



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE COBERTURA RADIOELÉCTRICA

Alumno: Emilio Martínez Gómez

Tutor: Prof. D. Damián Martínez Muñoz
Depto.: Ingeniería de telecomunicación



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE COBERTURA RADIOELÉCTRICA

Alumno: Emilio Martínez Gómez

Tutor: Prof. D. Damián Martínez Muñoz
Depto.: Ingeniería de telecomunicación

Noviembre, 2022

Firma del autor

Firma del tutor

Contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	5
1. Introducción.....	6
1.1. Motivación.....	6
1.2. Objetivos.....	7
1.3. Estructura de la memoria	7
2. Herramientas para el cálculo de cobertura radioeléctrica	9
2.1. Radio Mobile	10
2.2. Xirio-Online	12
3. Base de datos con información geográfica	14
3.1. Introducción	14
3.2. Sistema de referencia geodésico	14
3.3. Proyecciones cartográficas	16
3.4. Mapas utilizados en la herramienta.....	16
4. Modelos de propagación en entornos radioeléctricos	18
4.1. Introducción	18
4.2. Atenuación en espacio libre	20
4.3. Recomendación UIT-R P.526-11	21
4.3.1. Difracción sobre tierra esférica.....	22
4.3.2. Obstáculo único en arista en filo de cuchillo.....	24
4.3.3. Obstáculo único en forma redondeada	26
4.4. Modelo de Okumura-Hata	27
4.1. Método COST-231-Hata	29
4.2. Modelo de la tierra plana.....	33
4.3. Método longley-rice.....	35
4.4. Método ray-tracing	37
5. Trabajo realizado.....	39

5.1	Mapping toolbox.....	40
5.1.1.	Funciones utilizadas.....	41
5.2	Antena toolbox	43
5.2.1.	Funciones utilizadas	44
5.3	Interfaz gráfica	53
5.3.1.	GUIDE.....	53
5.3.2.	App Designer	54
5.4	Funcionamiento de la herramienta	55
5.4.1	Modelos de propagación.....	56
5.4.2	Cálculo de cobertura en entorno urbano.	57
5.4.3.	Cálculo de cobertura en entorno rural.....	61
6.	Pruebas realizadas	65
7.	Conclusión y líneas futuras.....	67
8.	Anexos	68
8.1	Anexo I. Exportar mapas en OpenStreetMap	68
8.2	Anexo II. Manual de usuario.....	69
8.3	Anexo III. Empaquetar aplicación.....	81
8.4	Anexo IV. Requerimientos de la herramienta y guía de instalación	82
	Referencias	83

Índice de tablas

Tabla 1. Radio de la primera zona de Fresnel en el punto medio de un enlace de 40 km a distintas frecuencias.....	24
Tabla 2. Modelos de propagación de la herramienta	49
Tabla 3. Resumen del cálculo de Radio Mobile	66
Tabla 4. Resumen del cálculo con la herramienta desarrollada.....	66

Índice de imágenes

Ilustración 2-1. Interfaz gráfica de Radio Mobile	11
Ilustración 2-2. Ejemplo de un cálculo de cobertura.....	11
Ilustración 2-3. Interfaz gráfica de Xirio-Online	13
Ilustración 2-4. Simulación de cobertura con el método de Okumura-Hata.....	13
Ilustración 3-1. Sistema de referencia elipsoidal.....	15
Ilustración 3-2. Interfaz de la web OpenStreetMap	17
Ilustración 4-1. Pérdidas de propagación, en función de la distancia, para estas tres frecuencias: 300 MHz, 800 MHz y 2 GHz.....	21
Ilustración 4-2. Factor normalizado de admitancia de superficie K.	23
Ilustración 4-3. Obstáculo idealizado con arista en filo de cuchillo.....	24
Ilustración 4-4. Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo	25
Ilustración 4-5. Geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R	26
Ilustración 4-6. Pérdidas de propagación para una altura del transmisor de 30 metros y una altura del receptor de 1.5 metros con diferentes frecuencias.....	28
Ilustración 4-7. Gráfica de atenuación del método de Okumura-Hata en zona rural	29
Ilustración 4-8. Escenario de propagación NLOS usado en el modelo COST 231. Vista perfil.....	30
Ilustración 4-9. Escenario de propagación NLOS usado en el modelo COST 231. Vista superior.....	31
Ilustración 4-10. Pérdidas de propagación para una altura del transmisor de 30, 60 y 200 metros	33
Ilustración 4-11. Esquema de parámetros en la transmisión por tierra plana ...	34
Ilustración 4-12. Pérdidas de propagación para una altura del transmisor de 10, 30 y 60 metros.....	35
Ilustración 4-13. Esquema de reflexión utilizando dos rayos.....	37
Ilustración 4-14. Esquema de cálculo del modelo de Fresnel	37
Ilustración 4-15. Dipolo vertical y su imagen para determinar la reflexión sobre un conductor plano de extensión infinita	38
Ilustración 5-1. Panel principal de la herramienta	39
Ilustración 5-2. Mapa por defecto de siteviewer.....	41
Ilustración 5-3. Diferentes opciones de mapas que ofrece Site Viewer.....	42
Ilustración 5-4. Latitud, longitud y altura del terreno en un punto determinado	42
Ilustración 5-5. Mapa cargado con las edificaciones de una zona de Sevilla ...	43
Ilustración 5-6. Visualización de una antena tipo dipoleBlade.....	44

Ilustración 5-7. Impedancia de una antena dipoleBlade	45
Ilustración 5-8. Campo eléctrico y magnético de una antena.....	46
Ilustración 5-9. Intensidad del campo sobre tierra plana.....	47
Ilustración 5-10. Localización del transmisor creado.....	48
Ilustración 5-11. Ejemplo de cobertura en espacio libre.....	50
Ilustración 5-12. Cobertura calculada en entorno urbano	51
Ilustración 5-13. Línea de visión directa entre emisor y receptor.	52
Ilustración 5-14. Cálculo de cobertura con raytrace y 2 reflexiones	53
Ilustración 5-15. Interfaz gráfica de GUIDE	54
Ilustración 5-16. Página inicial de App Designer.....	55
Ilustración 5-17. Esquema de funcionamiento de la herramienta.....	56
Ilustración 5-18. Ejemplo de atenuación para la variante COST-231.....	57
Ilustración 5-19. Interfaz principal para el cálculo en zona urbana.....	57
Ilustración 5-20. Mapa cargado de zona de Sevilla.....	58
Ilustración 5-21. Ubicación del transmisor y receptor elegido.	59
Ilustración 5-22. Nota de advertencia	59
Ilustración 5-23. Rango de cobertura en zona urbana	60
Ilustración 5-24. Cálculo de cobertura con raytracing	61
Ilustración 5-25. Interfaz principal para el cálculo en zona rural.....	61
Ilustración 5-26. Ubicación del transmisor elegido.....	62
Ilustración 5-27. Antena tipo hélice.....	63
Ilustración 5-28. Intensidad del campo sobre tierra plana.	64
Ilustración 5-29. Cálculo de cobertura en zona rural.....	64
Ilustración 6-1. Resultado de cálculo de cobertura con Radio Mobile	65
Ilustración 6-2. Resultado de cálculo de cobertura con la herramienta	66
Ilustración 8-1. Opción de exportar de OpenStreetMap	68
Ilustración 8-2. Panel para exportar en OpenStreetMap	68
Ilustración 8-3. Panel de exportación y archivo descargado.	69
Ilustración 8-4. Pantalla principal de la aplicación.....	70
Ilustración 8-5. Ejemplo de modelo de propagación de Okumura-Hata	71
Ilustración 8-6. Interfaz del apartado cálculo de cobertura en entorno urbano .	71
Ilustración 8-7. Mapa cargado	72
Ilustración 8-8. Transmisor sobre el mapa cargado previamente.....	73
Ilustración 8-9. Mensaje de advertencia: Debes cargar un mapa.....	73
Ilustración 8-10. Rango de cobertura calculada.....	74
Ilustración 8-11. Mensaje de advertencia: Debes elegir un transmisor	74
Ilustración 8-12. Advertencia de rango de cálculo	75

Ilustración 8-13. Resultado de cálculo con raytrace y 2 reflexiones.	75
Ilustración 8-14. Mensaje de advertencia: Debes elegir un receptor	76
Ilustración 8-15. Interfaz del apartado cálculo de cobertura en entorno rural ...	77
Ilustración 8-16. Ubicación de la antena transmisora.....	78
Ilustración 8-17. Antena tipo dipoleBlade.....	78
Ilustración 8-18. Intensidad de campo de una antena tipo dipoleBlade	79
Ilustración 8-19. Imagen del cálculo realizado	80
Ilustración 8-20. Pestañas de MATLAB	81
Ilustración 8-21. Package App	81
Ilustración 8-22. Interfaz de Package App	81
Ilustración 8-23. Install App	82

Resumen

Este proyecto implementa una herramienta de estimación de cobertura de radio en el entorno de programación MATLAB. Para ello se ha realizado un estudio de las herramientas comerciales que permiten el cálculo de cobertura radioeléctrica, extrayendo sus principales características y parámetros de configuración. También se ha recopilado información sobre las diferentes bases de datos con información geográfica.

La herramienta desarrollada agrupa diferentes modelos empíricos empleados en el análisis de cobertura. Además de estos métodos empíricos, se ha implementado un modelo sencillo teniendo en cuenta las pérdidas por difracción con uno, dos y varios obstáculos, además de las pérdidas básicas de propagación.

Para terminar, se ha hecho un testeo del software desarrollado, comparando los resultados obtenidos con otras herramientas comerciales.

Esta herramienta ha sido diseñada con App Designer para así conseguir una interfaz sencilla e intuitiva para el usuario. El software permite plantear distintas líneas futuras, con el fin de actualizar, mejorar e incrementar la potencialidad del software y que de esta manera se convierta en una herramienta robusta y fiable.

Abstract

This project implements a radio coverage estimation tool in the MATLAB programming environment. For this purpose, a study of the commercial tools that allow the calculation of radio coverage has been carried out, extracting its main characteristics and configuration parameters. Information on the different databases with geographic information has also been collected.

The developed tool groups different empirical models used in coverage analysis. In addition to these empirical methods, a simple model has been implemented taking into account diffraction losses with one, two and several obstacles, in addition to the basic propagation losses.

Finally, the developed software has been tested, comparing the results obtained with other commercial tools. This tool has been designed with App Designer to achieve a simple and intuitive interface for the user. The software allows to propose different future lines, in order to update, improve and increase the potential of the software and thus become a robust and reliable tool.

1. Introducción

1.1. Motivación

En la actualidad con la aparición de nuevas tecnologías la demanda de servicios de comunicaciones móviles se dispara y surge la necesidad de planificar y mantener al día redes de forma rápida y eficiente. Los usuarios demandan una mejor cobertura y servicios de alta capacidad. Las herramientas de planificación simplifican la construcción al reducir el tiempo dedicado a tareas que implican más costes, como ubicar y validar estaciones base que, con estos softwares se automatizan en muy poco tiempo. Además de las herramientas de software modernas, se encuentran disponibles datos de mapas económicos y de alta resolución.

La mayoría de las herramientas informáticas utilizadas hoy en día para calcular la cobertura radioeléctrica se basan generalmente en sistemas de información geográfica (SIG) [1] y utilizan mapas topográficos digitales (DTM) y bases de datos de transmisores en combinación con modelos de distribución según el entorno (rurales, urbanos e interiores) y equipos para la gestión de datos geográficos y cálculos de radio (mapas de cobertura eléctrica, campos eléctricos o densidad de potencia individual o del sistema, etc).

En los últimos años han proliferado las herramientas de pronóstico en línea, que permiten a los usuarios realizar mediciones, en algunos casos sin pagar los altos costos de licencia que ofrecen dichas aplicaciones, ya que en la mayoría de los casos la solución es gratuita o solo se paga por el cálculo o número de cálculos realizados. Otra mejora de estas herramientas es que los usuarios no necesitan equipos potentes y costosos, ya que los cálculos se realizan en los servidores del proveedor de análisis. Radio Mobile y Xirio-online son dos ejemplos del crecimiento de estas aplicaciones, estos proveedores de software también están agregando esta capacidad a sus ofertas.

Al desarrollar este trabajo no pretendemos competir con estos planificadores, nuestro objetivo con este TFG es desarrollar una herramienta de estimación de cobertura que permita a los usuarios combinar sus propios modelos de propagación y modelos de radiación, ya que estos dos aspectos de los procedimientos de planificación de radio son los más importantes en este tipo de cálculos.

Este software está diseñado para predecir la cobertura de radio en tierra y obtener una primera aproximación antes de determinar el tamaño posible de la red de comunicación. La herramienta creada se basa en la estructura de SIG (Sistema de

Información Geográfica), que permite recopilar, almacenar, manipular, analizar y gestionar todo tipo de datos de cualquier tipo (económicos, sociales, demográficos...).

La estructura en la que realizamos los cálculos de cobertura tiene un formato de cuadrícula, es decir, el área de estudio se divide en celdas rectangulares, para cada una de las cuales se considera representativo un valor de altura. Estos valores se almacenan en matrices que utilizaremos para predecir la cobertura de cada celda. Al elegir el tamaño de cada celda, se debe buscar un equilibrio entre la precisión y el tiempo de cálculo, ya que más celdas pueden proporcionar una mayor precisión, pero también dan como resultado un aumento exponencial en el tiempo de ejecución.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este TFG fue crear una herramienta de pronóstico de cobertura de radio. Con este objetivo en mente, desarrollamos esta herramienta con una serie de objetivos, que se enumeran a continuación:

- **Simplicidad.** Al eliminar toda la funcionalidad específica de SIG y centrarnos en un conjunto específico de aplicaciones, se consigue que la herramienta sea más fácil de usar. Esto se debe a la realización de una interfaz simple y limpia, que combina todas las aplicaciones posibles en pocas ventanas.
- **Estructura modular.** La herramienta debe permitir cambios o nuevos desarrollos (diseño de antenas, nuevas funciones...) sin tener que alterar la base de la herramienta.
- **Resultados.** Permitir la visualización sobre OpenStreetMap [2], esto facilita al usuario la comprensión de los resultados al verlos directamente sobre una vista satelital o topográfica.

1.3. Estructura de la memoria

Esta sección detalla la estructura de la memoria, que consta de 9 capítulos, dos de los cuales contienen anexos y una bibliografía diseñada para proporcionar al lector conocimientos adicionales. A continuación, se muestra una descripción general de lo que ocupa cada capítulo.

- **Capítulo 1:** Introducción. Este capítulo le da al lector una buena comprensión del trabajo realizado. Luego de una breve introducción, se define el conjunto de motivaciones que llevaron a la realización de este trabajo y finalmente se esclarecen un conjunto de objetivos.

- **Capítulos 2, 3 y 4:** Estado del arte. En estos capítulos, se dan a conocer el marco teórico que ocupa en este proyecto, las tecnologías y entornos empleados, así como diversos enfoques ya existentes en el mercado.
- **Capítulos 5 y 6:** Trabajo realizado. En estos apartados se expone las herramientas utilizadas, así como las funciones para realizar la aplicación. También se explican las pruebas realizadas y las comprobaciones con otras herramientas.
- **Capítulo 7:** Conclusión y líneas futuras. Aquí se expone la conclusión obtenida tras el trabajo realizado y las posibles proyecciones de futuro que se prevén tomar.

2. Herramientas para el cálculo de cobertura radioeléctrica

Las herramientas de planificación de radio son un recurso informático que se ha utilizado durante las últimas tres décadas para respaldar el diseño, la puesta en servicio y la optimización de redes de radio globales. Estas herramientas le permiten simular teóricamente la propagación de señales de RF según el entorno de transmisión. Usando estos datos con una precisión óptima, son posibles muchas aplicaciones, como obtener mapas de cobertura teóricos de las redes de comunicación inalámbrica, determinar la complejidad de las implementaciones necesarias para cumplir con los requisitos del servicio o analizar la compatibilidad electromagnética entre las emisiones que comparten el espectro radioeléctrico.

Este tipo de aplicaciones son ampliamente utilizadas por los operadores e instaladores de redes para optimizar su despliegue, así como gestionar el uso del espectro de radiofrecuencia, crear planes de frecuencia y garantizar el cumplimiento adecuado.

Cualquier tipo de implementación de red o transmisor inalámbrico puede simularse utilizando este tipo de herramientas: comunicaciones móviles (GSM, DCS, UMTS, LTE...), radiodifusión (TV, DVB-T, FM, DAB, DVB-H ...), sistemas profesionales de comunicación móvil (PMR, TETRA...), conexiones radio (PDH, SDH...), acceso de banda ancha (LMDS, WIMAX, WiFi...). Siempre que se disponga de los parámetros específicos de cada técnica y de los algoritmos y métodos de cálculo apropiados para cada técnica, las posibles aplicaciones son ilimitadas.

Existen varias herramientas de programación de radio en el mercado hoy en día, la mayoría de las cuales están dirigidas a una audiencia profesional. Tanto el coste de estas herramientas como la necesidad de utilizar cartografía digital supone una gran inversión, lo que en muchos casos las hace inviables económicamente para proyectos de pequeña escala o proyectos en áreas geográficas dispersas donde se requiere poca simulación.

La disponibilidad de herramientas bajo el concepto de aplicaciones distribuidas, donde los usuarios acceden a ellas a través de Internet y pagan únicamente por su uso, puede generar una nueva oportunidad para los profesionales.

Vamos a ver dos principales herramientas comerciales para el cálculo de la cobertura radioeléctrica: Radio Mobile y Xirio-online.

2.1. Radio Mobile

Radio Mobile [3] es un software de distribución libre que permite crear una red de telecomunicaciones compuesta por estaciones de radio y predecir el comportamiento del sistema simulando las conexiones de radio establecidas en él. Entre otras funcionalidades, nos permite realizar estudios de cobertura de red. Para ello, el programa requiere datos digitales de elevación de la topografía de la red junto con los parámetros técnicos de los componentes (potencia de transmisión, sensibilidad del receptor, características de la antena, pérdidas, etc.)

Desarrollada por Roger Coudé, es una herramienta gratuita de simulación de propagación de radio para, entre otras cosas, predecir el comportamiento de los sistemas de radio, simular los radioenlaces y mostrar la zona de cobertura de una red de radiocomunicaciones.

El programa funciona en la gama de frecuencias de 20 MHz a 20 GHz y se basa en el modelo de propagación ITM (Irregular Terrain Model) o Longley-Rice que se explicará en el punto 4.3.

Este software utiliza datos de elevación del terreno que se descargan gratuitamente de Internet para crear mapas virtuales del área de interés, vistas estereoscópicas, vistas en 3-D y animaciones de vuelo. Los datos de elevación se pueden obtener de diversas fuentes, entre ellas del proyecto de la NASA Shuttle Terrain Radar Mapping Misión (SRTM) que provee datos de altitud con una precisión de 3 segundos de arco (100m). [4]

Esta aplicación proporciona la atenuación promedio de las señales de radio que se propagan sobre un terreno irregular en el entorno troposférico según la teoría electromagnética y el análisis estadístico de las propiedades del terreno y los parámetros de comunicación por radio. Para ello, calcula su atenuación media en función de la distancia y la variabilidad de la señal en el espacio y el tiempo. El modelo funciona de dos maneras [5]:

- **Modo punto a punto:** predice las pérdidas de propagación sobre un trayecto determinado a partir de los datos característicos de la señal y el entorno.
- **Modo de predicción del área de cobertura:** opera de forma similar al modo punto a punto, sin embargo, no trabaja sobre un trayecto determinado.

2.2. Xirio-Online

Xirio-Online es una herramienta de planificación radio de uso muy intuitivo desarrollado por la empresa española APTICA. Permite realizar simulaciones de cobertura radioeléctrica en cualquier parte del mundo en medios rurales y urbanos utilizando mapas de alta resolución. Con este software puedes diseñar tus redes sin disponer de herramientas ni cartografía digital.

Esta aplicación, al igual que la mayoría de herramientas de planificación, define un “transmisor” como una estación fija ubicada en un emplazamiento concreto, y un “receptor” como el terminal que se desplaza por la zona de estudio para calcular la cobertura obtenida en cada punto. De acuerdo con esto, Xirio-Online sólo permite calcular de forma directa coberturas en sentido descendente. Si bien es posible estudiar también el sentido ascendente de forma indirecta, realizando ciertas modificaciones en los parámetros del estudio.

Xirio-Online incluye los métodos de cálculo más habituales, especialmente para entorno urbano (Rec. UIT-R P.530, Rec. UIT-R P.1411, COST231, Xia-Bertoni, trazado de rayos, Okumura-Hata, etc.), además propone al usuario los parámetros por defecto más adecuados en cada caso.

En lo referente a cartografía, la aplicación utiliza GoogleMaps lo que hace posible trabajar en todo el mundo y de manera fácil e intuitiva. Incorporando, por otro lado, modelos del terreno 3D, que simulan la orografía del escenario donde se desplegarán las redes, tanto para entornos rurales como urbanos.

XIRIO Online PLANNINGTOOL permite el acceso a la aplicación, así como realizar cálculos a baja resolución de forma completamente gratuita. El usuario únicamente paga cuando desea realizar los cálculos con una calidad profesional (alta resolución) lo que le proporciona derecho además a compartir los resultados con terceros usuarios o descargarlos a su máquina local. [6]

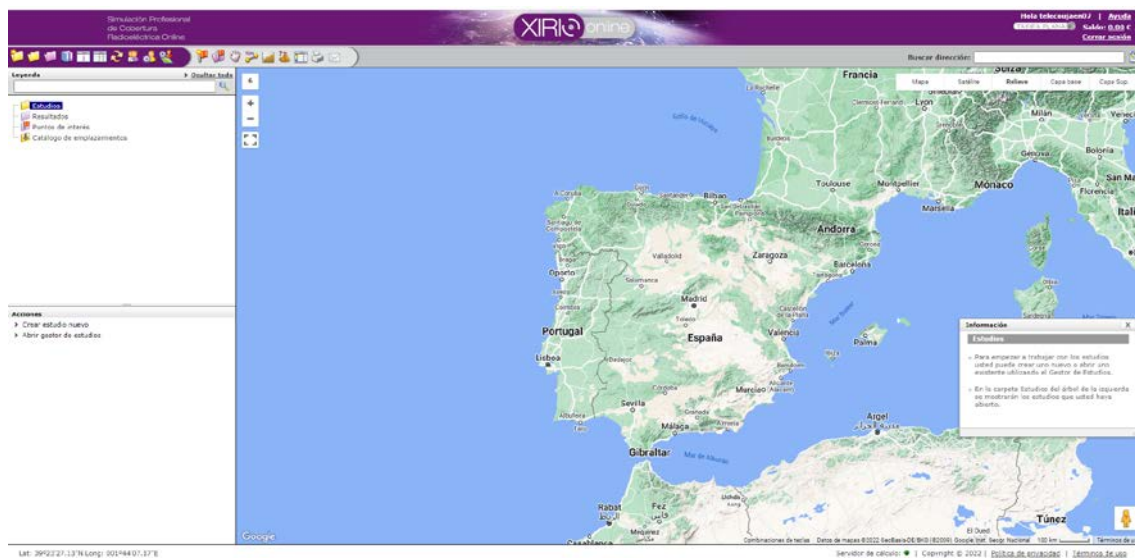


Ilustración 2-3. Interfaz gráfica de Xirio-Online

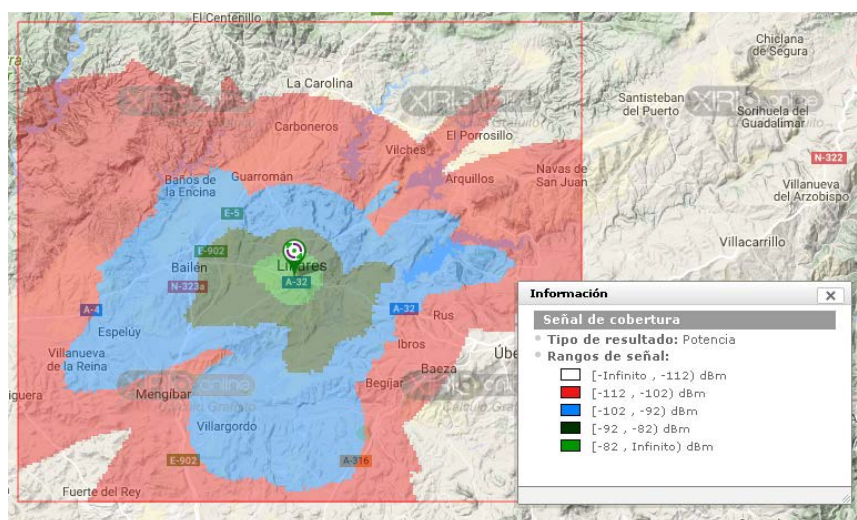


Ilustración 2-4. Simulación de cobertura con el método de Okumura-Hata

3. Base de datos con información geográfica

3.1. Introducción

La cartografía digital es el proceso de compilar y formatear una colección de datos en una imagen virtual. La función principal de esta tecnología es generar mapas que proporcionen una representación precisa de un área específica y definir elementos cartográficos de interés según el tipo de mapa. La tecnología también permite el cálculo de distancias de un lugar a otro, haciendo más precisa la creación de un mapa.

