

B. Guía de explicación para la caracterización de terreno

Algoritmo de Matlab Longley-Rice propagation model

INTRODUCCIÓN

La caracterización del terreno es una parte clave cuando se quiere evaluar si un enlace realmente puede funcionar en un entorno rural. En zonas como Mogotes, donde la topografía es montañosa y la línea de vista no siempre está garantizada, la propagación de la señal cambia bastante dependiendo de la altura, las precipitaciones y hasta del clima. Por eso, antes de intentar cualquier transmisión, se implementó una simulación con el modelo Longley–Rice (ITM) usando MATLAB y los datos de elevación GMTED2010. El objetivo fue entender qué tan viable sería un enlace entre un punto remoto, sector El Medio y el Hospital San Pedro Claver.

DESARROLLO

Para el análisis se tomaron las coordenadas reales de ambos puntos. El transmisor se ubicó en El Medio, Mogotes, con una antena a 30 m sobre el terreno. El receptor se ubicó en el hospital, con una antena de 10 m. Estas alturas representan condiciones muy comunes en zonas rurales: un punto en elevación y un punto de recepción en zona más urbana sin infraestructura alta. Esta geometría es suficiente para ver si existe o no una línea de vista directa y cómo afecta la difracción en un escenario montañoso.

La frecuencia usada fue 540 MHz, dentro de la banda UHF de TVWS que ofrece buena cobertura y baja pérdida con bandas más altas. Se utilizó ya que al hacer el respectivo barrido en la fase anterior, se observó que era una de las frecuencias libres debido a su baja ocupación espectral. También se configuraron parámetros físicos típicos para un entorno continental templado:

conductividad del suelo de 0.02 S/m, permitividad de 15 y refractividad de 301 N-units. Esto ayuda a que la simulación sea lo más realista posible para Mogotes, como se muestra en la Tabla 1.

Sitio	Latitud	Longitud	Altura de antena sobre el terreno [m]
Tx – El Medio, Mogotes	6.4658438	-72.99195608148587	30
Rx – Hospital San Pedro Claver	6.4784848	-72.97264000422128	10

Tabla 1. Coordenadas geográficas del transmisor y receptor para la caracterización de terreno.

Estas coordenadas se utilizaron directamente en el software de MATLAB mediante las funciones txsite y rxsite. Trabajar con la altura de antena sobre el terreno es importante porque el modelo Longley–Rice combina esa información con el perfil de elevación del terreno para decidir si el enlace es línea de vista, LOS, o si está dominado por difracción.

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia de operación	F	540 MHz
Altura antena Tx	h_Tx	30 m
Altura antena Rx	h_Rx	10 m

Conductividad del suelo	Σ	0.02 S/m
Permitividad relativa del suelo	ϵ_r	15
Refractividad atmosférica	N	301 N-units
Zona climática	—	continental-temperate
Variabilidad temporal	p_t	0.5
Variabilidad situacional	p_s	0.5

Tabla 2. Parámetros utilizados por defecto en Matlab.

Estas variables componen directamente el objeto `propagationModel` en MATLAB. La idea es que el modelo no sólo considere un perfil de terreno fijo, sino también la dispersión esperable debida a cambios de clima, humedad y otras condiciones que en campo nunca son constantes.

B.0.1 Algoritmo Matlab propagationModel utilizando LongLeyRice

1. Explicación paso a paso

A continuación, se muestra el algoritmo utilizado para configurar el modelo Longley–Rice y calcular la pérdida de trayecto entre los dos sitios. Se mantuvieron comentarios en español dentro del script para documentar las decisiones de diseño. (Rodríguez y Díaz, 2025)

El script está organizado de la siguiente manera. Primero se limpian las variables con `clear; clf; close all;` para evitar interferencias o errores de ejecuciones anteriores. Luego se definen las coordenadas y las alturas de antena, que están en la Tabla 1. Después se fijan los parámetros físicos

del terreno y la atmósfera, que son los que se integran al modelo, y se encuentran la Tabla 2. A partir de allí se crea el objeto de propagationModel con el tipo "longley-rice" y se construyen los sitios txsite y rxsite con sus propiedades. El siteviewer con terreno GMTED2010 es muy útil para verificar visualmente que ambos puntos están bien ubicados y para hacerse una idea del relieve real entre ellos.

