas superiores a 90 dB por kilómetro, siendo el entorno *Urbano denso* el más crítico, con más de 114 dB. Es importante mencionar que las pérdidas adicionales presentan poca variación con la frecuencia, ya que se obtienen como la diferencia entre la pérdida total del modelo y la pérdida por espacio libre (ver Ecuación 1). Por tanto, para analizar los efectos de la frecuencia, es más pertinente examinar las pérdidas totales.

Por otro lado, el modelo de Weissberger ya incluye las pérdidas por espacio libre, por lo que las diferencias entre entornos y frecuencias se reflejan tanto en las pérdidas adicionales como en las totales. Este modelo fue aplicado a los entornos de *Bosque denso*, *Bosque disperso*, *Vegetación baja* y *Terreno árido*. Weissberger introduce una corrección basada en la profundidad de penetración del follaje, la cual depende de si esta es menor a 14 m o se encuentra entre 14 m y 400 m. En este estudio, se asumió el segundo caso para todos los entornos, empleando una distancia de 1000 m. Para diferenciar entre los tipos de vegetación, se utilizaron diferentes coeficientes de penetración (d_f): 1, 0.5, 0.25 y 0.1, respectivamente, bajo la suposición de que el modelo está principalmente diseñado para bosques densos.

Adicionalmente, se consideraron cuatro entornos mixtos modelados como promedios entre dos entornos base, suponiendo que pueden ser representados como una combinación de estos. Los entornos compuestos fueron: *Residencial con árboles* (Residencial denso + Bosque disperso), *Residencial con pocos árboles* (Residencial denso + Vegetación baja), *Pueblo* (Urbano + Bosque disperso) y *Humedal* (Agua interior + Bosque disperso). Dado que los primeros tres incluyen modelos urbanos, se recomienda consultar las pérdidas totales para observar mejor las diferencias con respecto a la frecuencia.

Finalmente, para los entornos de *Agua interior* y *Mar abierto*, se asumió una pérdida adicional constante de 10 dB sobre la pérdida por espacio libre. En el caso de *Espacio urbano abierto*, se consideraron únicamente las pérdidas por espacio libre. Por último, no se obtuvieron resultados para el entorno de *Aeropuerto*, ya que este requiere un análisis más detallado debido a las posibles interferencias y particularidades del entorno.

4. Conclusiones

- El modelo ITU-R P.1411 permite una estimación detallada de las pérdidas totales de propagación, diferenciando entre tipos de entorno y la posición relativa de las antenas (por debajo o por encima del tejado). Sin embargo, al no incorporar explícitamente las pérdidas por espacio libre en su formulación, las diferencias en las pérdidas adicionales con respecto a la frecuencia no son significativas.
- La combinación de modelos para analizar entornos mixtos introduce cierto grado de incertidumbre, especialmente al asumir porcentajes arbitrarios de contribución de cada entorno. Además, los coeficientes empíricos utilizados en el modelo ITU-R P.1411 pueden no reflejar con precisión las características locales específicas, lo que limita su aplicabilidad directa sin una validación contextual.
- Para frecuencias bajas (como 700 MHz), ambos modelos predicen pérdidas menores, aunque las diferencias entre entornos siguen siendo relevantes. A medida que la frecuencia aumenta, las pérdidas también lo hacen, especialmente en entornos urbanos densos o con vegetación espesa.

Referencias

- International Telecommunication Union. (2023). *Recomendación UIT-R P.1411-12: Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz*. Recuperado de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1411/es>
- International Telecommunication Union. (2019). *Recommendation ITU-R P.1546-6: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz*. Recuperado de <https://www.itu.int/rec/r-rec-p.1546/en>
- Suquo, I. O., Kalu, C., & Okon, S. E. (2018). *Comparative analysis of Weissberger foliage path loss model optimization methods for a 3G network*. University of Uyo, Akwa Ibom, Nigeria. Recuperado de <https://www.imjst.org/wp-content/uploads/2018/12/IMJSTP29120120.pdf>
- Córdón, L. (2025). *radio-wave-attenuation* [Repositorio Github]. GitHub. <https://github.com/LuisCordon221071/Pr-cticas-1-Claro-.git>