Aunque los primeros métodos de dibujo con pluma y tinta todavía se usan de forma aislada y están más asociados con la nostalgia, es más probable que los cartógrafos de hoy se sienten frente a un equipo y creen mapas con el último software de cartografía especializado.

En muchos casos, los mapas digitales se pueden actualizar sincronizándolos con las actualizaciones de la propia red de satélites, un avance sobre el método tradicional de cartografía. Las nuevas tecnologías han hecho que la creación de mapas sea más precisa y rápida, haciendo que las tareas de los cartógrafos sean más eficientes. El software informático dedicado a este campo brinda a los profesionales un control increíble sobre la preparación y el procesamiento de mapas.

Especificar la posición cuantitativa de un punto en la superficie de la Tierra requiere dos sucesos: una referencia a un sistema de coordenadas que pueda usarse como punto de partida y una expresión matemática que simule fácilmente la superficie de la Tierra.

3.2. Sistema de referencia geodésico

Un sistema de referencia geodésico es una técnica matemática que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre.

Dado que la definición matemática del geoide es muy compleja, la superficie de la Tierra se puede representar con mucha precisión mediante un elipsoide de revolución, definiéndose como sigue:

- Plano de referencia: dimensiones (semiejes a , b).
 - o Semieje ecuatorial (a) o semieje mayor: el semieje mayor corresponde a la longitud del ecuador desde el centro de masas de la Tierra hasta la superficie terrestre.

- o Semieje polar (b) o semieje menor: Longitud del semieje desde el centro de masas de la Tierra hasta uno de los polos.
- Ejes o líneas de referencia en la superficie. Sentidos de medida.

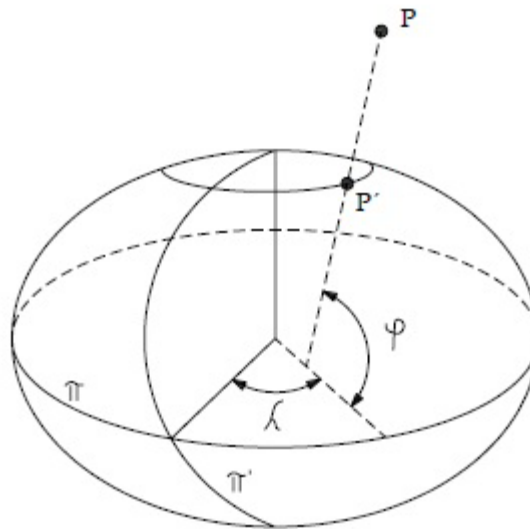


Ilustración 3-1. Sistema de referencia elipsoidal

Si se toma como aproximación de la figura de la Tierra un elipsoide de dos ejes de revolución, la situación de un punto P sobre la superficie terrestre (ver Ilustración 3-1. Sistema de referencia elipsoidal) quedará definida por coordenadas ϕP , λP y hP (altitud sobre la superficie del elipsoide). Siendo:

π : Plano del ecuador

π' : Meridiano de Greenwich.

P' : Punto en que corta al elipsoide la normal a este que pasa por P.

ϕP = Ángulo que forma la normal al elipsoide con el plano del ecuador.

λP = Ángulo que forma el meridiano que pasa por P' con el meridiano origen en sentido horario ($0 \leq \lambda \leq 360^\circ$).

hP = Módulo del vector PP' , es decir, distancia sobre la normal al elipsoide.

Dentro de los sistemas geodésicos, podemos clasificarlos en dos distintos:

- Sistema geodésico global, el cual es un sistema de referencia universal, valido para cualquier punto del planeta.
- Sistema geodésico local, es un sistema de referencia cuyo alcance es un espacio geográfico o una región determinada.

3.3. Proyecciones cartográficas

Una red de líneas paralelas y meridianas, dispuestas en forma de malla establecen una relación ordenada entre los puntos de la superficie terrestre curva y los de una superficie plana (un mapa).

Los puntos de un sistema de coordenadas propuesto se identifican mediante las coordenadas cartesianas (x e y) en una malla. Estas coordenadas se obtienen matemáticamente a partir de coordenadas geoespaciales no proyectadas (longitud y latitud).

Existen tres tipos de proyección:

- **Cilíndrica.** El mapa resultante muestra una red de paralelos y meridianos perpendiculares. La deformación de la escala crece al alejarse del Ecuador, donde se conserva la escala. A pesar de esta distorsión, el hecho de que los meridianos y los paralelos sigan siendo perpendiculares entre sí da lugar a una representación sencilla y útil en diversos contextos, incluida la navegación.
- **Cónica.** Esto se logra proyectando elementos de la esfera terrestre en un cono tangente. El vértice se encuentra en el eje que conecta los dos polos. En la proyección cónica, los meridianos se transforman en líneas rectas que parten de los polos y los paralelos se transforman en círculos concéntricos centrados en los polos.
- **Acimutal.** Parte de la Tierra se proyecta directamente sobre el plano tangente del globo en el punto seleccionado. Se obtiene una imagen similar a la visión de la Tierra desde un punto interior a ella. [7]

3.4. Mapas utilizados en la herramienta

Matlab utiliza un modelo de elevación del terreno de resolución múltiple global (GMTED2010). La precisión vertical global agregada de GMTED2010 puede resumirse en términos de resolución y error cuadrático medio (RMSE) de los productos con respecto a un conjunto global de puntos de control (precisión global estimada de 6 m RMSE) proporcionado por la NGA. A 30 segundos de arco, el rango de RMSE de GMTED2010 está entre 25 y 42 metros; a 15 segundos de arco, el rango de RMSE está entre 29 y 32 metros; y a 7,5 segundos de arco, el rango de RMSE está entre 26 y 30 metros.

En el software realizado podemos diferenciar dos tipos de cálculo según el entorno que queremos deducir, rural y urbano.

Para el entorno rural no hace falta descargar mapas de la red, la propia herramienta muestra la ubicación elegida mediante la función *siteviewer*.

Para el entorno urbano deberemos descargar los mapas de la zona en la que queremos generar el cálculo de la cobertura radioeléctrica. Este mapa lo descargaremos desde la web openstreetmap.com, se explicará la forma de hacerlo en el Anexo I. Exportar mapas en OpenStreetMap.

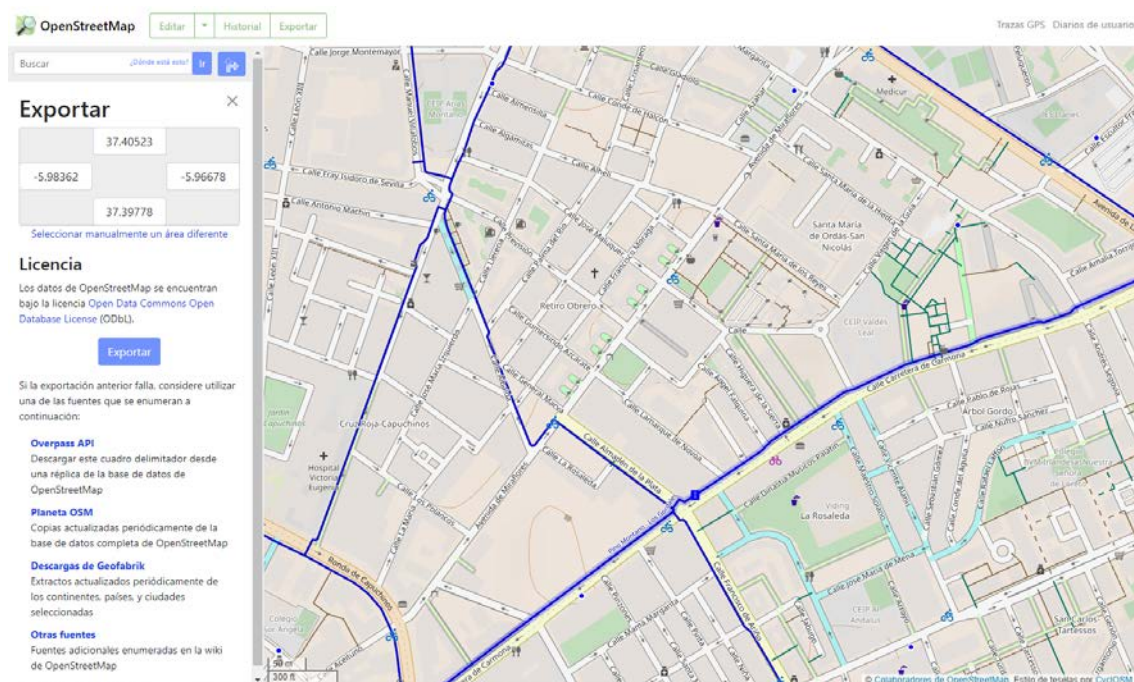


Ilustración 3-2. Interfaz de la web OpenStreetMap

4. Modelos de propagación en entornos radioeléctricos

4.1. Introducción

Históricamente, podemos observar la evolución del uso de modelos de propagación y ver claras mejoras tanto en precisión como en complejidad.

Los primeros modelos datan de la década de 1960 y se caracterizaban por su uso en zonas rurales o áreas de gran cobertura sin reutilización de frecuencias. Se trata de métodos empíricos basados en mediciones realizadas principalmente en EE.UU. y Japón. Los modelos más representativos son: el modelo de Okumura y la recomendación (UIT-R P.1546).

Alrededor de la década de 1970, aparecieron los primeros modelos informáticos para diferenciar entre áreas rurales y urbanas. Tomando como ejemplo las áreas terrestres, los algoritmos de predicción se basan en el estudio de los perfiles del terreno y se aplican al modelado de propagación, esta categoría incluye los modelos de método Egli y Longley Rice. El modelo más utilizado para áreas urbanas es el modelo Okumura-Hata, que se basa en la curva de distribución de Okumura. Los métodos de segunda generación involucran el uso de bases de datos topográficas (BDT o GIS) en áreas rurales, proporcionando resultados de cobertura impresos en mapas. Para las zonas urbanas se utilizó un procedimiento semiempírico basado en la BDT urbana. El ejemplo más representativo de esta fase es COST 231 Walfisch-Ikegami.

Finalmente, se aplican métodos físicos y empíricos a entornos microcelulares e interiores basados en la teoría de la difracción geométrica (GTD), donde una gran cantidad de información para la planificación urbana y la planificación de la edificación se debe obtener de bases de datos de ciudades y planos.

En la mayoría de las situaciones reales de entorno de los sistemas de comunicaciones entre transmisor y receptor suelen haber diversos objetos que producen difracciones y reflexiones de la señal, por lo que se hace necesario el desarrollo de modelos sencillos que permitan determinar las pérdidas de forma simplificada.

La mayoría de estos modelos predicen las pérdidas de propagación proporcionales a la distancia elevada en un factor n entre 3 y 4 con correcciones en función de la vegetación, orografía del terreno, constitución de las paredes, altura de las antenas etc. Las pérdidas de propagación se expresan en decibelios (dB) y se modelan con una expresión como:

$$L(dB) = L_e + 10n \cdot \log_{10}(d) + 20 \log(f) \quad (1)$$

- L_e : pérdidas asociadas al entorno
- d : distancia
- f : frecuencia

Existen múltiples modelos empíricos basados en medidas experimentales como el de la Rec. UIT-R P.370 (rural), Okumura-Hata, Lee, Walfish-Ikegami (urbano), COST-231. Estos métodos describen las pérdidas de propagación en entornos de exteriores, para entornos de interiores existen modelos experimentales similares tales como el de Rappaport-Sandhu o el de la Rec. UIT-R P.1238.

La propagación de ondas de radio rara vez ocurre en un entorno aislado e ideal, en la mayoría de los casos, el entorno en el que se propagan las ondas de radio se ve perturbado por obstáculos fijos o móviles. El UIT-R en su recomendación P.1411-8 (07/2015) definió cinco entornos diferentes que considera los más comunes, reconociendo que cada categoría incluye varias distribuciones de modelos posibles para los entornos más comunes [8], a continuación los reumo.

- Urbano de construcción muy alta.
 - o Valle profundo de edificaciones con decenas de pisos.
 - o Dispersión sin visibilidad directa (NLOS)
 - o Retardas largos de trayecto
- Urbano de construcción alta
 - o Valle profundo de edificaciones con varios pisos
 - o Retardas largos de trayecto
- Urbano de construcción baja/Suburbano
 - o Edificaciones con menos de tres pisos y calles anchas
 - o Retardos grandes
- Zona residencial
 - o Construcciones de uno o dos pisos
- Zona rural
 - o Pequeñas casas
 - o Influencia de la altura del terreno

4.2. Atenuación en espacio libre

El espacio libre se define como un vacío perfecto que puede considerarse infinito en todas las direcciones. En este sentido, la propagación en el espacio libre es la propagación de una onda radioeléctrica radiada en el espacio libre. [9]

Según la propagación en el espacio libre, se pueden utilizar las siguientes fórmulas:

Intensidad de campo para una onda transmitida isotrópicamente:

$$E = Pt - 20 \log d + 74,8 \quad (2)$$

Potencia recibida a través de una antena receptora isotrópica para una intensidad de campo dada:

$$Pr = E - 20 \log f - 167,2 \quad (3)$$

Pérdida de transmisión básica en el espacio libre cuando una potencia e intensidad de campo se transmiten de manera isotrópica:

$$Lbf = Pt - E + 20 \log f + 167,2 \quad (4)$$

Densidad de flujo de potencia para una intensidad de campo dada:

$$S = E - 145,8 \quad (5)$$

donde:

- P_t : potencia transmitida de manera isotrópica [dB(W)]
- P_r : potencia disponible recibida a través de una antena con adaptación conjugada [dB(W)]
- E : intensidad de campo eléctrico [dB(μ V/m)]
- f : frecuencia (GHz)
- d : longitud del trayecto radioeléctrico (km)
- L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)
- S : densidad del flujo de potencia [dB(W/m²)]

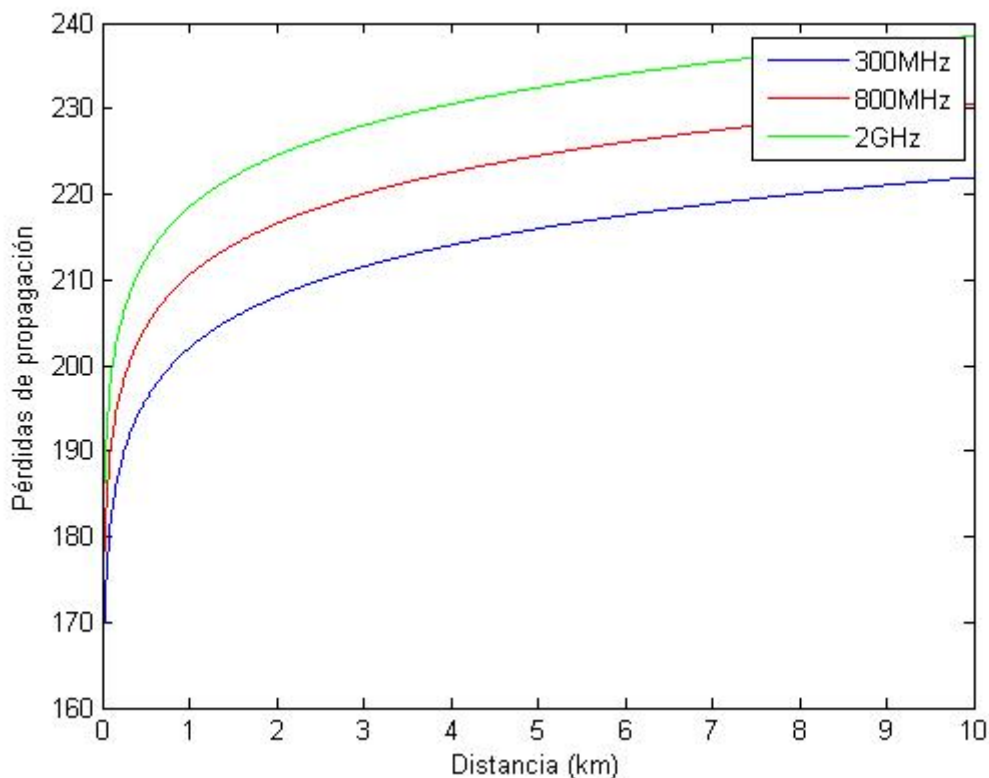


Ilustración 4-1. Pérdidas de propagación, en función de la distancia, para estas tres frecuencias: 300 MHz, 800 MHz y 2 GHz

4.3. Recomendación UIT-R P.526-11

La Recomendación UIT-R P.526 ofrece varios modelos para estimar el efecto de la difracción en la intensidad de campo recibida. Estos modelos son adecuados para diferentes tipos de obstáculos y diferentes geometrías de trayecto.

Según la orografía de la tierra, podemos distinguir tres tipos de terreno:

- Terreno liso: La Tierra se puede considerar lisa si la rugosidad del terreno es de $0,1 R$ o menos, donde R corresponde al valor máximo del radio de la

primera zona de Fresnel. En este caso, el modelo de predicción se basa en la difracción en una Tierra esférica.

- Obstáculos aislados: el perfil del terreno del trayecto de propagación está formado por uno o más obstáculos aislados.
- Terreno ondulante: El perfil está compuesto de varias colinas pequeñas, en las que todas tienen un tamaño medio similar. En ese rango, la Rec. ITU R P.1546 es mejor para predecir la intensidad de campo, pero no como método de propagación de difracción.

4.3.1. Difracción sobre tierra esférica

Los cálculos dependen del tipo de trayectoria, distancia, frecuencia y propiedades eléctricas de la superficie terrestre.

Para grandes distancias transhorizonte, el valor relativo de la intensidad de campo de difracción E con respecto a la intensidad de campo de espacio libre E_0 está determinado por:

$$20 \log \left(\frac{E}{E_0} \right) = F(x) + G(y_1) + G(y_2) \quad dB \quad (6)$$

Donde x es la longitud del trayecto entre las antenas de alturas normalizadas y_1 e y_2 .

Para este tipo de trayectos es fundamental el coeficiente de tolerancia superficial normalizado K . La fórmula para el cálculo de este parámetro se encuentra en la recomendación ITU-R 526-10 [10].

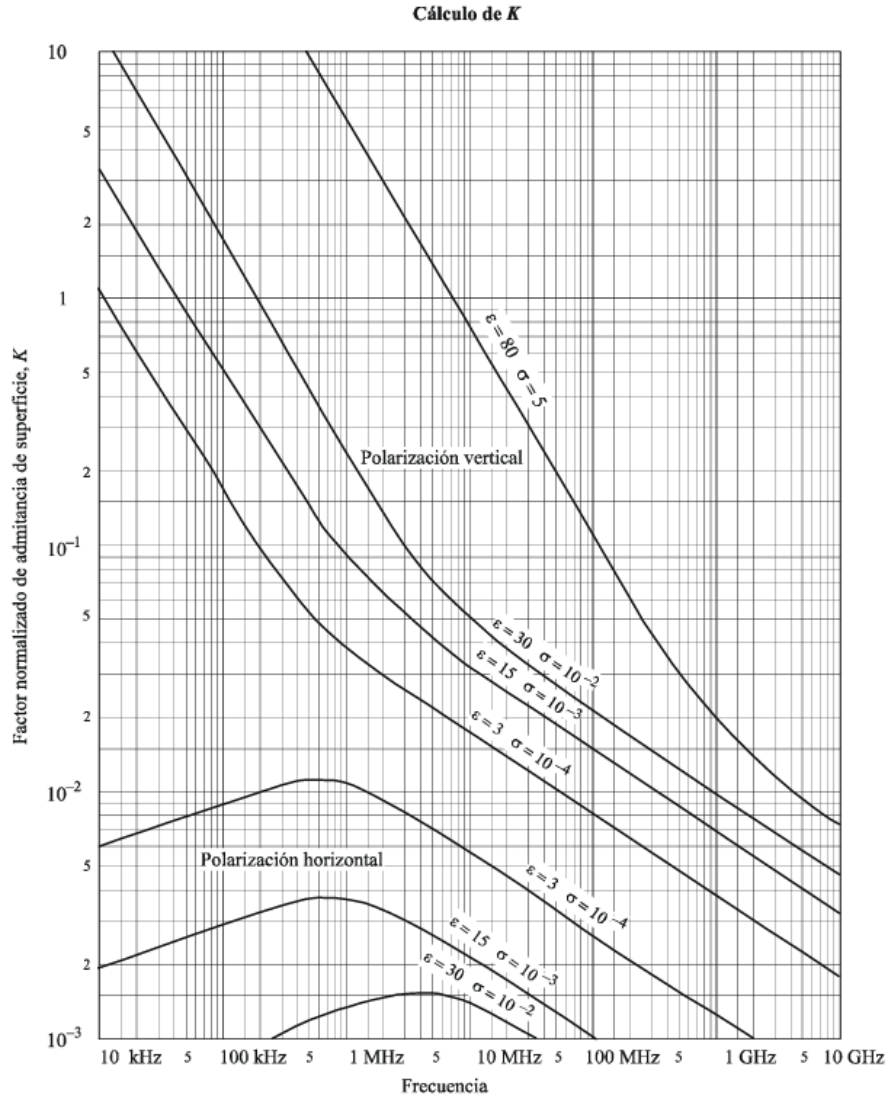


Ilustración 4-2. Factor normalizado de admitancia de superficie K .

Para casos de trayectos con línea de visión (LOS) con difracción sobre tierra esférica, se utiliza una interpolación lineal entre el límite de la zona de difracción cuando la atenuación del espacio libre es cero, y el horizonte radioeléctrico. Las pérdidas por difracción se calculan en función de R_1 (radio de la primera zona de Fresnel), siguiendo la ecuación:

$$A(dB) = \left[1 - \frac{5}{3} \frac{h}{R_1}\right] A_h \quad (7)$$

Donde h es el trayecto donde no existen obstáculos y A_h son las pérdidas por difracción en el horizonte radioeléctrico.

A continuación, se muestra el radio de la primera zona de Fresnel en el punto medio (el peor caso tiene un radio mayor) de un enlace de 40 km a distintas frecuencias [11]:

Banda	Longitud de onda	R_1
MF	200 m	1.4 km
Banda X	0.03 m	17 m
Espectro visible	0.5×10^{-6} m	7 cm

Tabla 1. Radio de la primera zona de Fresnel en el punto medio de un enlace de 40 km a distintas frecuencias

4.3.2. Obstáculo único en arista en filo de cuchillo

En este caso todos los parámetros geométricos se combinan en un solo parámetro adimensional, generalmente indicado por v , y que puede tener diferentes formas equivalentes según el parámetro geométrico elegido.