La línea clave es $[pl_dB, info] = pathloss (pm, rx, tx)$; Aquí MATLAB recorre el perfil de terreno entre Tx y Rx, decide si hay línea de vista o no, y aplica internamente las ecuaciones del modelo ITM.

El presupuesto de enlace se calcula con la Ecuación 1, esta permite evaluar si, con la potencia real del transmisor y la ganancia de las antenas, se puede obtener una señal utilizable en el receptor. En zonas montañosas, subir o bajar la antena unos cuantos metros puede significar cambios de varios dB, por eso este análisis es tan importante.

$$P_r [dBm] = P_t + G_t + G_r - PL - L_{misc} \quad (1)$$

El resultado pl_dB es la pérdida total estimada en decibelios para las condiciones configuradas. La estructura info almacena datos adicionales como el modo de propagación, el tipo de difracción, la distancia efectiva, entre otros.

La función coverage, es bastante importante ya que genera un mapa de cobertura alrededor del transmisor que ayuda a visualizar hasta dónde podría llegar la señal bajo el mismo modelo de propagación. Todo este modelo se obtuvo de (MathWorks, 2024)

RESULTADOS Y HALLAZGOS

La pérdida estimada fue aproximadamente 95.25 dB, lo cual es coherente con el terreno de Mogotes, como se muestra en la Tabla 3. El modelo mostró que el enlace no es completamente de

línea de vista y que gran parte de la señal se ve afectada por difracción. Esto significa que el enlace depende mucho de la altura de las antenas y de la frecuencia utilizada. En general, esta pérdida es manejable si se usan antenas con algo de ganancia o si se trabaja dentro de TVWS, donde la propagación es más favorable.

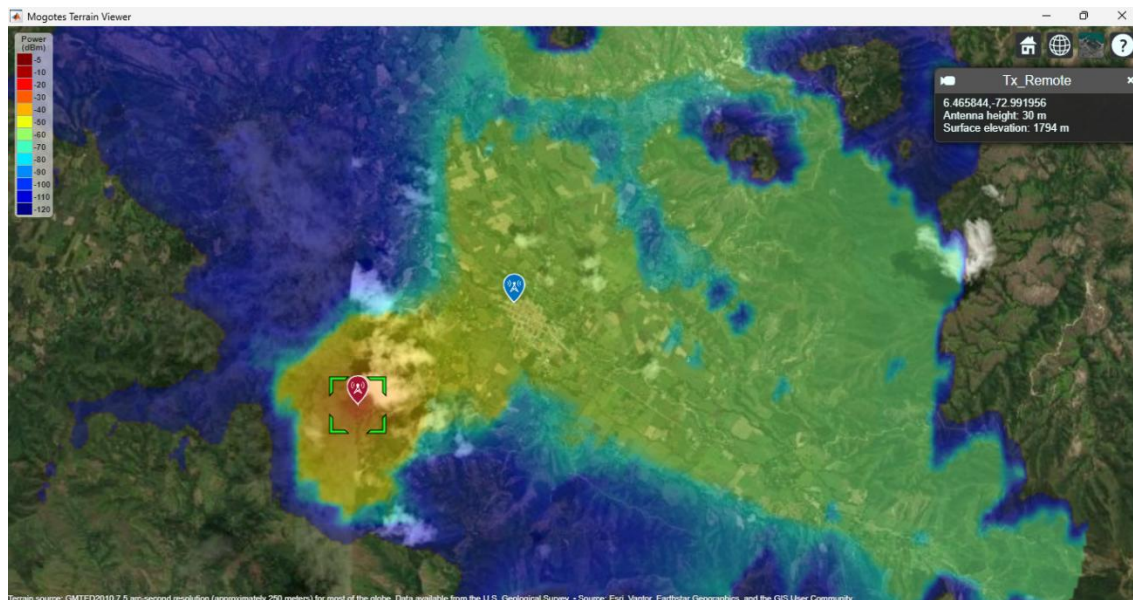


Figura 1. Mapa mostrando la cobertura desde vista superior.