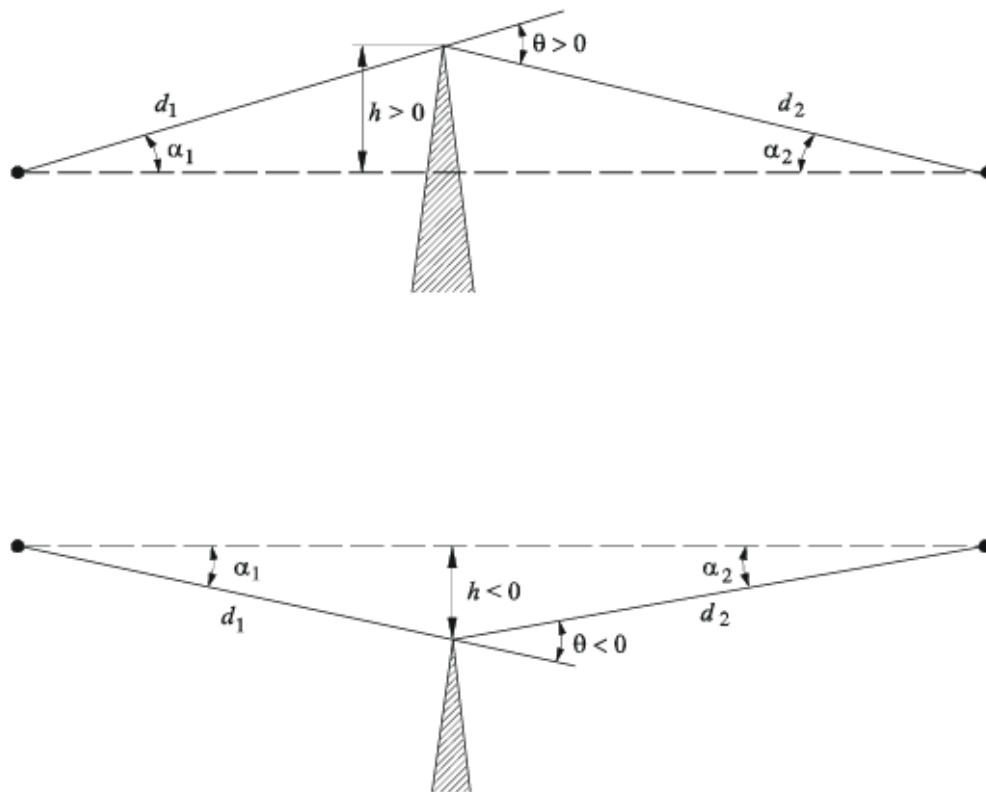


Ilustración 4-3. Obstáculo idealizado con arista en filo de cuchillo

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (8)$$

Donde h es la altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima no sobrepasa esa línea, h será negativa.

Si $h > 0$ existe obstrucción geométrica del enlace y si $h < 0$ existe despejamiento geométrico del enlace [11]

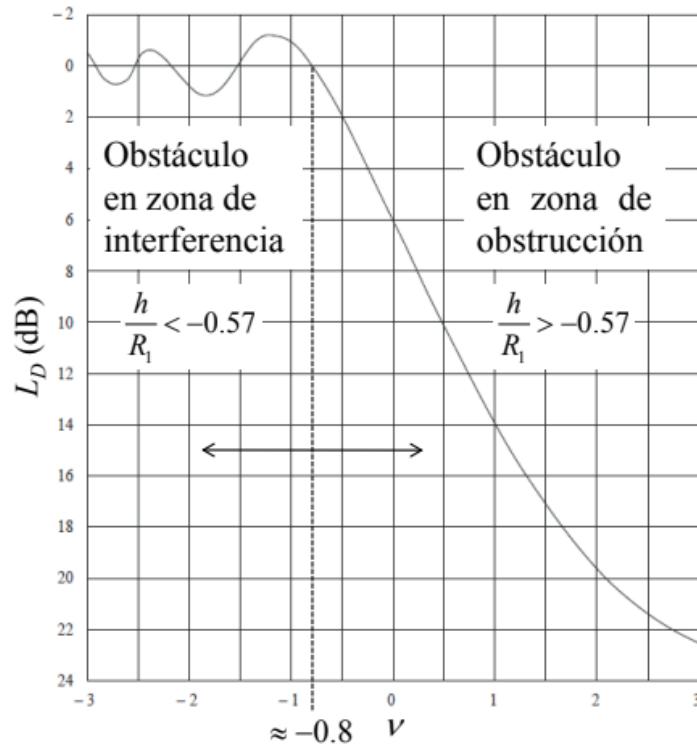


Ilustración 4-4. Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo

Se puede observar que:

$$v = \sqrt{2} \left(\frac{h}{R_1} \right) \quad (9)$$

La pérdida provocada por la presencia del obstáculo, $L_D(v)$ (10), depende solamente de v . Normalmente $v > -0.8$ y puede calcularse como:

$$L_D(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad \text{dB} \quad (10)$$

4.3.3. Obstáculo único en forma redondeada

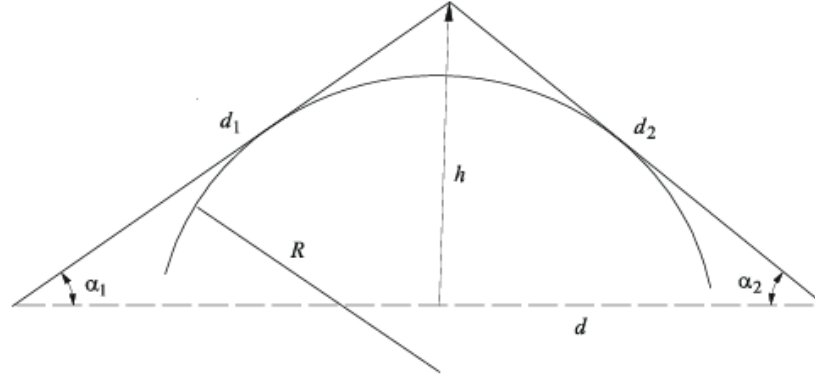


Ilustración 4-5. Geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R

Se observa que las distancias d_1 y d_2 y la altura h por encima de la línea de base se miden desde el vértice formado por la intersección de la proyección de los tres rayos sobre el obstáculo.

La pérdida por difracción de esta geometría se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A = L_D(v) + T(m, n) \quad dB \quad (11)$$

Donde $T(m, n)$ es la atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo y se modelan como sigue:

$$T(m, n) = 7.2m^{1/2} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad dB \quad \text{para } mn \leq 4 \quad (12)$$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log(mn) + 7.2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad dB \quad \text{para } mn > 4 \quad (13)$$

Las expresiones para el cálculo completo pueden encontrarse en la recomendación ITU-R 526-10 [10].

4.4. Modelo de Okumura-Hata

Este es uno de los modelos más utilizados para el cálculo de la pérdida de propagación en áreas urbanas, este método se basa en un conjunto de medidas efectuadas en Japón que proporcionaron una serie de curvas de intensidad de campo parametrizadas para distintas alturas de las antenas de las estaciones base, y con una altura de la antena del terminal móvil de 1.5 metros. Estas medidas se efectuaron en las bandas de 150, 450 y 900 MHz, es decir comprende la banda de VHF y UHF, y con una potencia radiada aparente (PRA) de 1 kW.

A continuación, se muestran las expresiones numéricas con las distintas correcciones:

$$L_b(dB) = 69.55 + 26.26 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log d \quad (14)$$

Donde:

- f : Frecuencia del transmisor en MHz válida para $150 < f \text{ (MHz)} < 1500 \text{ MHz}$.
- h_t : Altura efectiva de la antena transmisora en metros. Válida para $30 < h_t < 200 \text{ m}$.
- h_m : Altura efectiva de la antena receptora en metros. Válida para $1 < h_m < 10 \text{ m}$.
- d : Distancia en kilómetros. Válida para $1 < d < 20 \text{ km}$.
- $a(h_m)$: Corrección por altura receptora. Para $h_m = 1.5 \text{ m}$, $a(h_m = 1.5 \text{ m}) = 0$

El valor de $a(h_m)$ para $a(h_m) \neq 1.5$ depende del tipo de ciudad:

Para medio suburbano, se aplica la fórmula:

$$L_{bs}(dB) = L_b - 2 [\log(f/28)]^2 - 5.4 \quad (15)$$

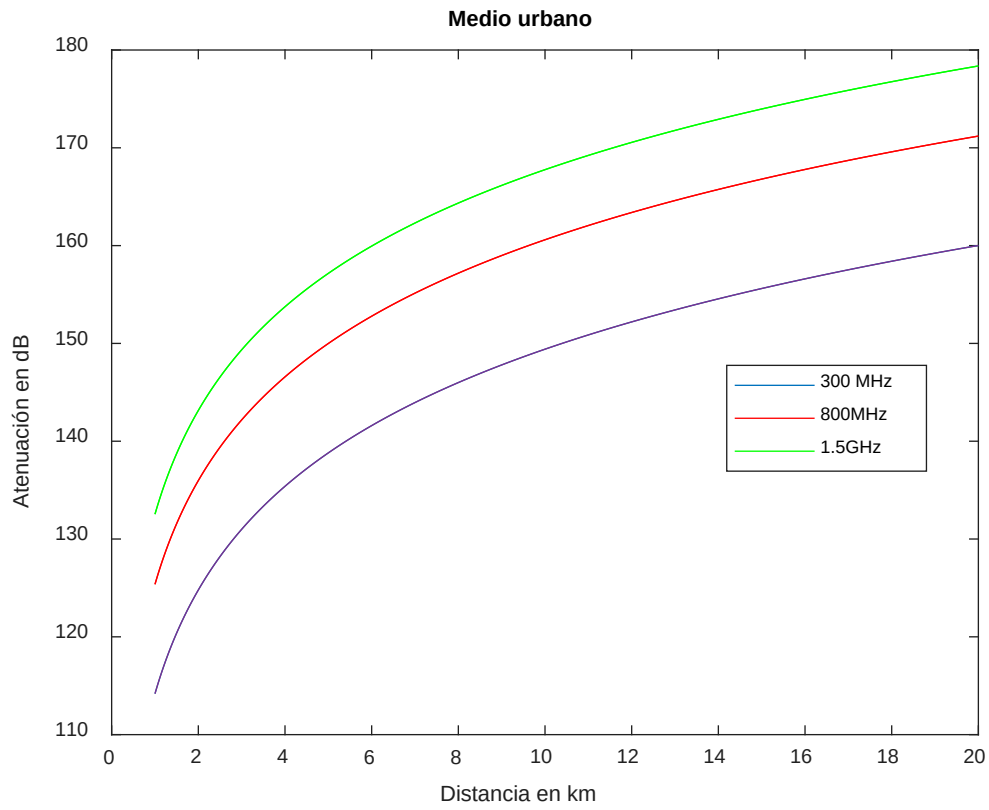


Ilustración 4-6. Pérdidas de propagación para una altura del transmisor de 30 metros y una altura del receptor de 1.5 metros con diferentes frecuencias

Y para zona rural:

$$L_{br}(\text{dB}) = L_b - 4.78 (\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (16)$$

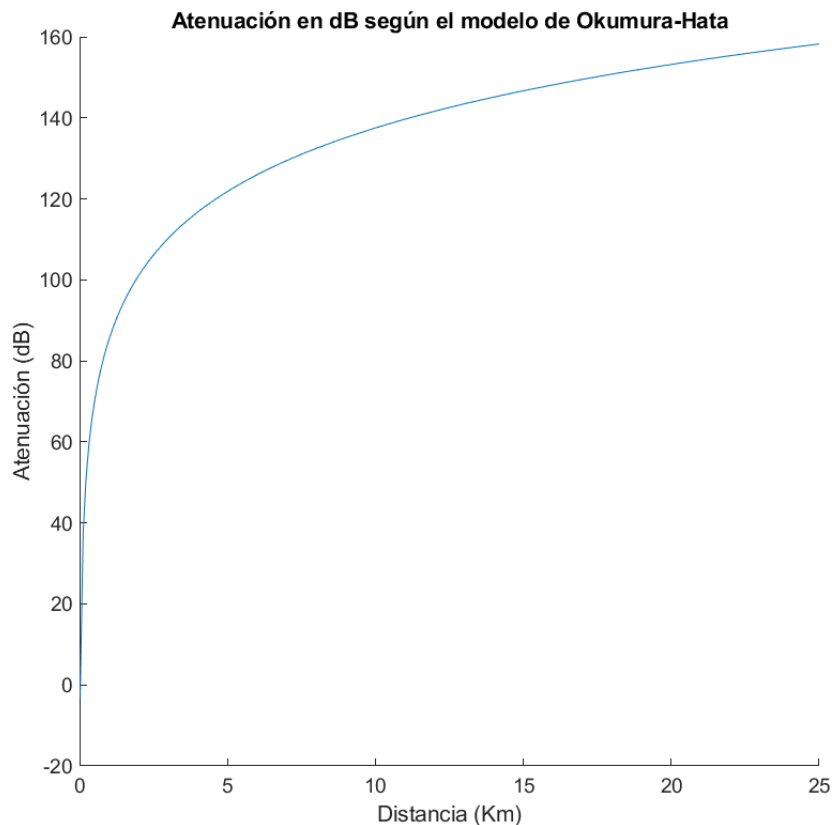


Ilustración 4-7. Gráfica de atenuación del método de Okumura-Hata en zona rural

4.1. Método COST-231-Hata

El método COST-231-HATA incluye modificaciones al método Okumura-Hata necesarias para incluir el rango de frecuencia de 1500-2000 MHz utilizado en sistemas 3G de las comunicaciones móviles. Es un modelo semiempírico de predicción de pérdida de trayectoria que combina el modelo de Walfisch-Bertoni e Ikegami. Recomendado para macroceldas en escenarios urbanos y suburbanos con buenos resultados de pérdida de trayectoria para antenas de transmisión por encima de la altura promedio del tejado. Sin embargo, a medida que la altura del transmisor se acerca a la altura del techo, el error de predicción aumenta significativamente, lo que da como resultado un rendimiento muy bajo si el transmisor está por debajo de este nivel.

En comparación con modelos anteriores como Okumura-Hata, el modelo COST 231 agrega varios parámetros adicionales al proceso de cálculo además del rango de frecuencia ampliado (800 - 2000 MHz) que se puede utilizar. El modelo realiza cálculos de atenuación más detallados basados en cuatro medidas adicionales:

- Altura de las edificaciones.
- Ancho de las calles.

- Separación entre edificios.
- Orientación de la calle en relación a la dirección de propagación.

La pérdida de propagación básica L_b se calcula como la suma de tres componentes: la pérdida de propagación en el espacio libre L_0 ; pérdida por difracción de la calle del tejado, L_{rts} , que se produce en la calle donde se encuentra el receptor, debido a la difracción de los tejados adyacentes; y pérdida de difracción multipantalla, producida por múltiples difracciones, L_{msd} . El modelo también distingue entre casos LOS y NLOS [12].

En general, las restricciones son las siguientes:

- Frecuencia (f): 800 – 2000 MHz
- Altura del transmisor (h_b): 4 – 50 m
- Altura del receptor (h_r): 1 – 3 m
- Distancia entre transmisor y receptor (d): 0.02 – 50 km
- Altura relativa del transmisor respecto a los edificios (Δh_b) > 0 m

A continuación, se muestran las ecuaciones del método:

- Para escenarios LOS, la pérdida de propagación se considera como pérdida en espacio libre, $L_b = L_{0(LOS)}$ donde:

$$L_{0(LOS)} = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \quad (17)$$

- El trayecto NLOS típico, se representa en las siguientes ilustraciones:

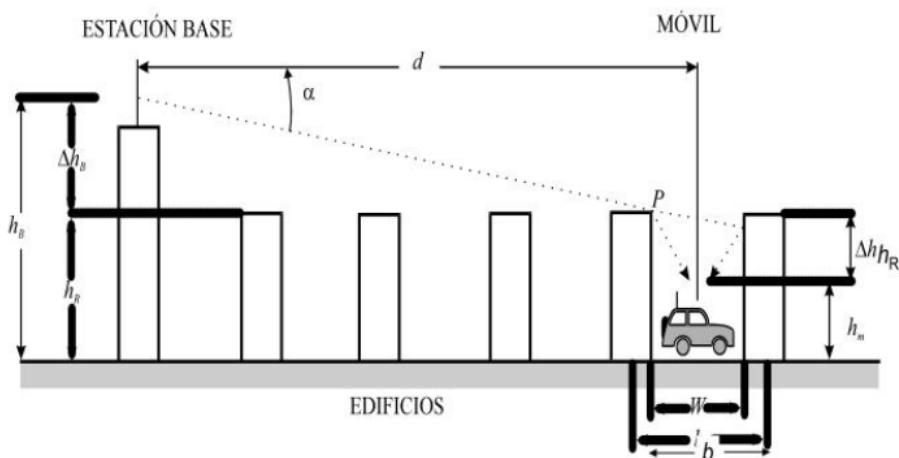


Ilustración 4-8. Escenario de propagación NLOS usado en el modelo COST 231. Vista perfil.

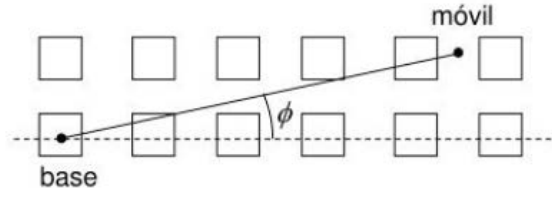


Ilustración 4-9. Escenario de propagación NLOS usado en el modelo COST 231. Vista superior.

La pérdida básica de propagación para el escenario NLOS se modela como:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0, & L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

La pérdida de propagación en espacio libre se obtiene según la expresión:

$$L_0 = 32.4 - 10 \log(d) + 20 \log(f) \quad (19)$$

El término L_{rts} tiene en cuenta la anchura de la calle y su orientación con respecto a la dirección de propagación del rayo y viene dada por:

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (20)$$

Donde L_{ori} es un factor de corrección que considera las pérdidas debido a la orientación de la calle:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\phi, & 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35), & 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\phi - 55), & 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (21)$$

La pérdida por difracción multipantalla, L_{msd} , se calcula en función de la frecuencia, la distancia entre móvil y estación base, también de la altura de ésta y la de los edificios. Se calcula mediante la expresión:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (22)$$

Donde L_{bsh} , k_a , k_d y k_f vienen dadas por:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_b), & h_b > h_r \\ 0, & h_b \leq h_r \end{cases} \quad (23)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_b > h_r \\ 54 - 0.8 \Delta h_b, & h_b \leq h_r \text{ y } d \geq 0.5 \text{ km} \\ 54 - 0.8 \Delta h_b \frac{d}{0.5}, & h_b \leq h_r \text{ y } d < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (24)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_b > h_r \\ 18 - 15 \Delta h_b / h_r, & h_b \leq h_r \end{cases} \quad (25)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & \text{para ciudades de tamaño medio y entornos} \\ & \text{suburbanos con densidad moderada de vegetación} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (26)$$

El término k_a (24) presenta el aumento de la pérdida en el trayecto para el caso de estaciones bases situadas por debajo de la altura media de los edificios. Los términos k_d (25) y k_f (26) manejan la dependencia de L_{msd} (22) según la distancia y la frecuencia.

Los parámetros definidos en el modelo COST 231 son los siguientes:

- h_r : altura media de los edificios (m)
- w : anchura de la calle (m)
- b : separación media entre edificios (m)
- ϕ : ángulo formado por la dirección de propagación y el eje la calle (grados)
- h_b : altura de la antena de la estación base (m)

- h_m : altura de la antena del dispositivo móvil (m)
- $\Delta h_m = h_r - h_m$ (m)
- $\Delta h_b = h_b - h_r$ (m)
- l : distancia total entre el primer y el último edificio del trayecto (m)
- d : distancia entre estación base y dispositivo móvil (km)
- f : frecuencia (MHz)

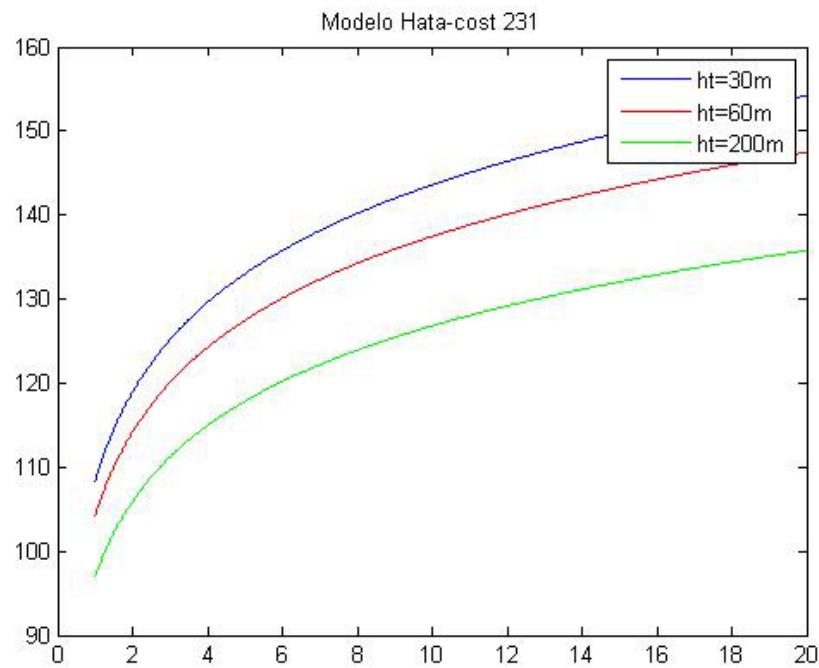


Ilustración 4-10. Pérdidas de propagación para una altura del transmisor de 30, 60 y 200 metros

4.2. Modelo de la tierra plana

Este modelo de propagación es adecuado para distancias cortas donde se puede ignorar la curvatura del suelo y se puede considerar que terreno es plano.

En la siguiente ilustración se representa los parámetros considerados en este modelo

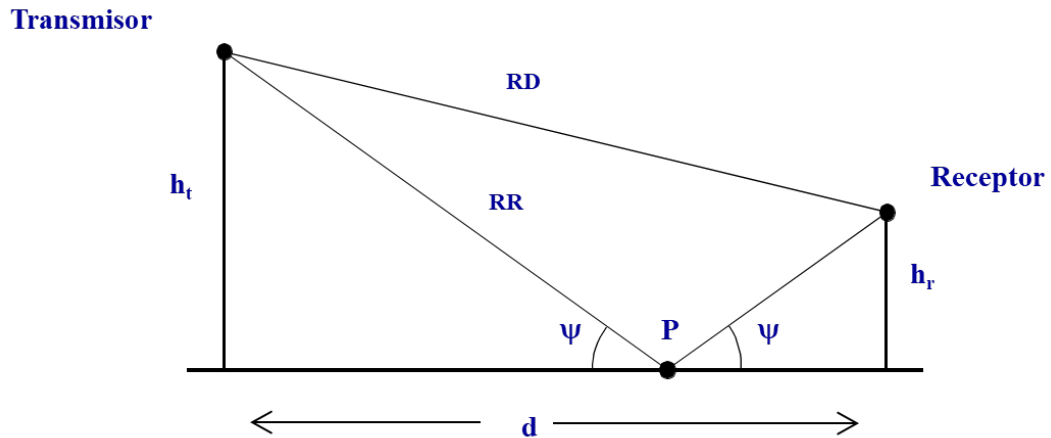


Ilustración 4-11. Esquema de parámetros en la transmisión por tierra plana

La expresión que permite calcular las pérdidas de propagación usando este modelo viene dada por:

$$L(dB) = 120 - 20 \log h_t(m)h_r(m) + 40 \log d(km) \quad (27)$$

De la ecuación (27) podemos obtener diferentes propiedades, la primera es que es un método completamente independiente de la frecuencia utilizada, la siguiente propiedad es que es un patrón que depende de la altura de la antena, y la atenuación aumenta con la distancia desde la antena. La mayor desventaja de este método es que, además de ser independiente de la frecuencia de la señal, también lo es del entorno en el que se emiten las ondas de radio.

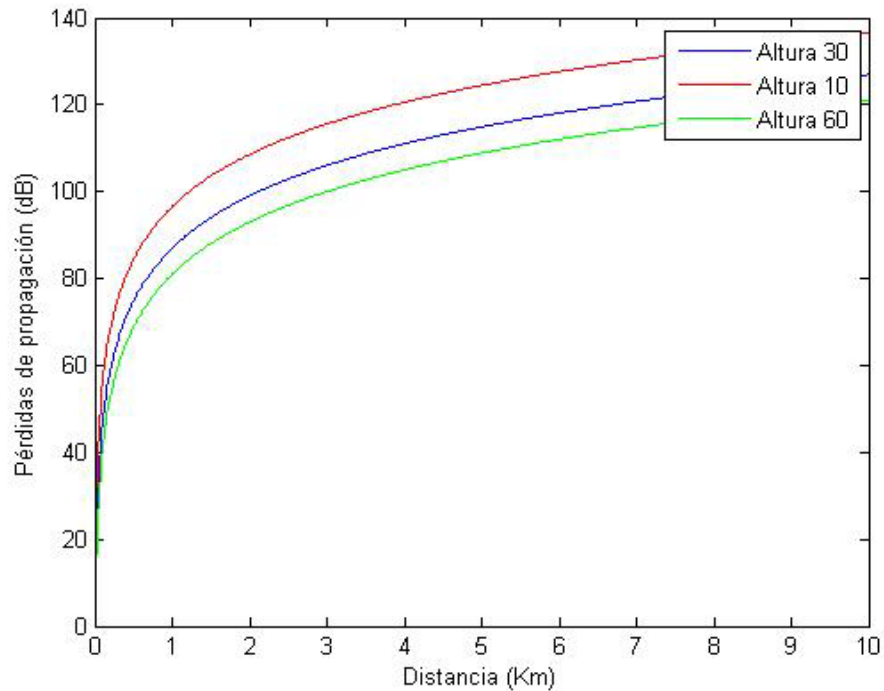


Ilustración 4-12. Pérdidas de propagación para una altura del transmisor de 10, 30 y 60 metros

4.3. Método longley-rice

El modelo de Longley-Rice, es un modelo matemático desarrollado por A. G. Longley and P. L. Rice, en 1968 también conocido como "modelo de terreno irregular ITS". Este modelo fue diseñado para resolver una variedad de problemas. Su aplicación es flexible y se puede utilizar como modelo para predecir cobertura de área o radioenlaces.

Los parámetros necesarios son los siguientes:

- Frecuencia: 20 MHz a 20 GHz.
- Distancia: 1 km a 2000 km
- Alturas de antena: 0.5 m a 3000 m
- Polarización: Vertical o horizontal.
- Irregularidad del terreno Δh , que es el margen total de las alturas una vez que se han retirado el 10% más alto y el 10% más bajo.
- Constante dieléctrica y conductividad del suelo.
- Refracción en superficie
- Clima.

Este modelo primero calcula una atenuación de referencia, que es el valor promedio de atenuación relativa al espacio libre. Esta atenuación de referencia se entiende como una función continua con la distancia. Se define en tres partes denominadas regiones de espacio libre, difracción y dispersión. La parte "Espacio libre" tiene un nombre parcialmente incorrecto; definida como un área donde la curvatura aproximada de la Tierra no bloquea las señales de radio directas, pero las montañas y otros obstáculos sí pueden. En otras palabras, el área se extiende hasta el horizonte definido por la curvatura de la Tierra, que puede estar más lejos que el horizonte real. En este rango, la atenuación de referencia se calcula como una combinación de funciones lineales y logarítmicas con la distancia; posteriormente, en la región de difracción, hay un aumento lineal en la atenuación, seguido de un aumento lineal mucho más lento en la región de dispersión. Otros parámetros distintos a la distancia se utilizan en los cálculos para determinar dónde están las tres regiones y qué valores tienen los distintos coeficientes.

Partiendo de la atenuación media se restan otros márgenes para tener en cuenta la variabilidad en el tiempo, con las localizaciones y con las situaciones. La variabilidad temporal refleja los cambios en el nivel de la señal a lo largo del tiempo debido a las diferentes condiciones de propagación, que están significativamente relacionadas con los cambios atmosféricos. Los cambios de ubicación reflejan los cambios que ocurren cuando el terminal de radio se mueve entre ubicaciones. Finalmente, la variabilidad situacional modela las diferencias entre enlaces ubicados en regiones similares.

El método Longley-Rice funciona en dos modos: el primero es cuando los parámetros de propagación se obtienen una descripción detallada del perfil del terreno, se denomina modo de predicción punto a punto. La segunda es cuando no se cuenta con perfiles de terreno, este método tiene una técnica de estimación de parámetros específicos, este método se denomina pronóstico regional.

Ha habido muchas mejoras en este enfoque, la más reciente es la introducción de un nuevo factor llamado factor urbano (UF), que tiene en cuenta la atenuación causada por los obstáculos que aparecen antes de llegar a la antena receptora.

Para predecir la potencia de la señal dentro de la línea de vista (LOS) se utiliza principalmente el modelo de reflexión terrestre de 2 rayos.



Ilustración 4-13. Esquema de reflexión utilizando dos rayos.

Para predecir la cobertura sin línea de vista (NLOS) calcula la difracción por obstáculos aislados utilizando el modelo de “filo de cuchillo” de Fresnel-Kirchoff.



Ilustración 4-14. Esquema de cálculo del modelo de Fresnel

4.4. Método ray-tracing

El trazado de rayos es un modelo determinista para predecir la respuesta del canal de radio. Se basa en la aplicación de la Óptica Geométrica (GO) y la Teoría Unificada de la Difracción (UTD). A medida que aumenta la frecuencia, la primera zona de Fresnel, donde se concentra la mayor parte de la energía, tiende a estrecharse, lo que puede modelarse como un rayo.

De esta forma, la propagación de las ondas electromagnéticas se puede rastrear de la misma forma que las trayectorias de los rayos de luz, simplificando mucho el análisis. Los principales mecanismos de propagación son la reflexión, la difracción y la difusión.

Los reflejos ocurren cuando las ondas electromagnéticas golpean un objeto más grande que una longitud de onda.

La difracción ocurre cuando el rayo es bloqueado por una superficie con un obstáculo abrupto (ángulo formado por dos paredes). En este caso, las ondas secundarias se generan desde este borde utilizando el principio de Huygens.

Finalmente, la difusión ocurre cuando una onda viaja a través de un medio con objetos del mismo tamaño que la longitud de onda, o cuando la cantidad de objetos por unidad de volumen es alta.

La dispersión en las comunicaciones móviles tiene un valor muy bajo en comparación con otras contribuciones y generalmente no se considera en el ray-tracing.

Asumamos que un dipolo vertical está situado a una distancia h sobre un conductor perfecto, plano e infinito, como se muestra en la siguiente ilustración:

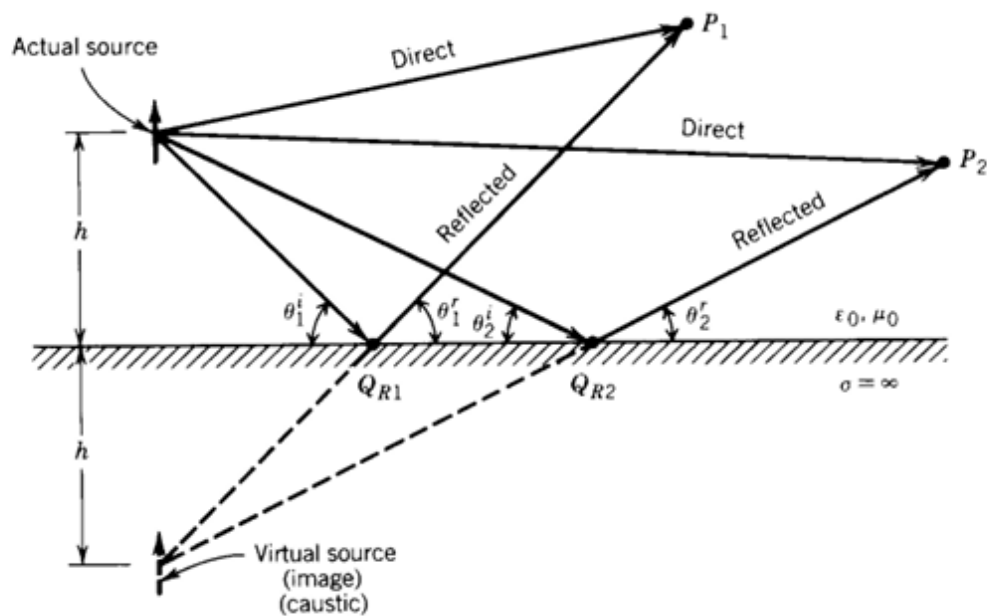


Ilustración 4-15. Dipolo vertical y su imagen para determinar la reflexión sobre un conductor plano de extensión infinita

Asumiendo que no hay acoplamiento mutuo y que la energía es radiada en todas direcciones, para el receptor P_1 habrá un rayo directo y además uno reflejado procedente del punto Q_{R1} en la interfaz creada por el conductor y que obedece a la ley de la reflexión que establece que $\theta_{1^r} = \theta_{1^i}$. Por lo tanto, la energía en un medio homogéneo describe un camino recto, que describe el camino más corto. La onda, que luego alcanza el punto de observación P_1 por reflexión, tiene origen en la fuente a una distancia de imagen h por debajo del conductor. Si miramos el emisor en P_2 , el punto de reflexión es Q_{R2} , pero la imagen es la misma que antes. Esta conclusión se aplica a cualquier otro punto de la interfaz del conductor [13].

5. Trabajo realizado

Para que nuestro software pueda estimar la cobertura de radio, además de la información ambiental, se requieren otros datos que el usuario debe ingresar previamente, tales como: potencia de transmisión o ganancias de transmisor y receptor.

Una vez que nuestra herramienta ha adquirido los datos requeridos, el usuario puede elegir entre varias funciones, que explicaremos brevemente a continuación y desarrollaremos en los siguientes capítulos:

- **Graficar diferentes modelos de propagación.** Muestra un gráfico de atenuación según la distancia dependiendo del modelo de propagación que se elija.
- **Ver antena.** Muestra la antena elegida.
- **Ver intensidad del campo eléctrico.** Muestra la intensidad del campo eléctrico sobre tierra plana en dB μ V/m.
- **Calcular cobertura (entorno rural).** Muestra el rango de cobertura radioeléctrica según el modelo de propagación elegido.
- **Cálculo de cobertura (entorno urbano).** Muestra el rango de cobertura teniendo en cuenta reflexiones y edificios de alrededor.
- **Cálculo con raytrace (trazado de rayos).** Muestra según la reflexión como llega la señal a un receptor.

En la siguiente imagen se puede ver la interfaz principal de nuestra herramienta de cálculo de cobertura.

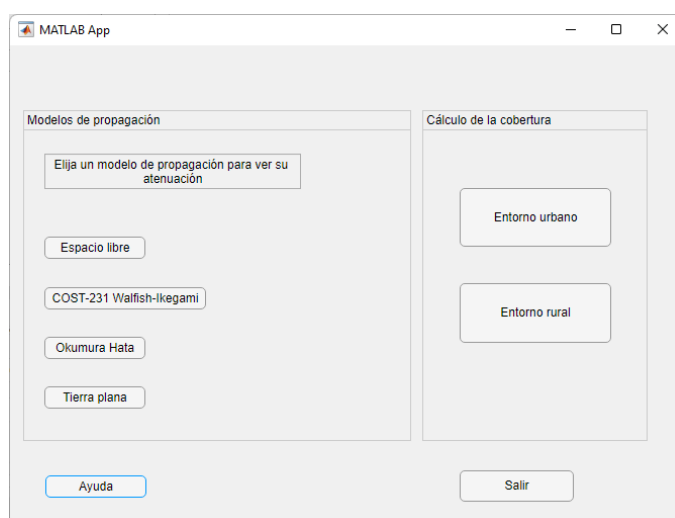


Ilustración 5-1. Panel principal de la herramienta

Para desarrollar la herramienta software para el cálculo de cobertura radioeléctrica se ha utilizado MATLAB ya que cuenta con diversas toolbox que nos pueden ayudar a la realización de la herramienta, además es el software que se ha utilizado con más frecuencia a lo largo del grado, por lo que tanto alumnos como profesores están familiarizados con este lenguaje.

MATLAB es una plataforma de computación y programación numérica utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y construir modelos. Combina un entorno de escritorio optimizado para procesos iterativos de análisis y diseño con un lenguaje de programación que expresa directamente matrices y arrays. Las aplicaciones de MATLAB le permiten ver cómo funcionan diferentes algoritmos con sus datos [14].

A continuación, explico las toolbox que he utilizado para el desarrollo de la herramienta, así como el funcionamiento de la misma.

5.1 Mapping toolbox

Mapping Toolbox proporciona un amplio conjunto de funciones e interfaces gráficas de usuario (GUI) para crear vistas de mapas y analizar y manipular datos geoespaciales en el entorno MATLAB. Puede crear mapas que combinen diferentes tipos de datos de múltiples fuentes y mostrarlos en las relaciones espaciales correctas. El conjunto de herramientas admite técnicas de análisis espacial, como cálculos de línea de visión para datos de terreno y cálculos geográficos que tienen en cuenta la curvatura de la superficie terrestre. Su biblioteca de proyección de mapas y herramientas de georreferenciación le brindan un control preciso sobre los sistemas de coordenadas proyectadas y no proyectadas.

La mayoría de las funciones de Mapping Toolbox están escritas en el lenguaje abierto MATLAB. Esto significa que puede explorar algoritmos, modificarlos para crear funciones personalizadas y automatizar tareas comunes. La toolbox también incluye conjuntos de datos, ejemplos y demostraciones que ilustran conceptos clave, proporcionando un punto de partida para proyectos de análisis de datos geoespaciales [15].

Resumiendo, la toolbox proporciona funcionalidad en las siguientes áreas:

- Importación y exportación de archivos de datos geoespaciales
- Datos de mapas vectoriales y estructuras de datos geográficos
- Imágenes georreferenciadas y matrices de datos

- Selección de capa de servicio de mapas web y recuperación de mapas
- Proyección de mapas y coordenadas
- Visualización e interacción del mapa
- Cálculo geográfico de datos vectoriales y raster
- Visor de mapas y otras GUI

5.1.1. Funciones utilizadas

- **Siteviewer.** Permite mostrar cualquier sitio del globo terráqueo. De forma predeterminada, el comando siteviewer muestra una vista 3D de la tierra.

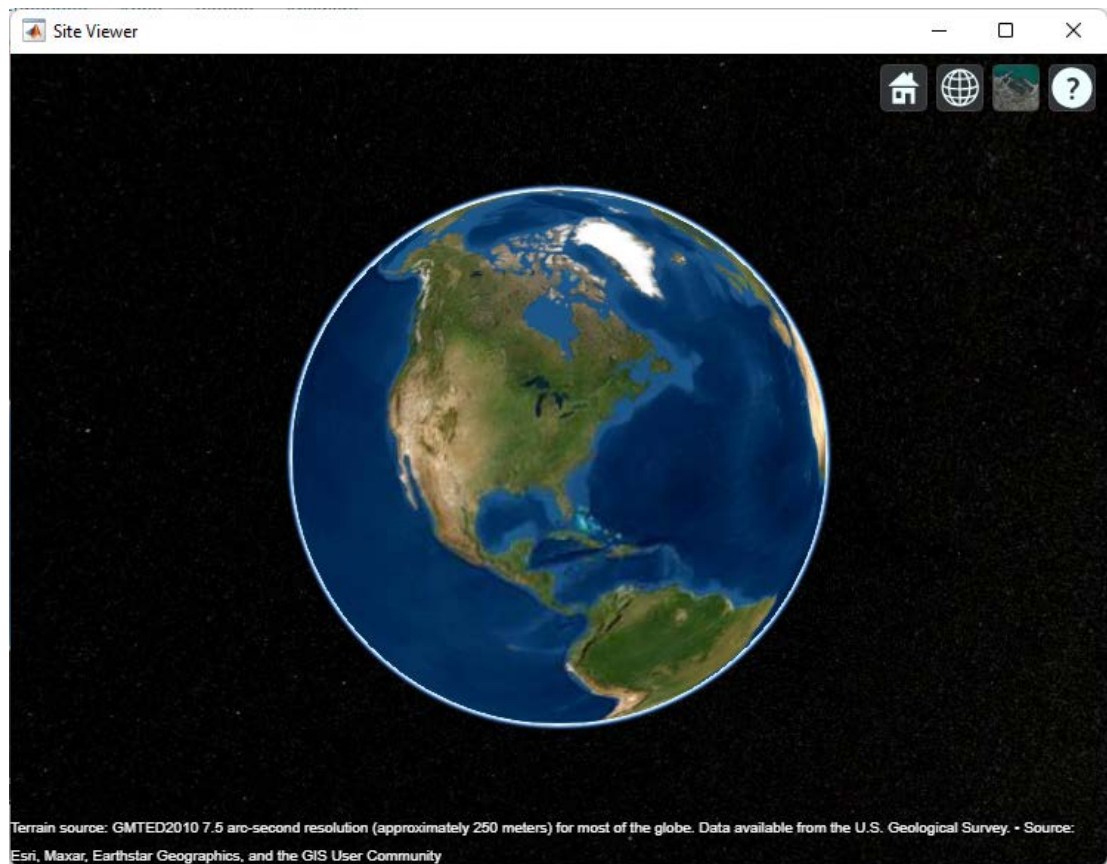


Ilustración 5-2. Mapa por defecto de siteviewer

Esta interfaz permite elegir el tipo de mapa, hacer zoom y elegir que te diga las coordenadas y elevación del punto que desees.

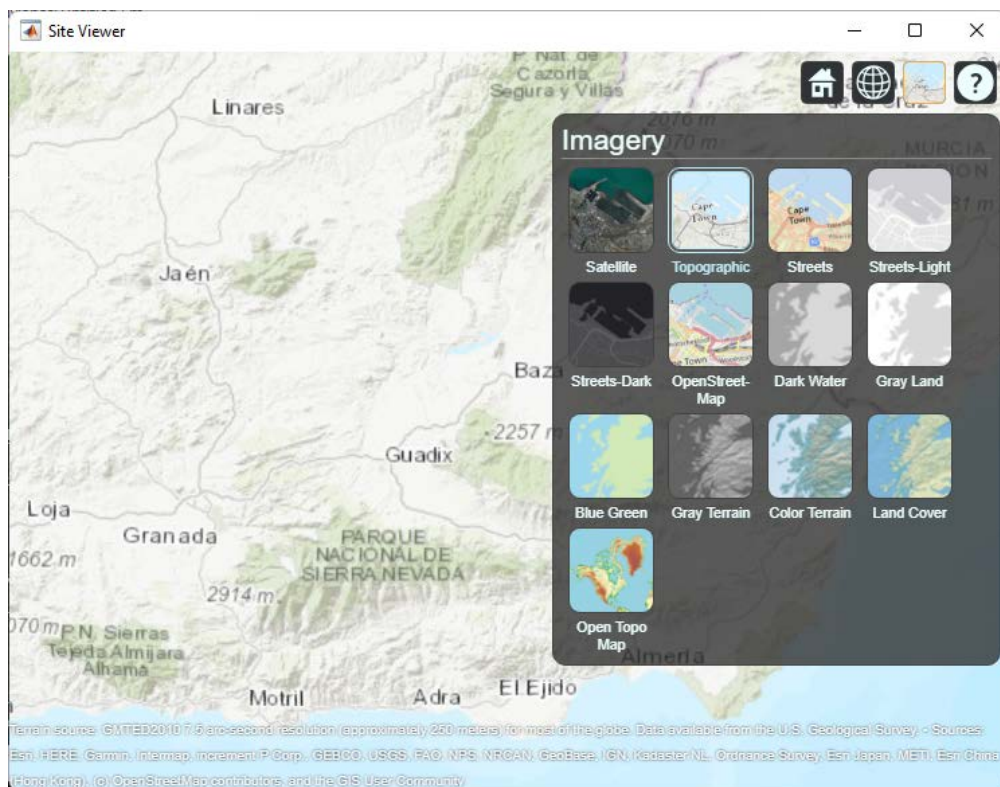


Ilustración 5-3. Diferentes opciones de mapas que ofrece Site Viewer

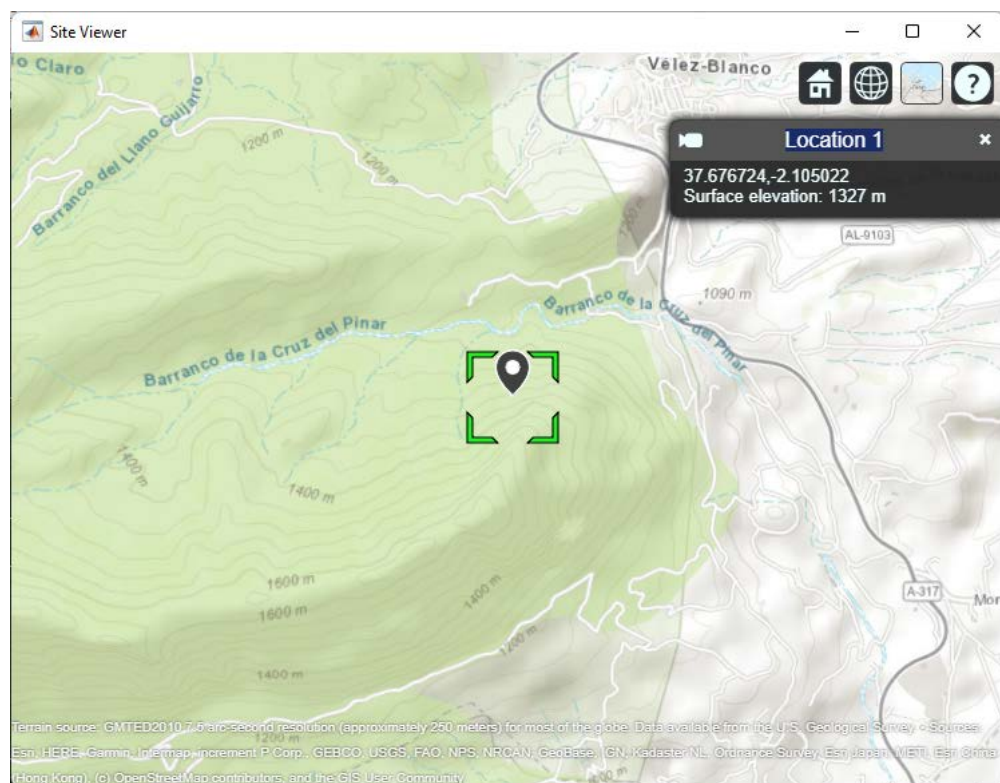


Ilustración 5-4. Latitud, longitud y altura del terreno en un punto determinado

Esta función también permite ver mapas con edificaciones previamente descargados de la web <https://www.openstreetmap.org>.


```
siteviewer("Buildings", "map_sevilla.osm", "Basemap", "openstreetmap");
```



Ilustración 5-5. Mapa cargado con las edificaciones de una zona de Sevilla

El archivo `.osm` se descarga de <https://www.openstreetmap.org>, que proporciona acceso a datos cartográficos de todo el mundo. Los datos tienen licencia de Open Data Commons Open Database License (ODbL).

5.2 Antena toolbox

Antenna Toolbox proporciona funciones y aplicaciones para diseñar, analizar y visualizar elementos y conjuntos de antenas. Puede diseñar antenas independientes y crear conjuntos de antenas utilizando elementos predefinidos con geometría paramétrica, estructuras planas arbitrarias o estructuras 3D personalizadas descritas en archivos STL.

Utiliza solucionadores electromagnéticos, incluido el método de momentos (MoM), para calcular la impedancia, la distribución de corriente, la eficiencia y los patrones de radiación de campo cercano y lejano. Permite usar métodos manuales o métodos de optimización para mejorar el diseño de las antenas. La geometría de la antena y los resultados del análisis se pueden ver en formato 2D y 3D. Esta toolbox

permite la integración de modelos de arrays de antenas en sistemas inalámbricos para simular algoritmos de formación y dirección de haces. Los resultados del análisis de impedancia se pueden utilizar para diseñar una red adecuada para la integración con RF. Admite diseñar antenas en plataformas grandes, como vehículos o aeronaves, y analizar el rendimiento de la antena. Puede importar archivos STL y Gerber para analizar estructuras existentes o exportarlos para compartir o fabricar sus propios diseños. La función coverage permite visualizar la cobertura de la antena en un mapa topográfico 3D utilizando varios modelos de propagación, incluido el ray traicing [16].