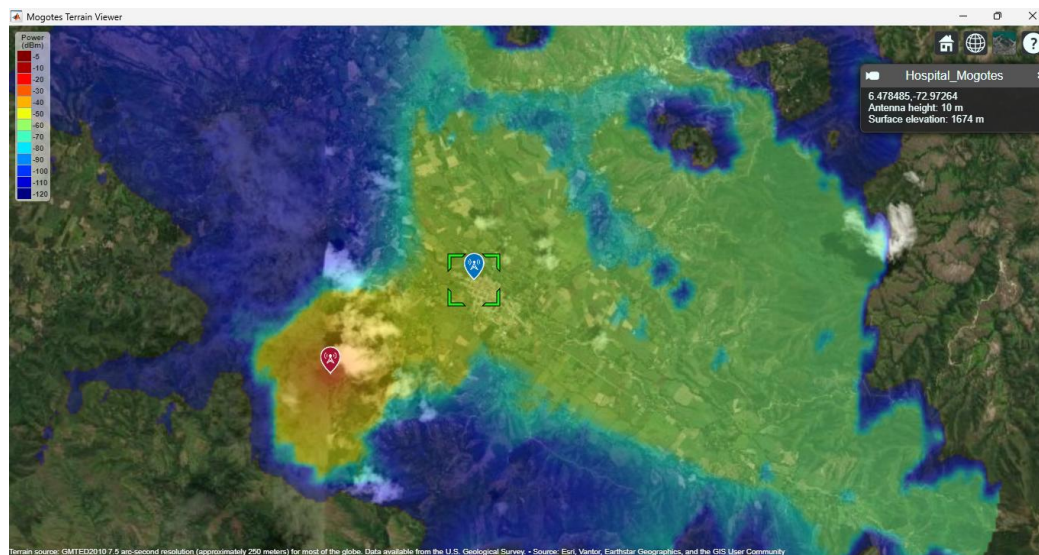


Figura 2. Mapa de visualización mostrando las características del receptor.

>> propagation20

Pérdida (Longley-Rice, mediana): 95.25 dB

LR_result_mogotes_quick.csv x				
	A	B	C	D
	pl_dB	freq	txAntennaHeight	rxAntennaHeight
	Number ▾	Number ▾	Number ▾	Number ▾
1	pl_dB	freq	txAntennaHeight	rxAntennaHeight
2	95.2468	540000000	30	10

Tabla 3. Pérdida en dB.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La pérdida estimada por el modelo Longley–Rice es consistente con un enlace UHF en zona montañosa, donde la propagación está dominada por mecanismos de difracción y no por la línea de vista directa. Esto confirma que el perfil de elevación entre El Medio y el hospital genera obstrucciones parciales que incrementan la atenuación más allá del modelo de espacio libre.

El enlace opera mayoritariamente en modo “difracción sobre obstáculo”, según lo reportado en la estructura info del modelo. Esto implica que la potencia recibida depende fuertemente de la geometría del terreno.

La pérdida calculada ubicó el enlace cerca del límite operativo para potencias típicas de un SDR de laboratorio (17 dBm-20 dBm) con antenas omnidireccionales. Por ello, se deduce que el sistema requiere compensación adicional, ya sea aumentando ganancia de antena, elevando las torres o ajustando la modulación a esquemas más robustos. (National Instruments, 2025)

Los valores de GroundConductivity, Permittivity y Refractivity influyen directamente en los términos de pérdida y efecto de superficie. Las condiciones adoptadas ($\sigma = 0.02$ S/m, $\epsilon_r = 15$, $N = 301$) indican un entorno donde el canal presenta disipación moderada, lo cual incrementa la pérdida con respecto a entornos más húmedos o costeros. Esto valida el uso de frecuencias como TVWS.

La frecuencia utilizada de 540 MHz reduce parcialmente la pérdida por difracción respecto a bandas más altas. Sin embargo, el análisis evidencia que incluso en TVWS el terreno sigue siendo el factor dominante. La atenuación adicional por difracción supera ampliamente la pérdida por espacio libre, lo que subraya la necesidad de una planificación que no dependa únicamente de distancias sino del perfil geográfico completo.

La ecuación de presupuesto de enlace confirma que, con $PL \approx 100$ dB, el margen de señal para recepción confiable exige valores combinados de potencia y ganancia antena–antena superiores a 110–115 dB. Esto refuerza que la viabilidad del enlace no depende sólo del transmisor, sino de la suma de todos los eslabones: potencia radiada, ganancia efectiva, pérdidas misceláneas y elección de modulación.

El estudio de pérdida justificó completamente la transición hacia modulación GMSK, debido a su mayor robustez frente a degradación de SNR. Longley–Rice no sólo predice cuánto se atenúa la señal, sino cómo de inestable puede ser en el tiempo; por tanto, una modulación con fase continua y buena relación energía/símbolo como GMSK aporta confiabilidad adicional frente a fluctuaciones de canal.