5.2.1. Funciones utilizadas

Show. Este comando nos permite mostrar cualquier objeto, en nuestro caso lo utilizamos para ver la antena que diseñamos.

```
ant =Helix;
show(ant)
```

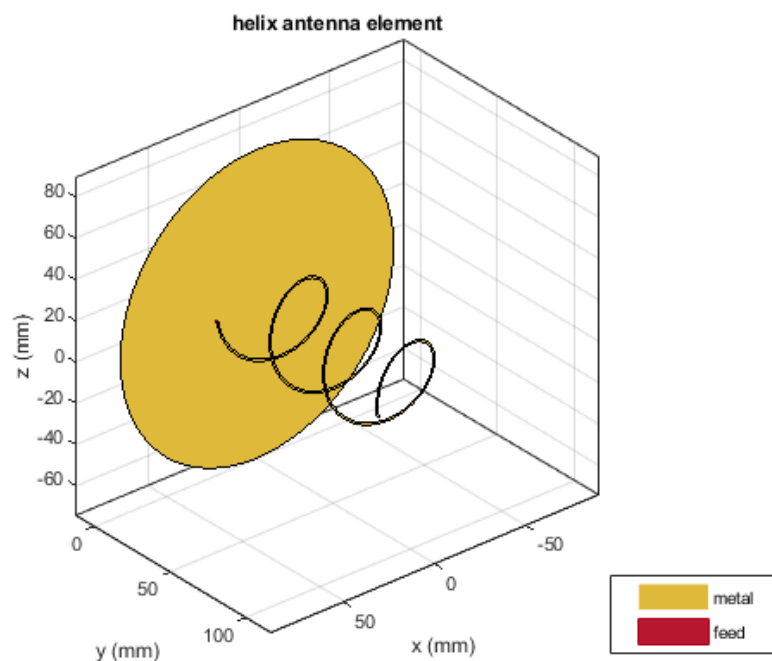


Ilustración 5-6. Visualización de una antena tipo hélice

Info. Muestra información sobre una antena o un array de antenas.

```
f0 = 2.4e9;
ant =dipoleBlade;
Z=impedance(ant,f0)
info(ant)
ans = struct with fields:
    IsSolved: "true"
```

```

    IsMeshed: "true"
    MeshingMode: "auto"
    HasSubstrate: "false"
    HasLoad: "false"
    PortFrequency: 2.4000e+09
    FieldFrequency: []
    MemoryEstimate: "770 MB"

```

Impedance. Calcula y muestra la impedancia en un rango de frecuencias.

```

f0 = 900e6;
ant =dipoleBlade;
impedance(ant,700e6:1e6:1e9)

```

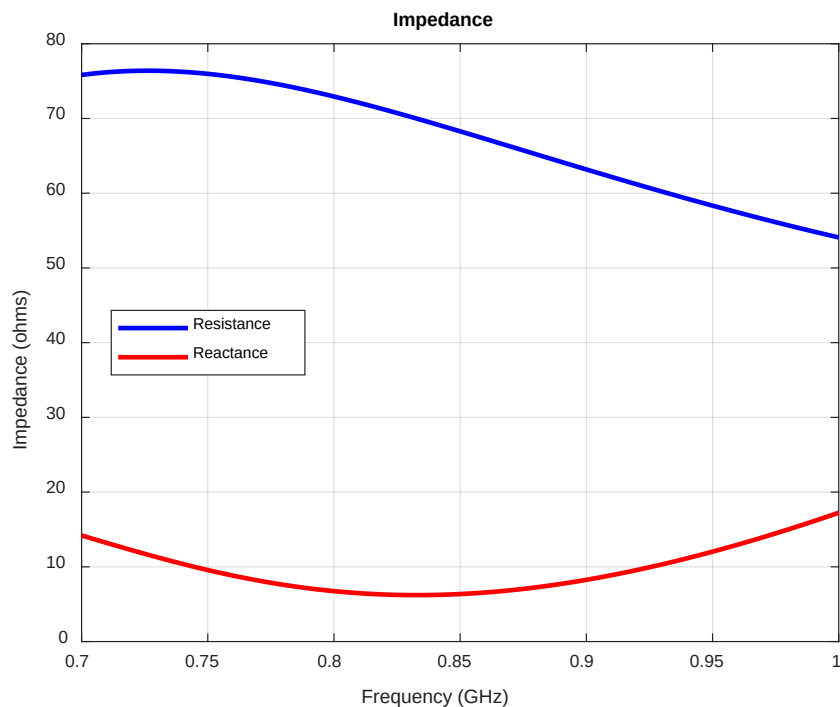


Ilustración 5-7. Impedancia de una antena dipoleBlade

EHfields. Muestra el valor absoluto del campo eléctrico y magnético junto con los correspondientes ángulos complejos. Los campos se calculan en puntos de la superficie de una esfera cuyo radio es el doble del radio de una esfera que encierra completamente la estructura de la antena o del conjunto.

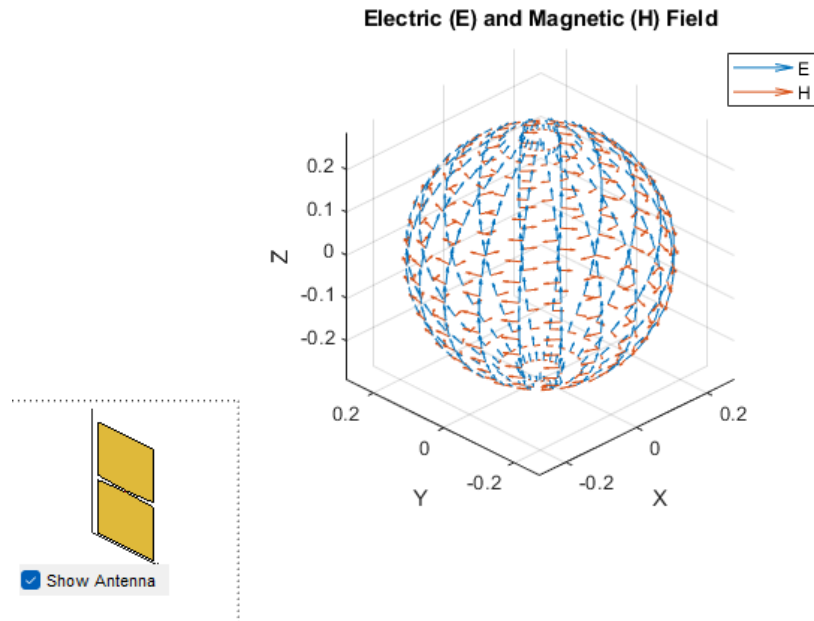


Ilustración 5-8. Campo eléctrico y magnético de una antena

Contourf. Crea un gráfico de contorno relleno que contiene las isolíneas de la matriz Z, donde Z contiene valores de altura en el plano x-y. MATLAB selecciona automáticamente las líneas de contorno a mostrar. Los índices de columna y fila de Z son las coordenadas x e y en el plano, respectivamente.

Combinando este comando y el comando EHfields podemos obtener la intensidad de campo en un gráfico 2D.

```
f0 = 2.4e9;
ant =dipoleBlade;
f = figure;
show(ant)
view(-220,30)
%%
%Calculamos el campo electrico
z = -15;
x = (-15:1:15)*1e3;
y = (-5:1:15)*1e+03;

[X,Y] = meshgrid(x,y);
numpoints = length(x)*length(y);
points = [X(:)'; Y(:)'; z*ones(1,numel(X))];

E = EHfields(ant,f0,points); % Units: V/m

Emag = zeros(1,numpoints);
for m=1:numpoints
    Emag(m) = norm(E(:,m)/sqrt(2));
end
Emag = 20*log10(reshape(Emag,length(y),length(x))); % Units:
dBV/m
Emag = Emag + 120; % Units: dBuV/m
```

```

d_min = min(Emag(:));
d_max = max(Emag(:));
del = (d_max-d_min)/12;
d_vec = round(d_min:del:d_max);
figure
contourf(X*1e-3,Y*1e-3,Emag,d_vec,'showtext','on')
title('Intensidad del campo (dB\muV/m) sobre tierra plana (1V
tx)')
xlabel('lateral (km)')
ylabel('alcance (km)')
c = colorbar;
set(get(c,'title'),'string','dB\muV/m')

```

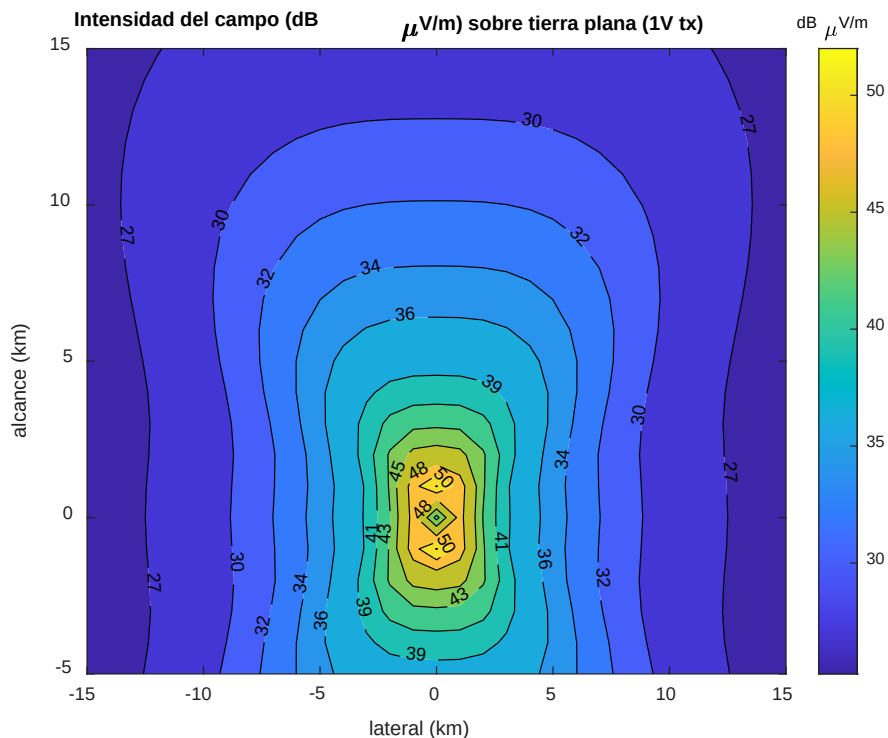


Ilustración 5-9. Intensidad del campo sobre tierra plana

Txsite. Crea un sitio de transmisión de radiofrecuencia, a esta función se le pueden incluir las siguientes propiedades:

- Nombre: nombre del transmisor.
- Sistema de coordenadas: pueden ser geográficas o cartesianas
- Latitud
- Longitud
- Antena: Antena o array de antenas que tiene el transmisor
- Altura de la antena en metros
- Orientación de la antena en grados
- Frecuencia en Hz.
- Potencia de transmisión en vatios.

```
tx = txsite('Name', 'Transmisor', ...
           'Latitude', 37.674657, ...
           'Longitude', -2.103458, ...
           'Antenna', dipoleBlade, ...
           'AntennaHeight', 10, ...
           'AntennaAngle', 180, ...
           'TransmitterFrequency', 2.4e9);
show(tx)
```

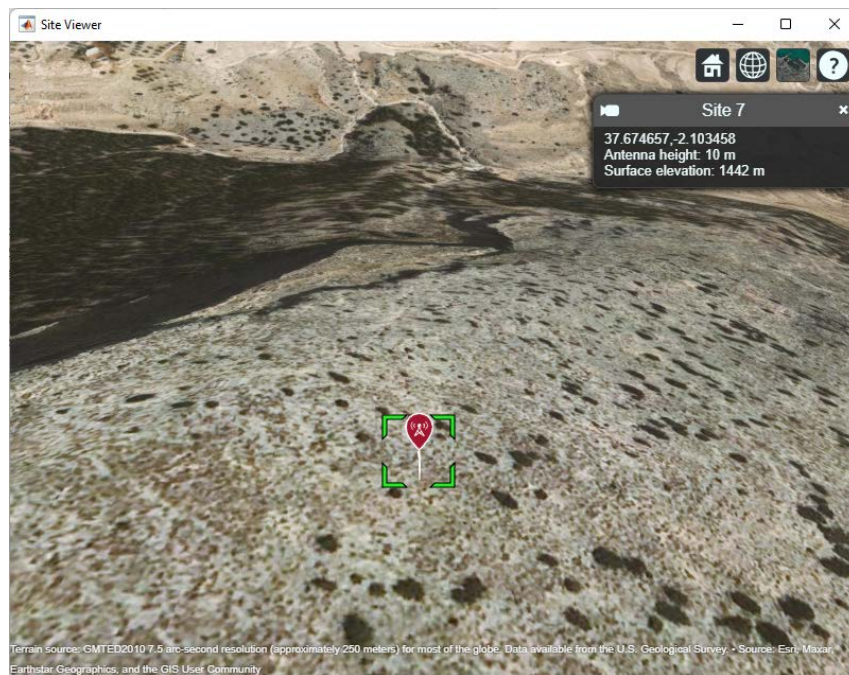


Ilustración 5-10. Localización del transmisor creado

feedCurrent. Calcula y devuelve la corriente compleja en amperios para una antena o un objeto de matriz a una frecuencia especificada. La corriente de alimentación cuando se multiplica por la impedancia de la antena da la tensión a través de la antena.

```
f0 = 2.4e9;
ant =dipoleBlade;
feedCurrent(ant,f0)

ans =

    0.0103 + 0.0017i
```

propagationModel. Crea un modelo de propagación de radiofrecuencia para un modelo especificado.

Modelos de propagación especificados:

Modelo	Descripción	Rango de frecuencias
freespace	Modelo de propagación ideal con línea de visión claro entre emisor y receptor	-
Rain	Pérdida por trayectoria en la lluvia	1 GHz – 1000 GHz
longley-rice	Modelo de propagación longley-rice	20 MHz – 20 GHz
Ray-traicing-image	Admite el cálculo de trayectorias de propagación para hasta dos reflexiones de trayectoria. Calcula un número exacto de trayectorias de propagación con una precisión geométrica exacta.	100 MHz – 100 GHz

Tabla 2. Modelos de propagación de la herramienta

Para el modelo de propagación ray-traicing-image se pueden especificar el máximo número de reflexiones, el material de los edificios y material de la Tierra.

coverage. Muestra la cobertura en un mapa basado en un modelo de propagación, a esta función se le pueden incluir las siguientes propiedades o funciones:

- Txsite. Nombre del transmisor creado anteriormente.
- propagationModel. Modelo de propagación creado anteriormente.
- Type: puede ser efield que muestra el campo electromagnético definido en dBμV/m o power que muestra el campo electromagnético definido en dBm.
- SignalStrengths. Intensidad de la señal a mostrar en el mapa de cobertura.
- Colormap. Color del relleno del mapa de cobertura.
- ColorLimits. Límites de color para el mapa de colores, se especifica como un vector tipo [min max]. Los valores por defecto son [-120 -5] para “power” y [20 135] si es tipo “efield”.
- MaxRange. Máximo rango para el cálculo de cobertura.

- ReceiverGain. Ganancia de la antena receptora expresada en dB.
- ReceiverAntennaHeight. Altura de la antena receptora.

```
viewer.Basemap = 'topographic';
sigStrengths = [24 29 36];
coverage(tx, ...
    'PropagationModel','freespace', ...
    'Type','efield', ...
    'Colormap','parula',...
    'SignalStrengths',sigStrengths,...
    'ColorLimits',[24 36])
```

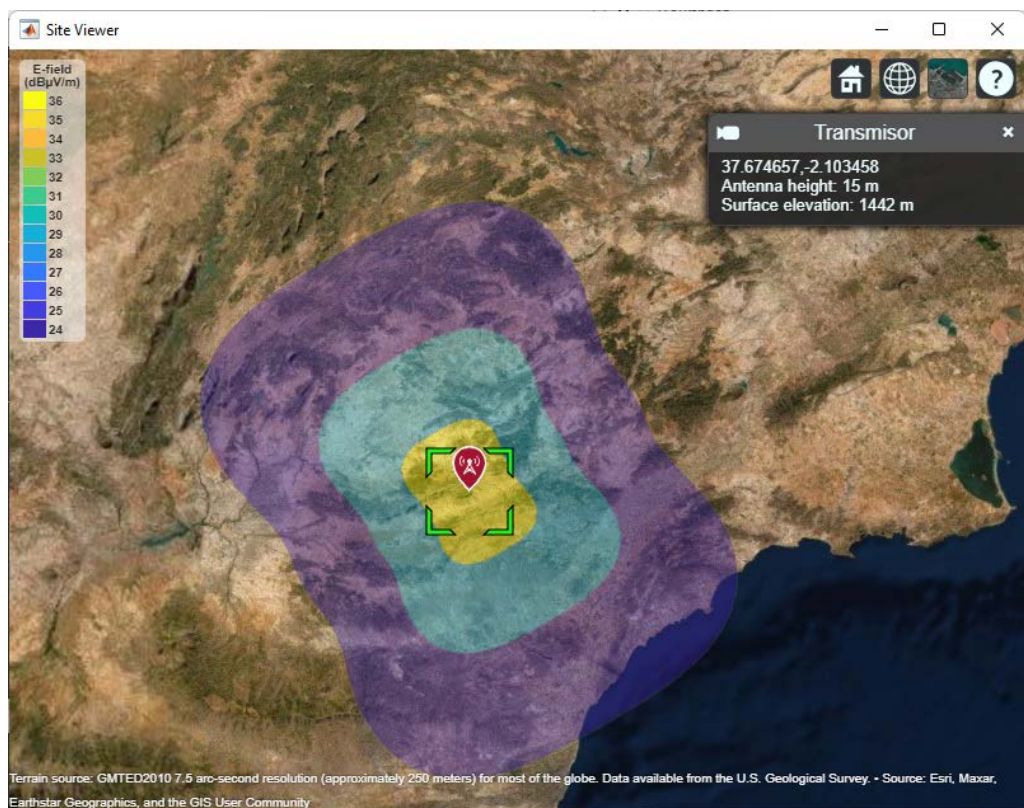


Ilustración 5-11. Ejemplo de cobertura en espacio libre

```
rtpm = propagationModel("raytracing-image-method", ...
    "MaxNumReflections",1, ...
    "BuildingsMaterial","perfect-reflector", ...
    "TerrainMaterial","perfect-reflector");
coverage(tx,rtpm, ...
    "SignalStrengths",-120:-40, ...
    "MaxRange",100, ...
    "Resolution",3, ...
    "Transparency",0.6)
```

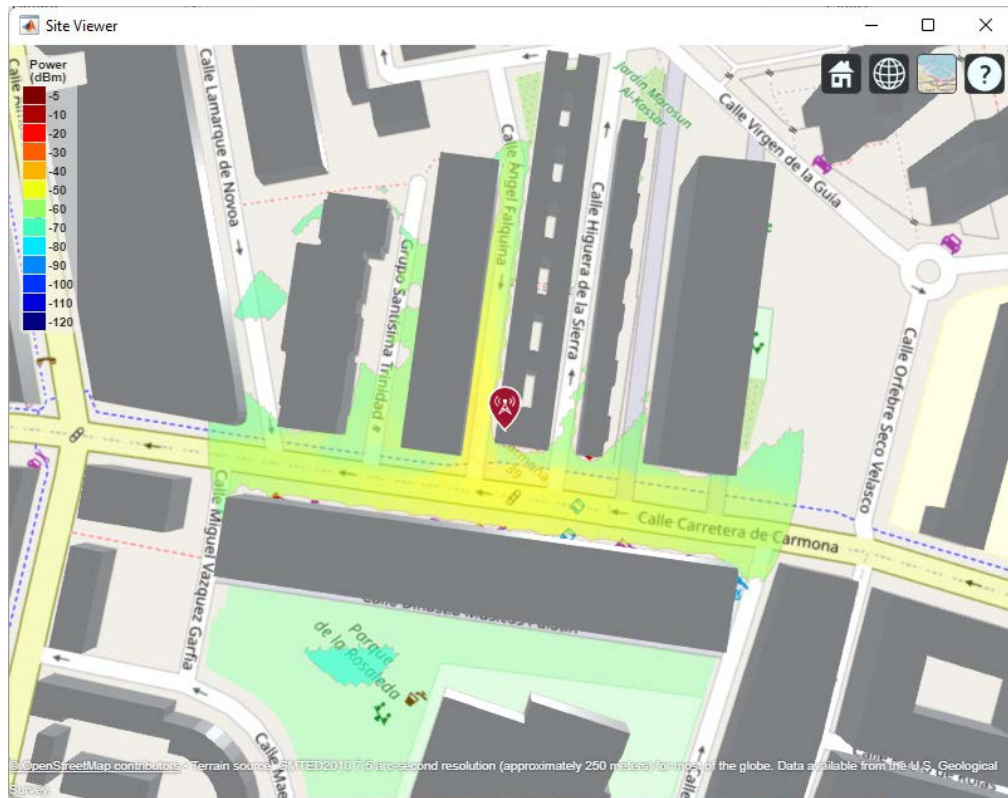



Ilustración 5-12. Cobertura calculada en entorno urbano

los. Muestra la línea de visión directa (LOS) desde el transmisor al receptor en un mapa. El gráfico está codificado por colores para identificar la visibilidad de los puntos a lo largo de la línea.

```
rx = rxsite("Name", "Small cell receiver", ...
           "Latitude", 37.400472, ...
           "Longitude", -5.976663, ...
           "AntennaHeight", 1);
los(tx, rx)
```

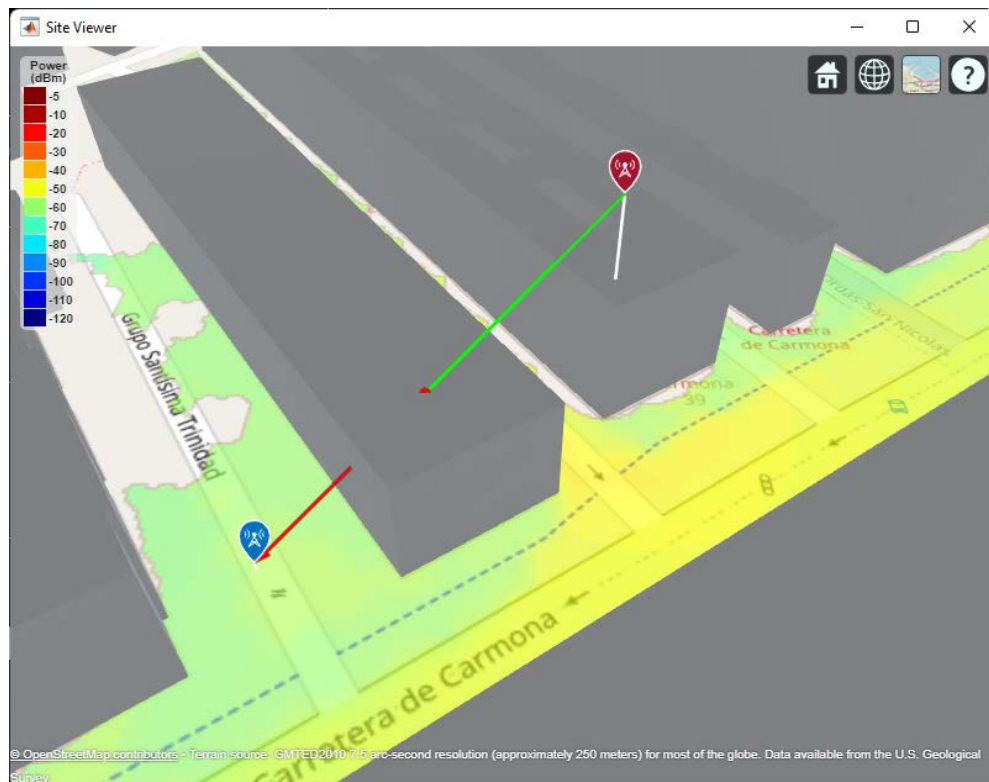


Ilustración 5-13. Línea de visión directa entre emisor y receptor.

raytrace. Calcula las trayectorias de propagación utilizando el trazado de rayos con la geometría de la superficie definida. Cada haz de propagación dibujada tiene un código de color según la potencia recibida (dBm) o la pérdida de trayecto (dB). El análisis de raytrace incluye las reflexiones superficiales, pero no incluye efectos de difracción, refracción o dispersión.

```
rtpm.MaxNumReflections = 1;
clearMap(viewer)
raytrace(tx,rx,rtpm)
```

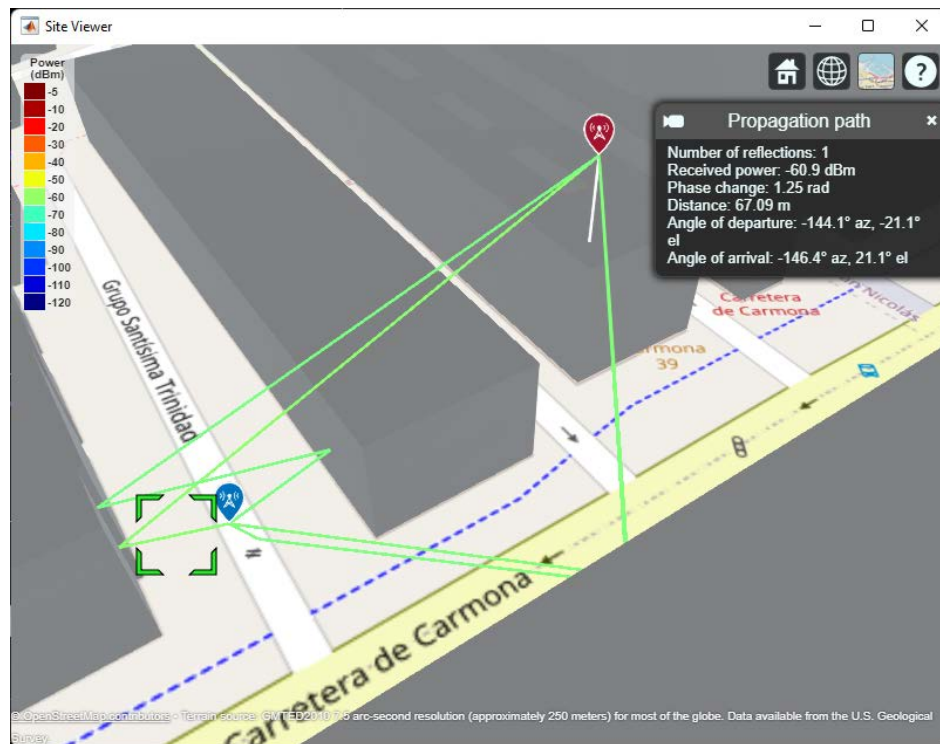


Ilustración 5-14. Cálculo de cobertura con raytrace y 2 reflexiones

5.3 Interfaz gráfica

Una GUI (también conocida como interfaz gráfica de usuario) facilita controlar una aplicación de software sin tener que aprender un lenguaje y escribir comandos para ejecutar una aplicación.

Una GUI generalmente incluye controles como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes. También aplicaciones propias personalizadas, incluida la interfaz de usuario adecuada, para que la utilicen otros usuarios.

Actualmente MATLAB ofrece dos opciones para crear aplicaciones con interfaz gráfica, una de ellas es GUIDE y la otra App Designer. En los siguientes apartados explico cada una de ellas y cual he elegido para realizar la aplicación.

5.3.1. GUIDE

GUIDE (Entorno de desarrollo de GUI) proporciona herramientas para desarrollar interfaces de usuario para aplicaciones personalizadas. El editor de diseño de GUI se puede utilizar para diseñar la interfaz de usuario gráficamente. GUIDE genera automáticamente código MATLAB para crear una interfaz que se puede modificar para programar el comportamiento de la aplicación.

Para un mejor control del diseño y desarrollo, también permite crear código MATLAB que define las propiedades y el comportamiento de todos los componentes. MATLAB incluye funciones integradas para ayudar a crear GUI para sus aplicaciones. Puede agregar cuadros de diálogo, controles de interfaz de usuario (como botones y controles deslizantes) y contenedores (como paneles y grupos de botones).

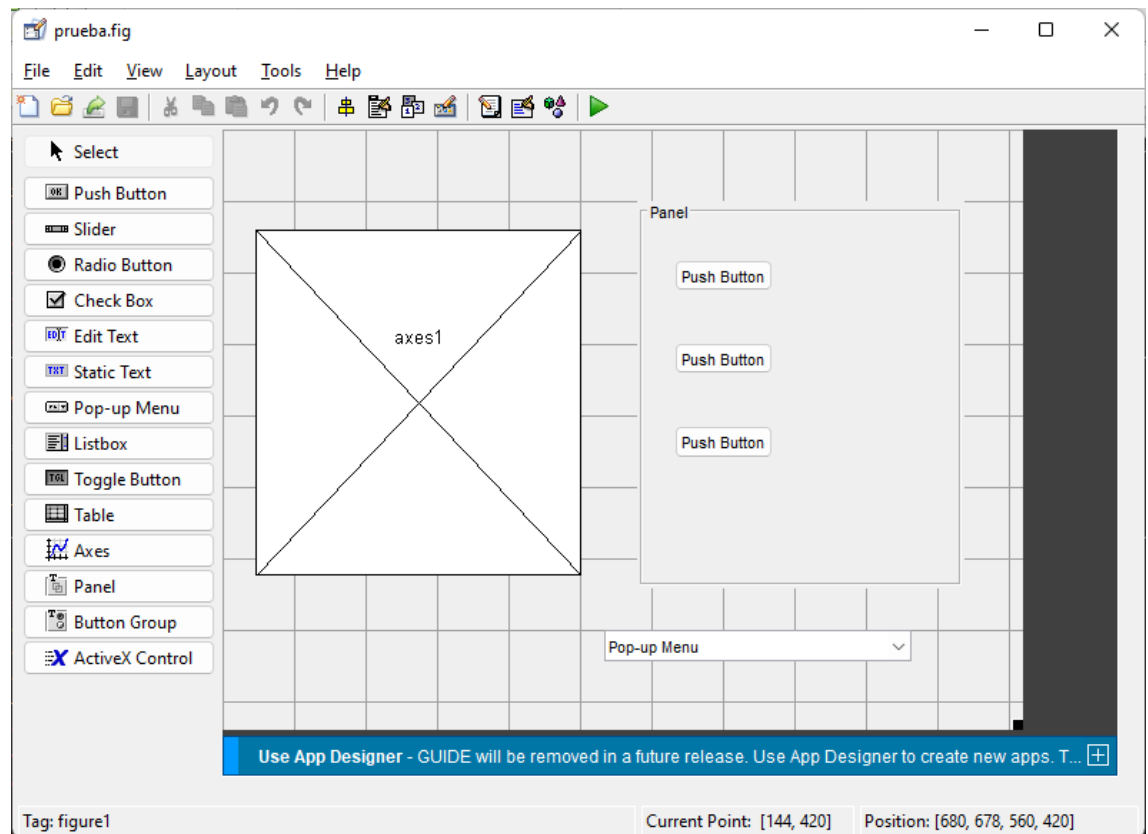


Ilustración 5-15. Interfaz gráfica de GUIDE

5.3.2. App Designer

App Designer permite crear aplicaciones profesionales, aunque no es considerado como un desarrollador profesional. Permite arrastrar y colocar módulos para crear diseños de interfaz gráfica de usuario (GUI) y programar rápidamente su comportamiento utilizando el editor incorporado. Admite compartir sus aplicaciones con MATLAB Drive o crear aplicaciones web o de escritorio independientes con MATLAB Compiler y Simulink Compiler.

App Designer integra dos tareas principales al crear una aplicación: diseñar los componentes visuales de la interfaz gráfica de usuario (GUI) y programar el comportamiento de la aplicación. Es el entorno recomendado para la construcción de aplicaciones en MATLAB ya que GUIDE desaparecerá en versiones posteriores.

También da la opción de utilizar la versión integrada del editor MATLAB para definir el comportamiento de la aplicación. Deja usar un analizador de código para verificar automáticamente los problemas de codificación. A medida que codifica, puede mostrar mensajes de error y advertencia en su código y modificar su aplicación en función de esos mensajes.

Soporta empaquetar sus aplicaciones como aplicaciones web interactivas y compartirlas, los usuarios finales pueden ejecutar aplicaciones web directamente desde sus navegadores sin instalar software adicional.

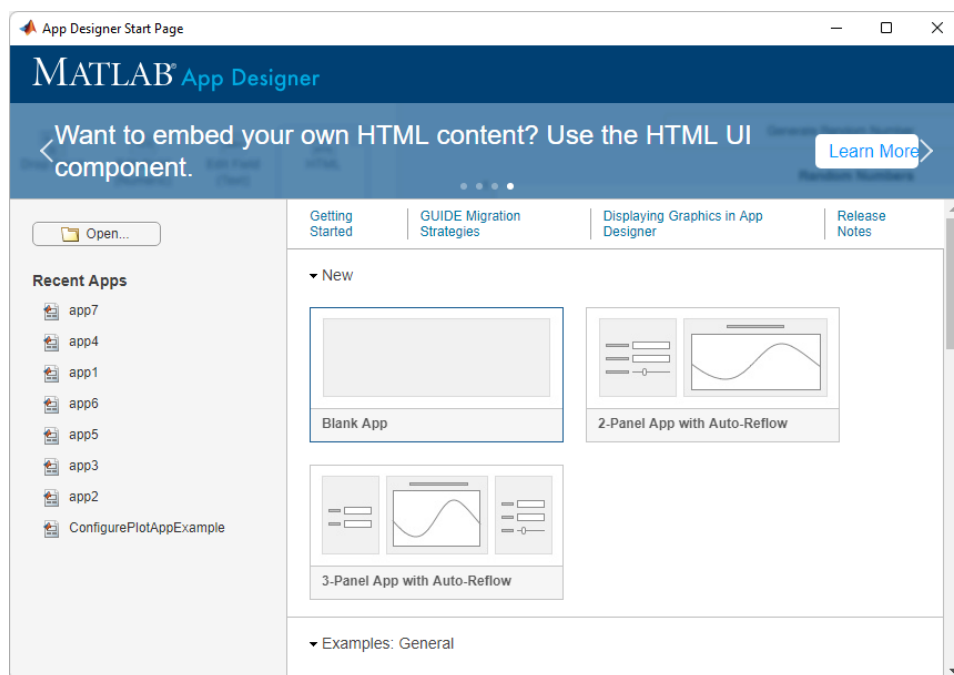


Ilustración 5-16. Página inicial de App Designer

Para la realización de la herramienta he elegido App Designer primeramente porque GUIDE, como he comentado, va a desaparecer por lo que la herramienta quedaría obsoleta. También ofrece una interfaz más moderna e intuitiva para el usuario final, y por último se ha elegido esta opción porque permite empaquetarla y compartirla de manera que todo el mundo pueda utilizarla.

5.4 Funcionamiento de la herramienta

En este apartado explico el modo de funcionamiento de la herramienta de cálculo de cobertura. A la hora de realizar cualquier tipo de cálculo, la aplicación realiza cuatro pasos generales, según el siguiente esquema.

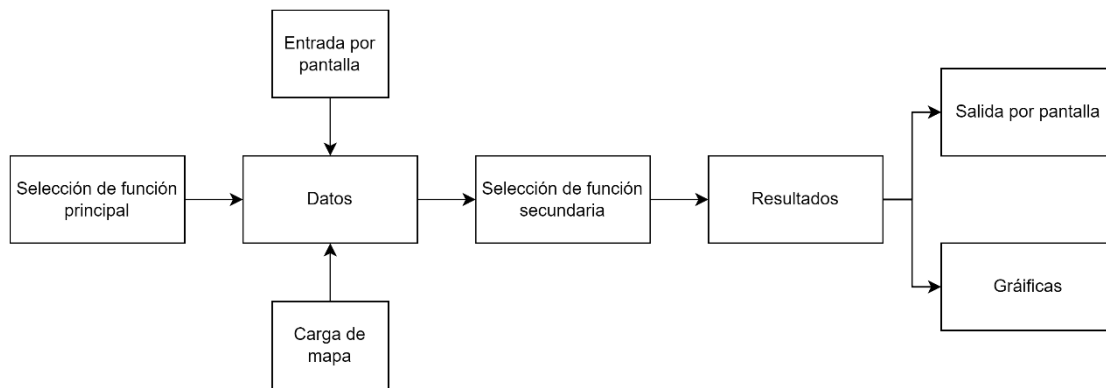


Ilustración 5-17. Esquema de funcionamiento de la herramienta

- **Selección de función principal.** Esta opción sirve para elegir la primera opción en la interfaz principal. Se puede elegir entre zonal rural o urbana y ver diferentes modelos de propagación.
- **Datos.** Los datos son introducidos por el usuario en la interfaz de cada función elegida anteriormente. En el caso de zona urbana habrá que cargar el mapa deseado y descargado previamente de Openstreetmap [2].
- **Selección de función secundaria.** Esta función será la que calcule la cobertura o gráfico según los datos introducidos anteriormente.
- **Resultados.** Los resultados se muestran sobre la propia aplicación en caso de querer ver la atenuación según los modelos de atenuación. En el caso de zona rural se mostrará sobre un mapa satelital por defecto y en caso de zona urbana el resultado se mostrará sobre el mapa previamente cargado.

El objetivo principal de nuestra herramienta es el cálculo de coberturas, pero también hay funciones secundarias que aportan otros resultados que nos ayudan a entender la función principal.

Funciones principales:

5.4.1 Modelos de propagación.

En este apartado se muestran cuatro modelos de propagación diferentes, pulsando sobre ellos se abre una ventana para que introduciendo una serie de datos te muestre la atenuación por cada variante.

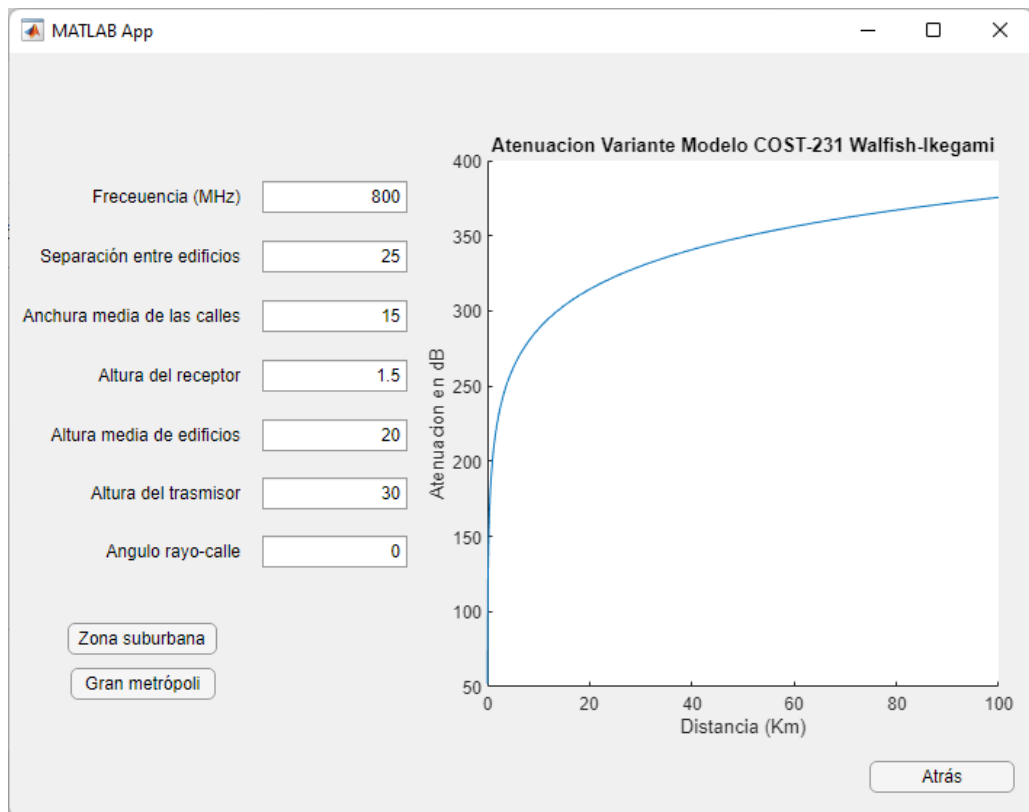


Ilustración 5-18. Ejemplo de atenuación para la variante COST-231

5.4.2 Cálculo de cobertura en entorno urbano.

Al pulsar se abre una ventana como la siguiente.

Ilustración 5-19. Interfaz principal para el cálculo en zona urbana

- El botón **“Elegir mapa a cargar”** (1) abre una ventana emergente en la que puedes navegar por los directorios para elegir el mapa a cargar. Este mapa tiene que tener extensión **.osm**. En el Anexo I. Exportar mapas en OpenStreetMap veremos como descargarlo desde Openstreetmap.org [2]

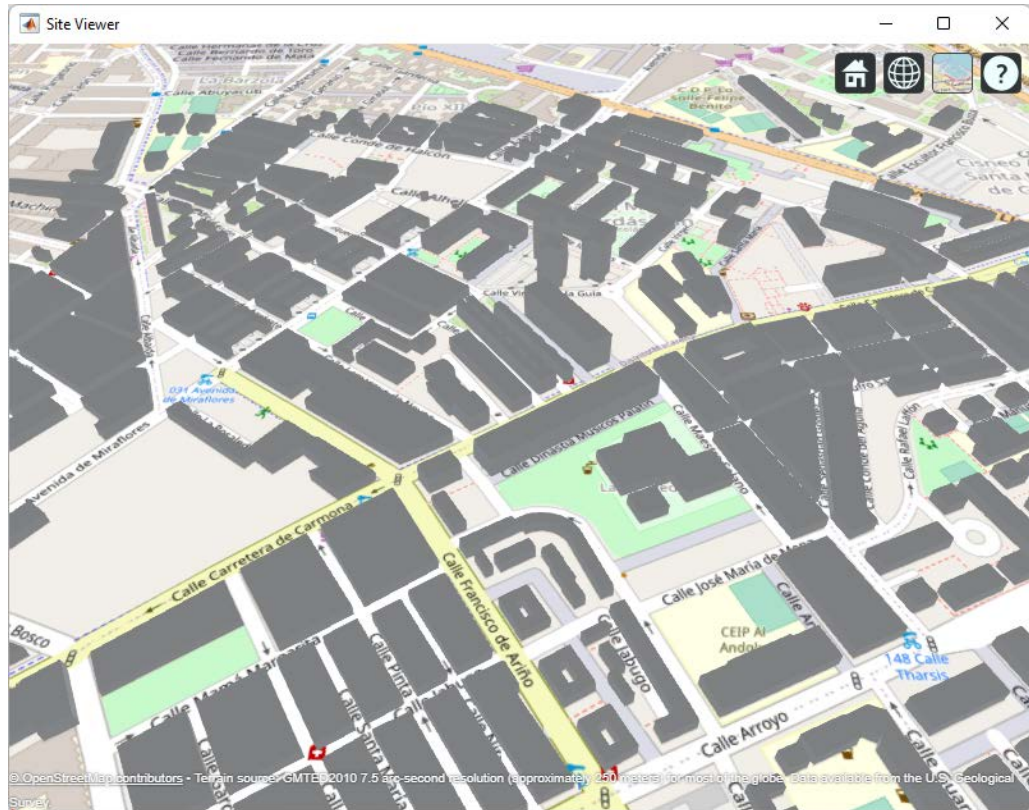


Ilustración 5-20. Mapa cargado de zona de Sevilla

- Los botones **“Elegir localización (tx)”** (2) y **“Elegir localización (rx)”** (3) muestra sobre el mapa cargado la ubicación de la latitud y longitud que se indique en los campos **“Latitud”** y **“Longitud”** de transmisor y receptor.

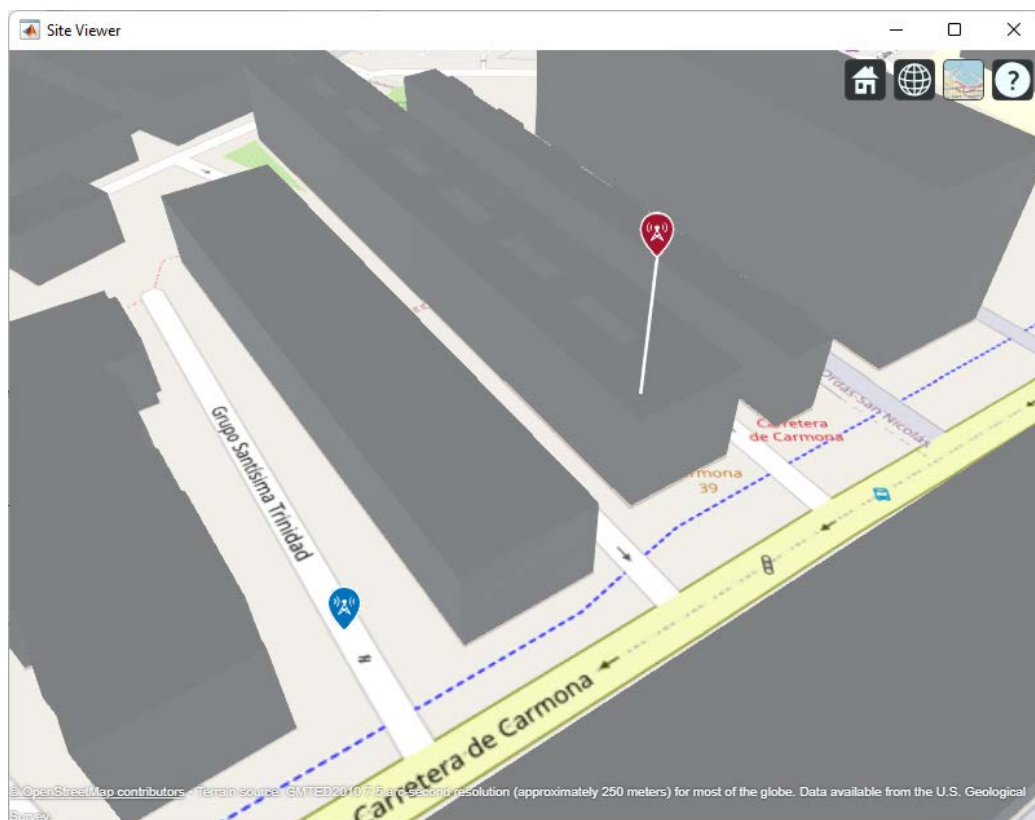


Ilustración 5-21. Ubicación del transmisor y receptor elegido.

- La función “**Cálculo de cobertura**” (4) te muestra la cobertura calculada según los parámetros de las antenas emisora y receptora, de la frecuencia, rango de cálculo y reflexión.

NOTA: cuanto mayor sea el rango de cobertura deseada más tardará en computar el resultado.

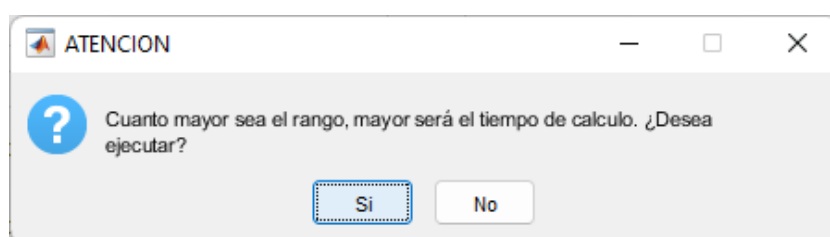


Ilustración 5-22. Nota de advertencia

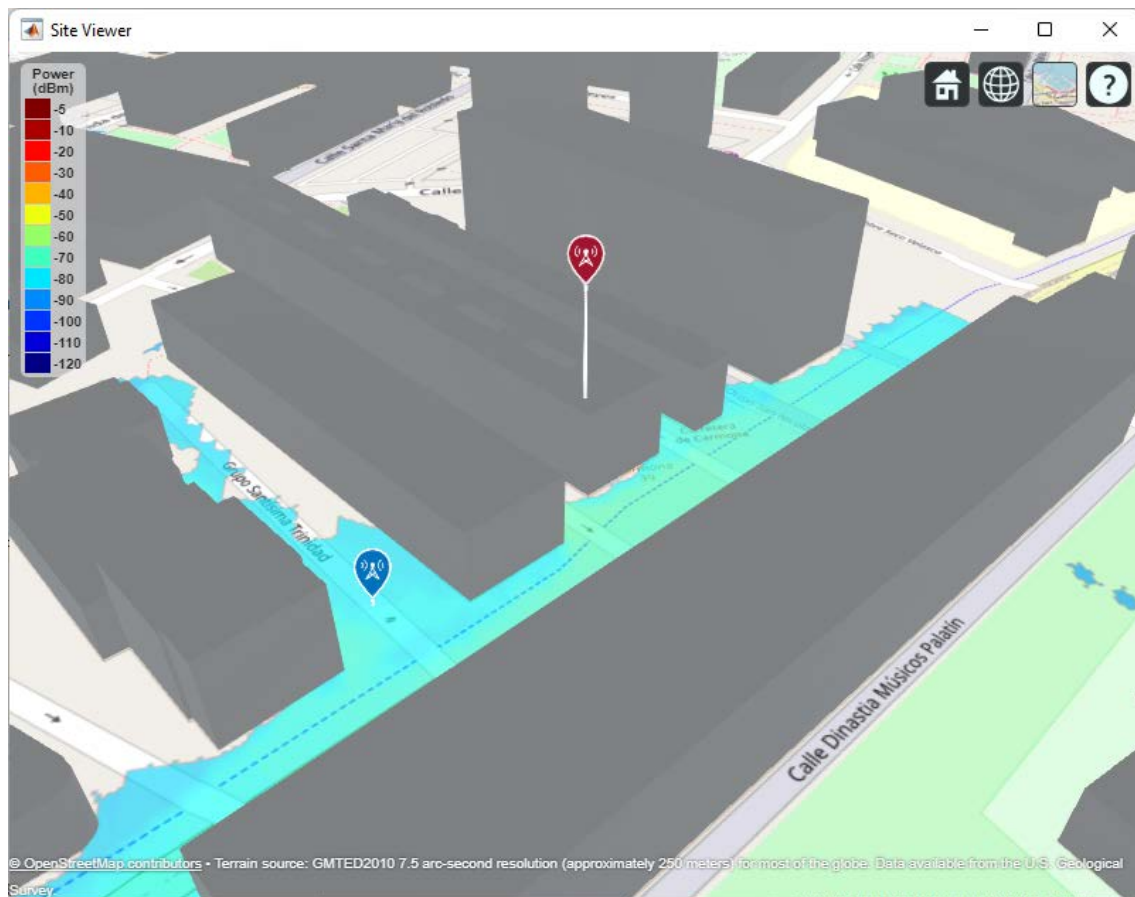


Ilustración 5-23. Rango de cobertura en zona urbana

- La función “**Cálculo con raytrace (trazado de rayos)**” calcula las trayectorias de propagación utilizando el trazado de rayos con el método de imagen, como se muestra en la Ilustración 4-15.

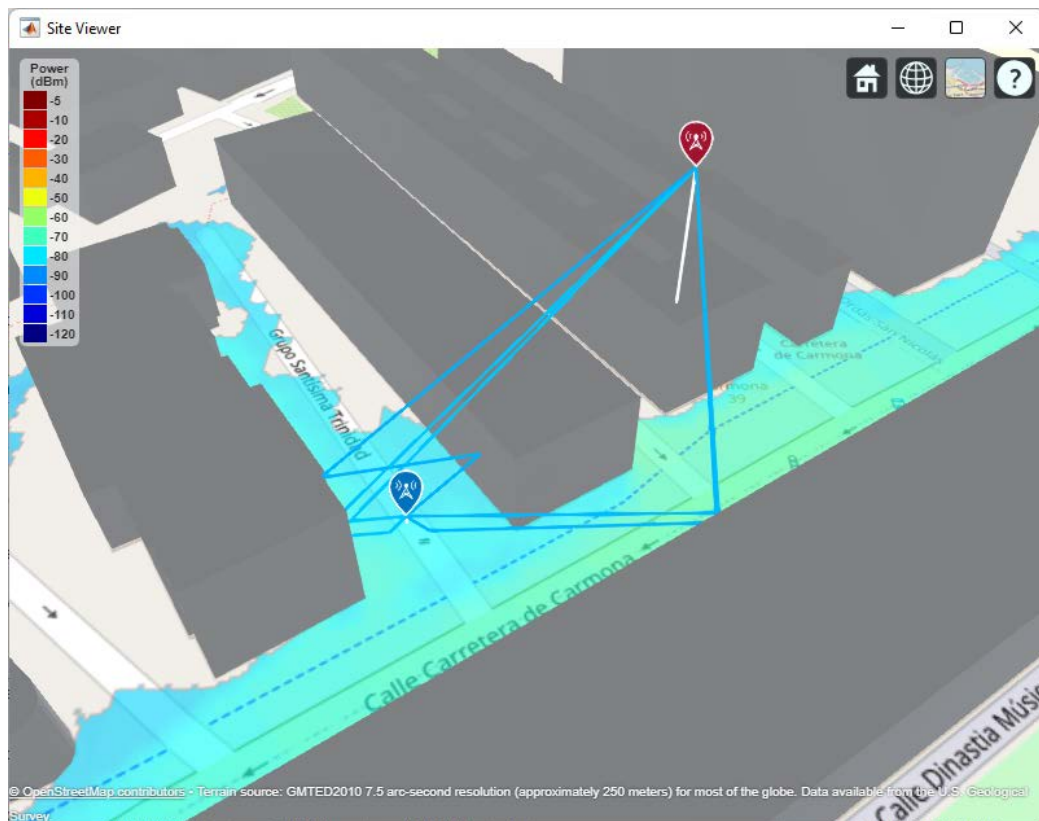


Ilustración 5-24. Cálculo de cobertura con raytracing

5.4.3. Cálculo de cobertura en entorno rural

Al pulsar se abre una ventana como la siguiente.

Ilustración 5-25. Interfaz principal para el cálculo en zona rural

- El botón **“Elegir localización”** (1) muestra sobre un mapa satelital la ubicación de la latitud y longitud que se indique en los campos **“Latitud”** y **“Longitud”**, pulsando sobre el icono creado se mostrará datos de la localización y altura del terreno.

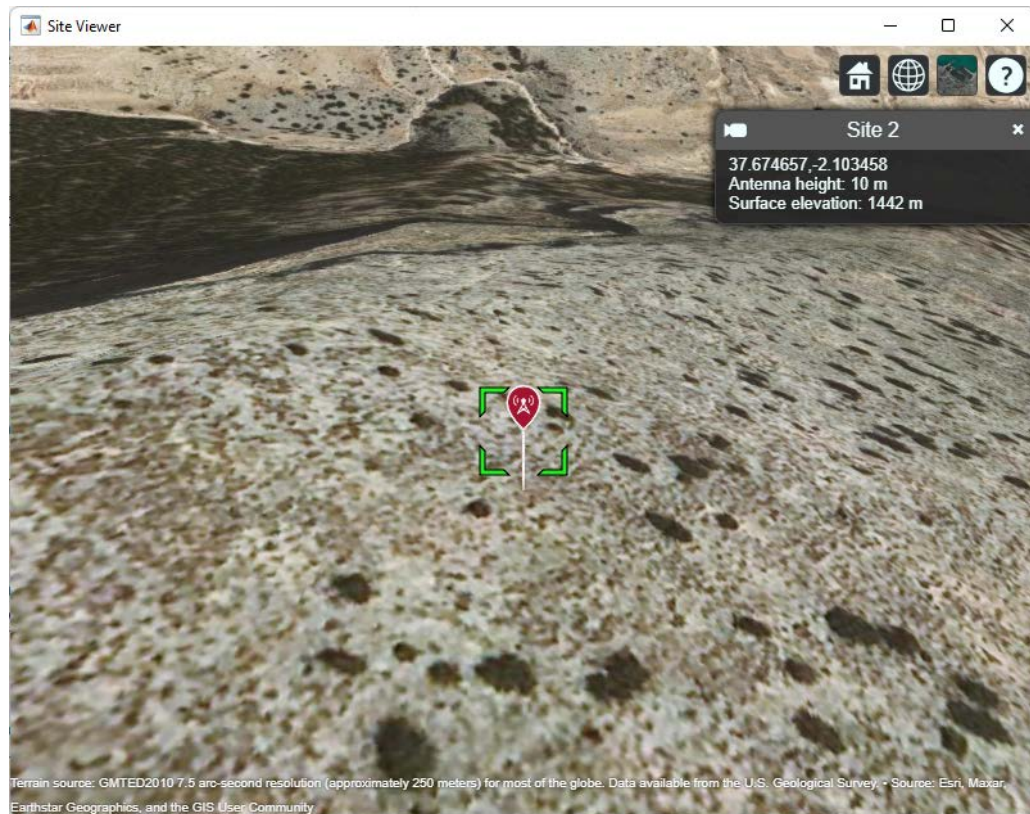


Ilustración 5-26. Ubicación del transmisor elegido

- El desplegable **“Tipo de antena”** (2) ofrece elegir entre dos tipos de antena, una omnidireccional (tipo dipolo) y otra más directiva (tipo hélice)
- En el desplegable **“Modelo de propagación”** (3), da la opción a elegir entre 3 modelos de propagación: Longley-rice (que tiene en cuenta la orografía del terreno), espacio libre y espacio libre + lluvia (estas dos últimas opciones no tienen en cuenta la orografía del terreno).
- El botón **“Ver antena”** (4) muestra una figura con la antena seleccionada.

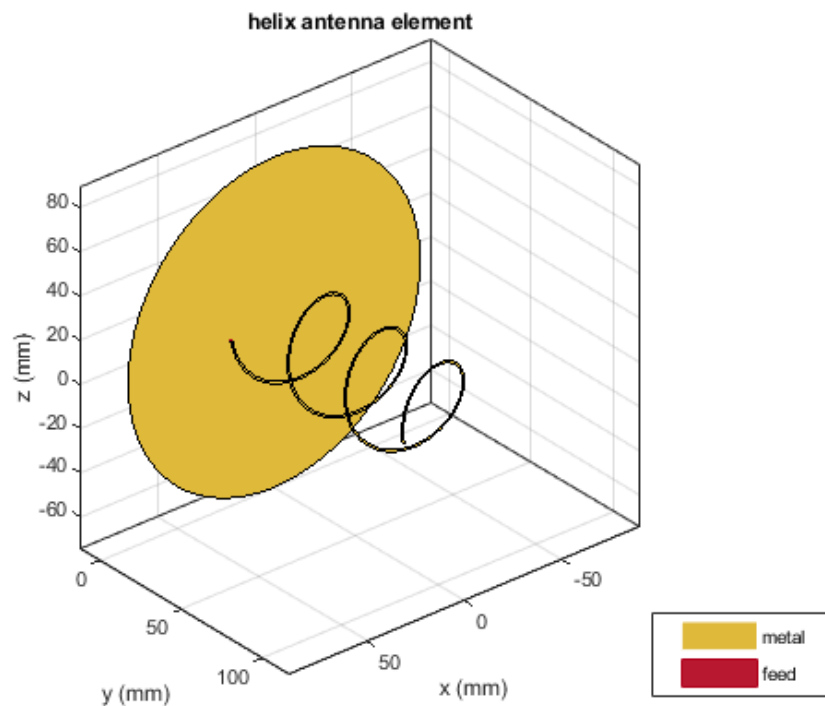


Ilustración 5-27. Antena tipo hélice

- El botón **"Ver intensidad del campo eléctrico"** (5) te muestra una figura del campo electromagnético según la antena elegida.

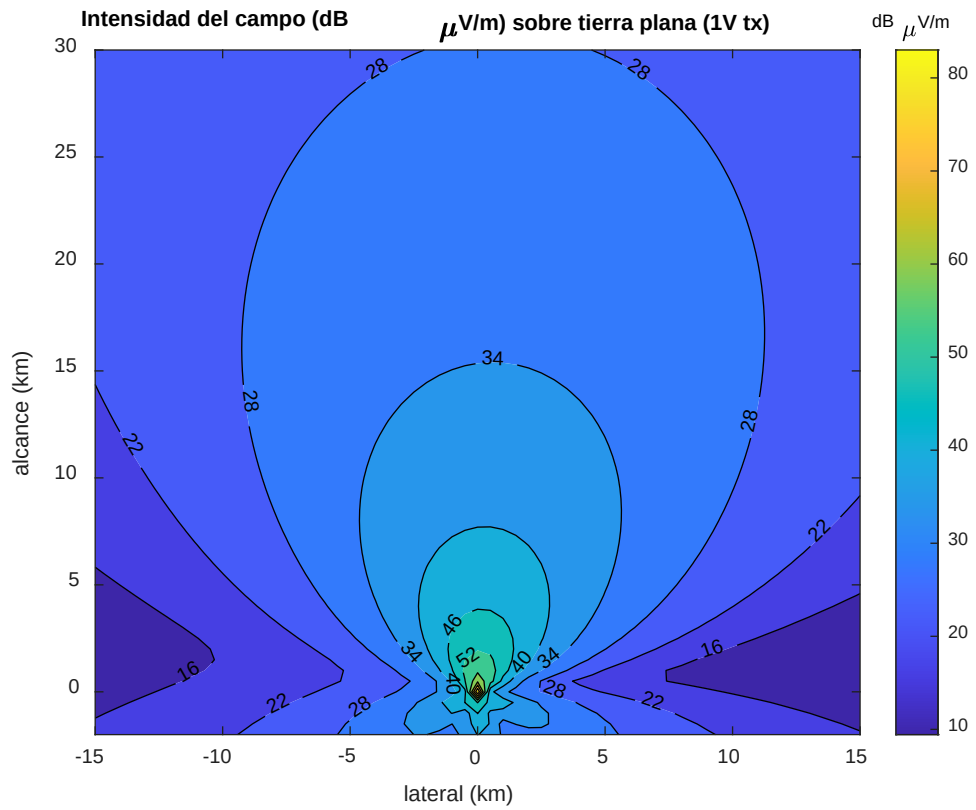


Ilustración 5-28. Intensidad del campo sobre tierra plana.

- Por último, el botón “Calcular cobertura” (6) muestra sobre el mapa la cobertura según los parámetros de la antena elegidos y del modelo de propagación.

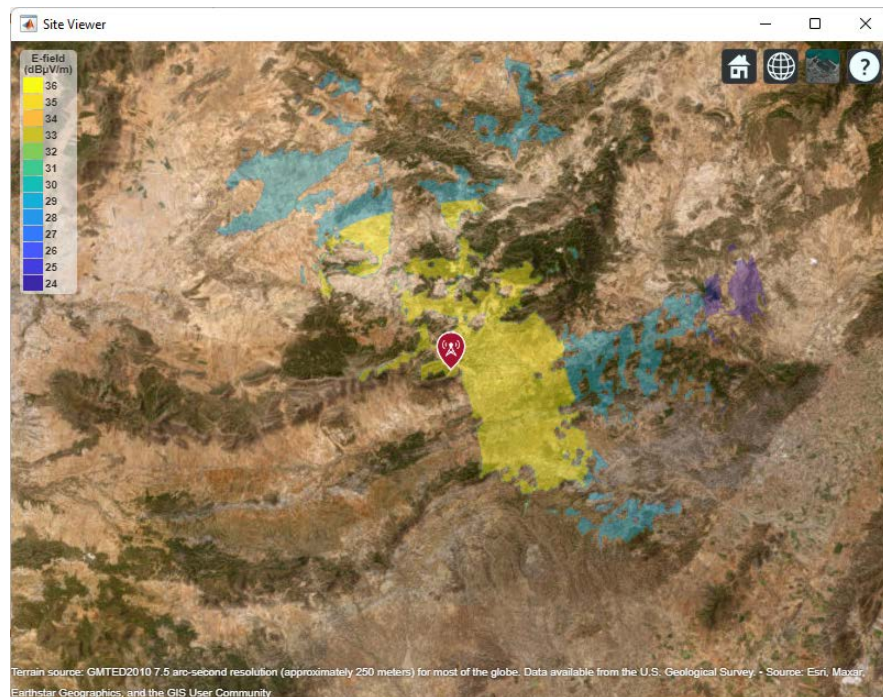


Ilustración 5-29. Cálculo de cobertura en zona rural

6. Pruebas realizadas

Para el testeo de la herramienta se ha hecho una comparación con el software comentado en el apartado 2.1 Radio Mobile.

Radio Mobile Online solo ofrece el cálculo de coberturas radioeléctricas en entornos rurales por lo que haremos la prueba con el cálculo en zona rural.

Se realiza la prueba calculando la cobertura desde el mismo punto y con una antena similar.

Resultado de cálculo de cobertura con Radio Mobile

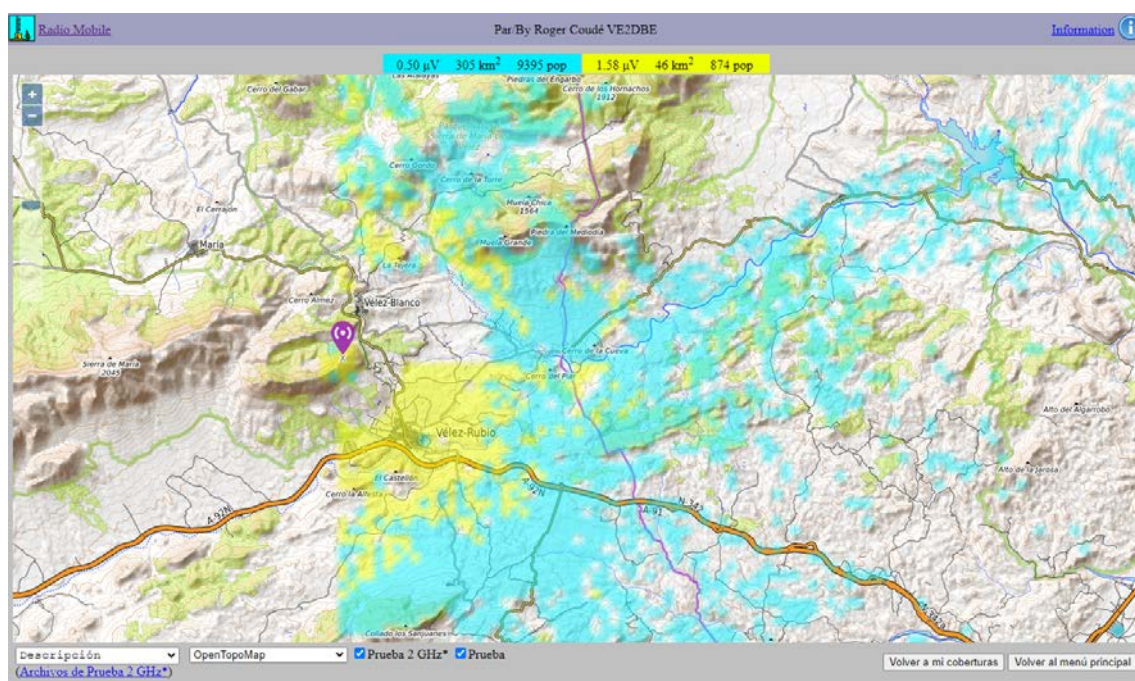


Ilustración 6-1. Resultado de cálculo de cobertura con Radio Mobile

Frecuencia	2300 MHz
Nombre de la estación base	Prueba
Latitud	37.67459667 °
Longitud	-2.10344732 °
Latitud	37° 40' 28.55"N
Longitud	002° 06' 12.41"W
QRA	IM87WQ
UTM (WGS84)	30S E579062 N4170090
Elevación	1477.2 m
Altura de la antena base	10 m
Potencia Tx de transmisión	0.03200 W
Tipo de antena base	omni
Azimuth de la antena base	0 °

Inclinación de la antena base	0 °
Zona de señal débil	29.4 dBμV/m
Zona de señal fuerte	39.4 dBμV/m

Tabla 3. Resumen del cálculo de Radio Mobile

Resultado de cálculo de cobertura con la herramienta desarrollada.

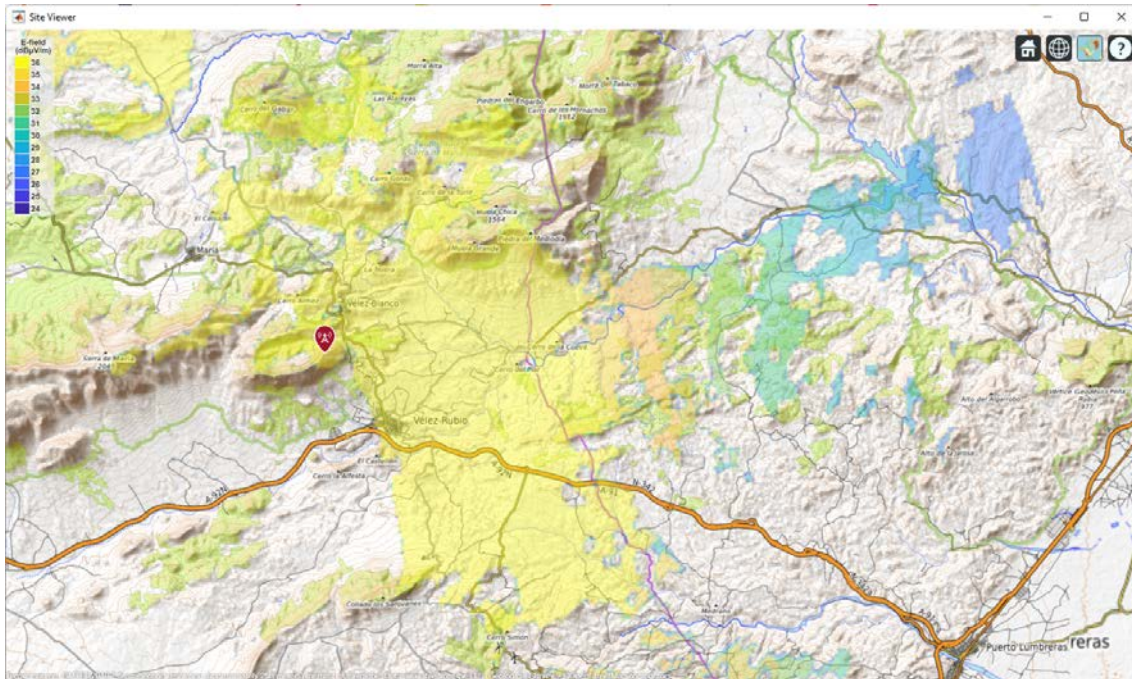


Ilustración 6-2. Resultado de cálculo de cobertura con la herramienta

Frecuencia	2300 MHz
Nombre de la estación base	Prueba
Latitud	37.674657 °
Longitud	-2.103458 °
Elevación	1442.2 m
Altura de la antena base	10 m
Potencia Tx de transmisión	15 dBm
Tipo de antena base	omnidireccional
Azimuth de la antena base	200 °
Inclinación de la antena base	0 °
Zona de señal débil	27 dBμV/m
Zona de señal fuerte	36 dBμV/m

Tabla 4. Resumen del cálculo con la herramienta desarrollada

Observando los resultados obtenidos nos permite llegar a la conclusión de que son prácticamente iguales obviando las particularidades de cada programa para definir las coordenadas, ya que Radio Mobile no permite poner las coordenadas exactas.

7. Conclusión y líneas futuras

Este software ha sido diseñado para proporcionar una herramienta de detección de cobertura con las funciones más comunes y utilizadas para predecir la cobertura de radio. Los usuarios finales encontrarán la herramienta muy intuitiva, sencilla y centrada en las funciones clave necesarias para la investigación de las radiocomunicaciones.

Hemos mantenido la idea de crear un software modular para así poder ampliarla de manera sencilla si así se desea. El uso de MATLAB para su realización hace que nuestra herramienta sea accesible ya que MATLAB es un software muy utilizado debido a su gran versatilidad y potencia computacional. Además, nuestra aplicación al estar diseñada con App Designer permite empaquetarla e instalarla en otros equipos de manera sencilla, lo que hace que este software sea totalmente accesible.

Algunas líneas futuras de trabajo sobre la herramienta podrían ser:

- Ampliar el número de modelos de propagación, en nuestra herramienta hemos decidido incluir el método longley-rice ya que es el utilizado por Radio Mobile y el de espacio libre. Sin embargo, todavía existen muchos otros modelos con igual o mejor precisión que se pueden incorporar a la herramienta.
- Ampliar el catálogo de antenas, se pueden incluir otro tipo de antenas o incluso añadir una aplicación interna para diseñarlas.
- Incluir función de punto más alto en el mapa cargado para optimizar al máximo la simulación de cobertura.
- Otra idea de futuro sería poder sacar un informe con el mapa de cobertura e información de la señal, parámetros de la antena y localización del transmisor.

8. Anexos

8.1 Anexo I. Exportar mapas en OpenStreetMap

En este anexo se explica como exportar mapas con edificaciones desde OpenStreetMap [2], lo haremos siguiendo unos sencillos pasos:

1. Acceder a la web <https://www.openstreetmap.org/>
2. En la parte superior izquierda aparece un botón que indica “Exportar”.

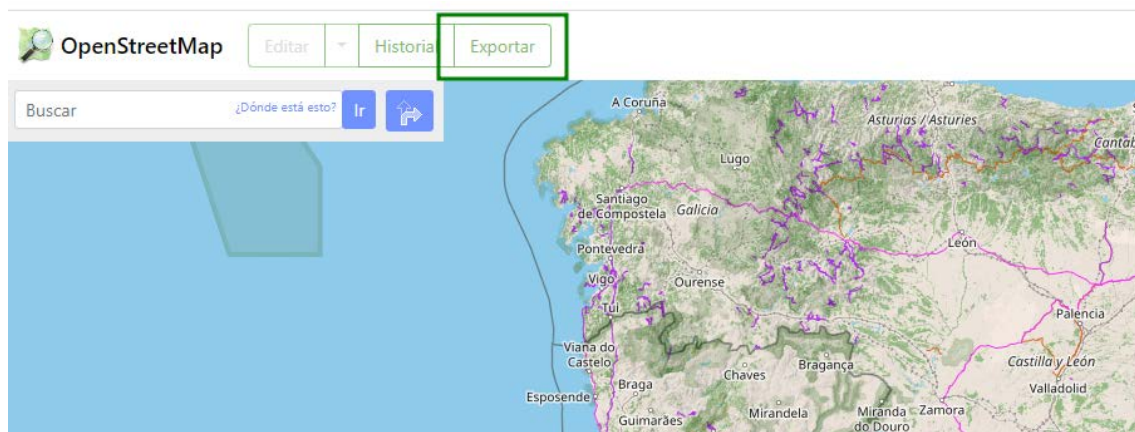


Ilustración 8-1. Opción de exportar de OpenStreetMap

3. Una vez que pichas sobre el botón se abre un panel en la izquierda como el siguiente:



Ilustración 8-2. Panel para exportar en OpenStreetMap

4. Haciendo zoom con el ratón en el mapa de la pantalla eliges la zona que quieres exportar. También puedes poner las coordenadas exactas del rango que se desea exportar.
5. Una vez seleccionada el área pulsas sobre el botón “Exportar” que aparecerá en el panel lateral izquierdo y se descargará un fichero llamado map.osm

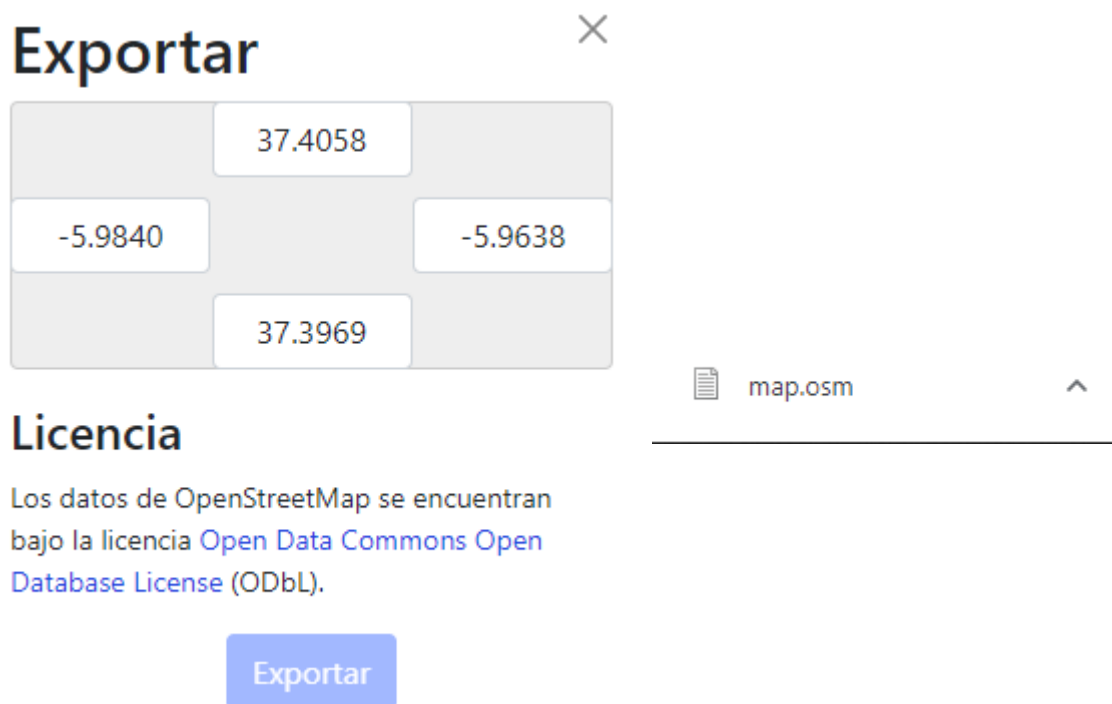


Ilustración 8-3. Panel de exportación y archivo descargado.

8.2 Anexo II. Manual de usuario

En este anexo se expone el manual de usuario que hay incluido en el botón “Ayuda” de la aplicación.

Manual de usuario.

Al iniciar la aplicación se mostrará esta ventana:

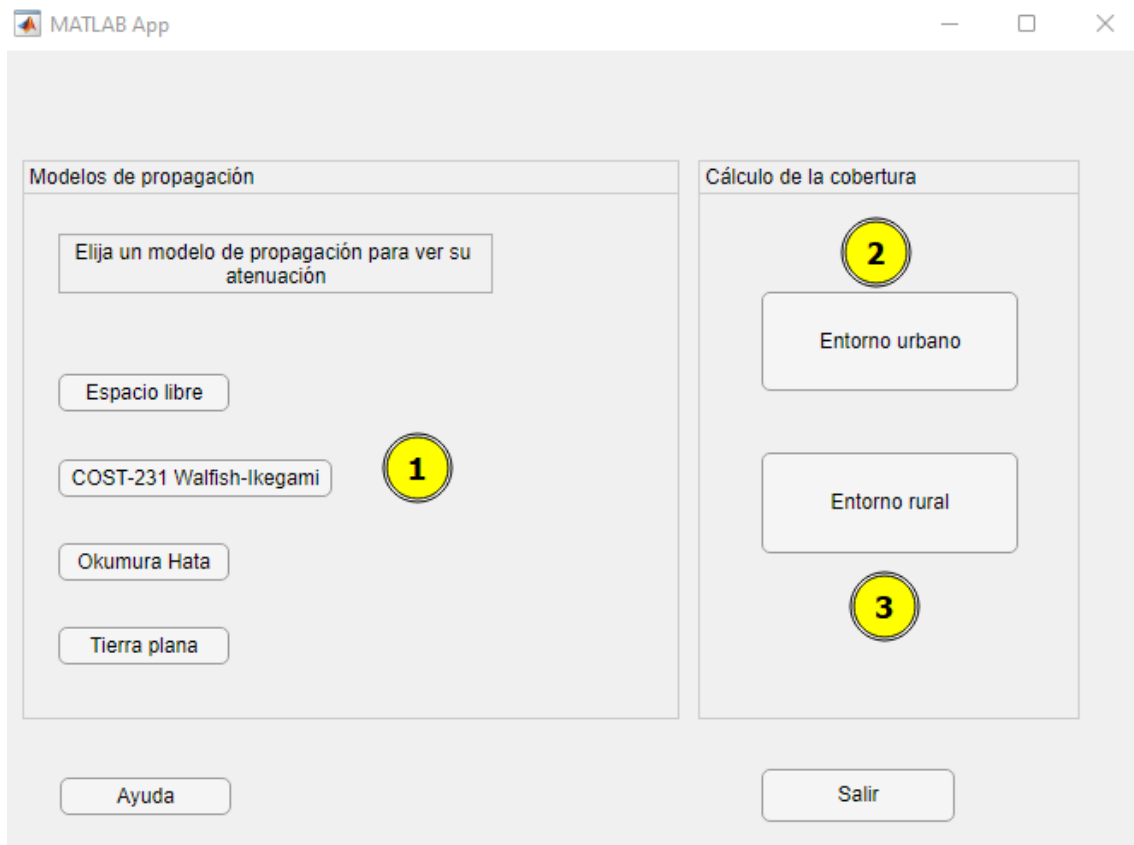


Ilustración 8-4. Pantalla principal de la aplicación

Modelos de propagación

1. En este apartado se muestran cuatro modelos de propagación diferentes, pulsando sobre ellos se abre una ventana para que introduciendo una serie de parámetros te muestre la atenuación por cada variante.

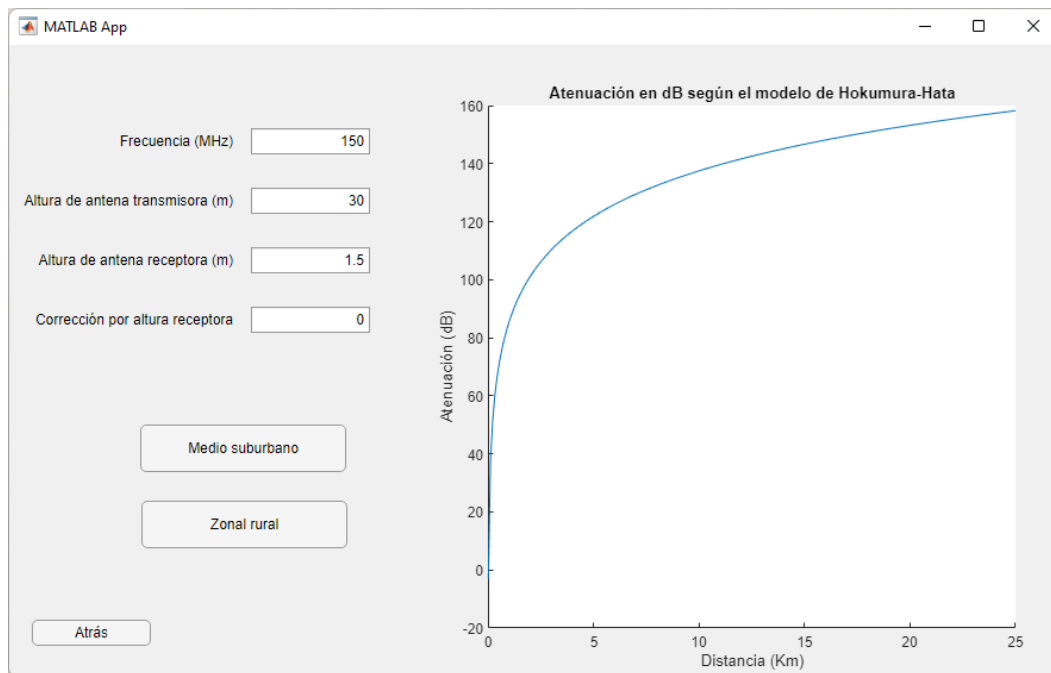


Ilustración 8-5. Ejemplo de modelo de propagación de Okumura-Hata

Cálculo de cobertura.

2. **Cálculo de cobertura en entorno urbano.** Al pulsar en este botón se abre una ventana como esta:

Ilustración 8-6. Interfaz del apartado cálculo de cobertura en entorno urbano

1. **Elige el mapa a cargar** (obligatorio). Abre una ventana emergente en la que puedes navegar por los directorios para elegir el mapa a cargar. Este mapa tiene que tener extensión `.osm`.

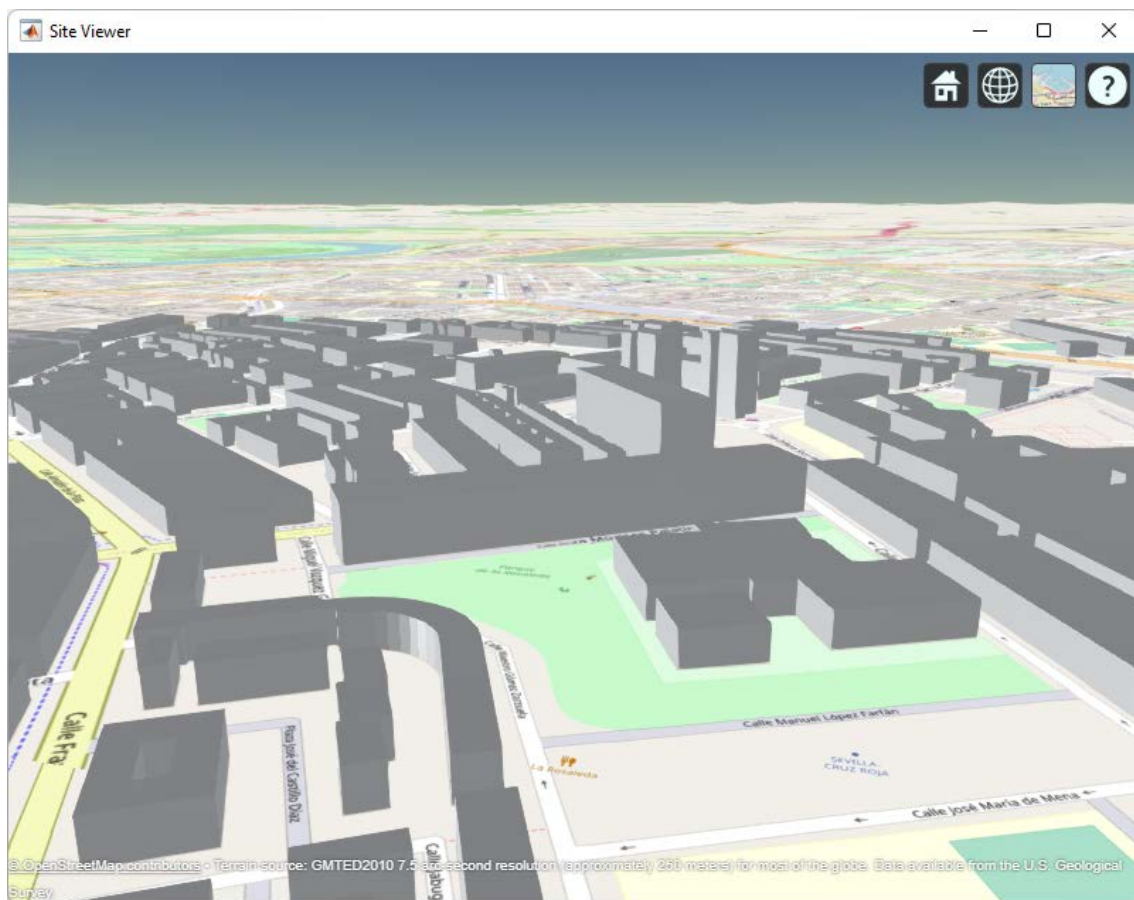


Ilustración 8-7. Mapa cargado

2. **Elegir localización (tx)** (obligatorio). Muestra sobre el mapa cargado la ubicación de la latitud y longitud que se indique en los campos de [6] "Latitud (tx)" y "Longitud (tx)"

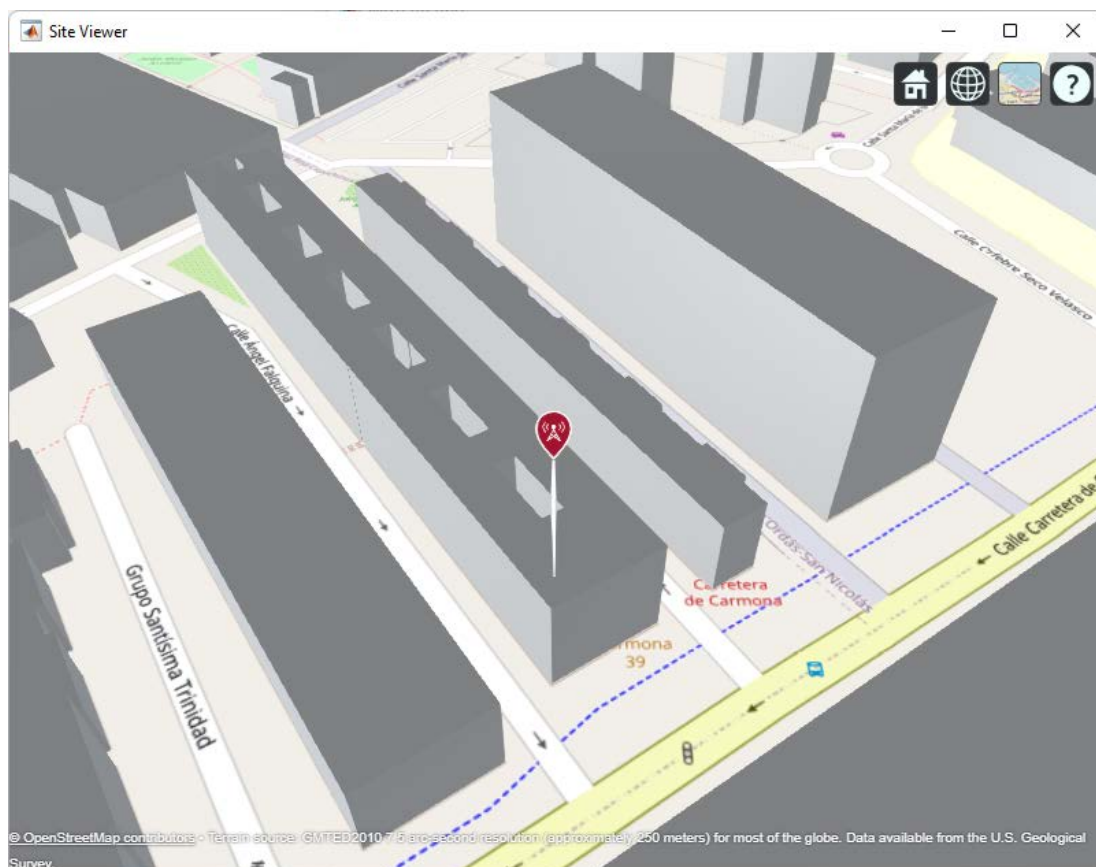


Ilustración 8-8. Transmisor sobre el mapa cargado previamente

NOTA: Si pulsas este botón y no hay mapa cargado te saldrá un mensaje de aviso que indica que debes cargar un mapa.

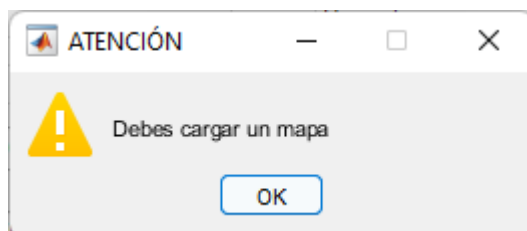


Ilustración 8-9. Mensaje de advertencia: Debes cargar un mapa

3. **Elegir localización (rx)** (obligatorio para [5] Cálculo con raytrace (trazado de rayos)). Muestra sobre el mapa cargado la ubicación de la latitud y longitud que se indique en los campos de [7] "Latitud (rx)" y "Longitud (rx)"

NOTA: Si pulsas este botón y no hay mapa cargado te saldrá un mensaje de aviso que indica que debes cargar un mapa. Ilustración 8-9

4. **Cálculo de cobertura.** Muestra la cobertura calculada según los parámetros de las antenas emisora [8] y receptora [9], de la frecuencia, rango de cálculo y reflexión [10].

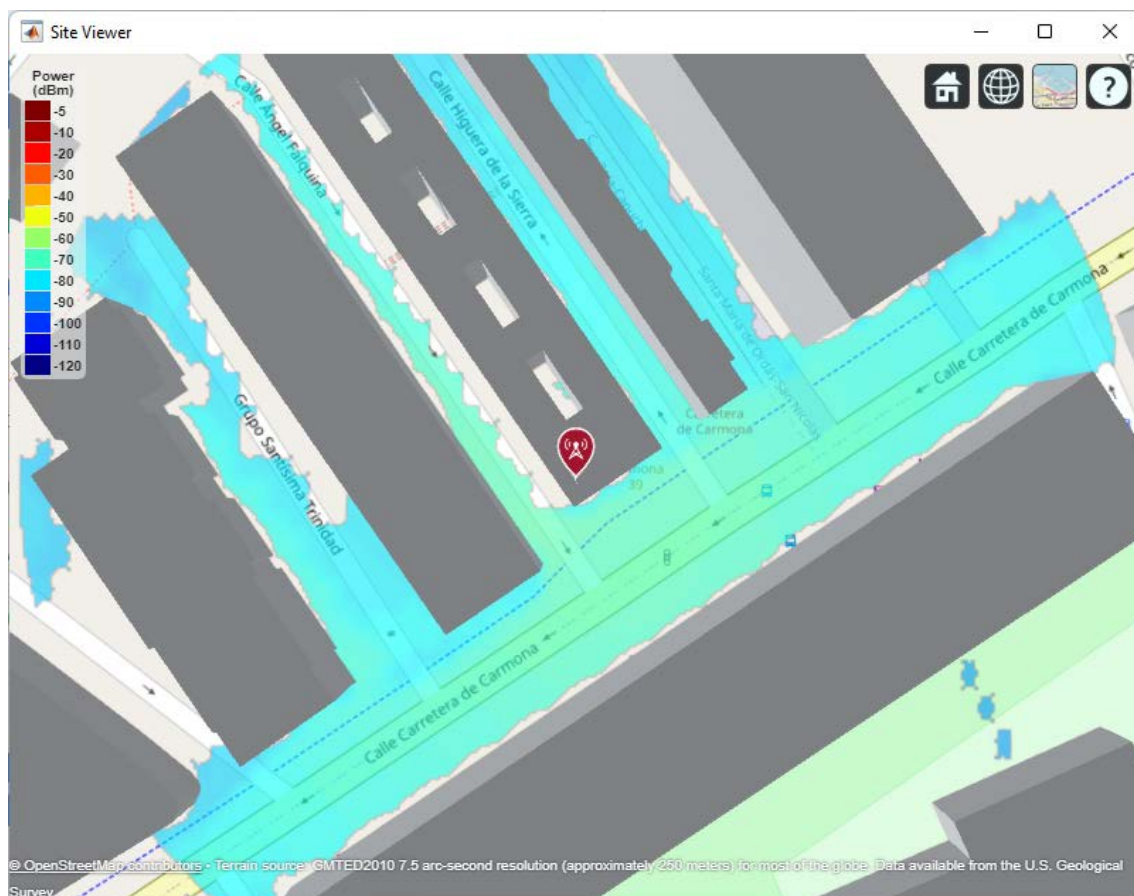


Ilustración 8-10. Rango de cobertura calculada

NOTA 1: Si pulsas este botón y no hay mapa cargado saldrá un mensaje de aviso que indica que debes cargar un mapa. Ilustración 8-9

NOTA 2: Si pulsas este botón y no se ha elegido localización del transmisor (tx) [2] saldrá un mensaje de aviso indicando que debes elegir un transmisor

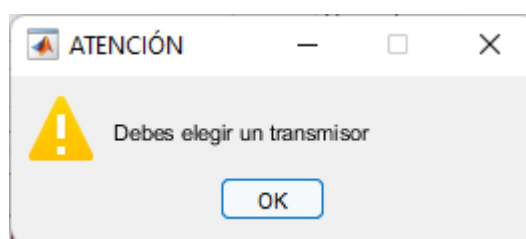


Ilustración 8-11. Mensaje de advertencia: Debes elegir un transmisor

NOTA 3: Cuanto mayor sea el rango de cobertura deseada más tardará en computar el resultado.

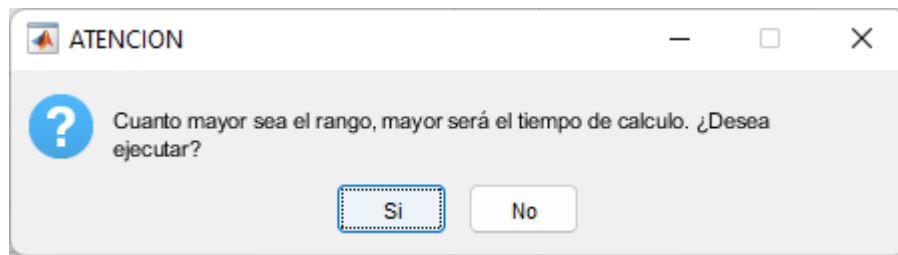


Ilustración 8-12. Advertencia de rango de cálculo

5. **Cálculo con raytrace (trazado de rayos).** Calcula las trayectorias de propagación utilizando el trazado de rayos con el método de imagen.

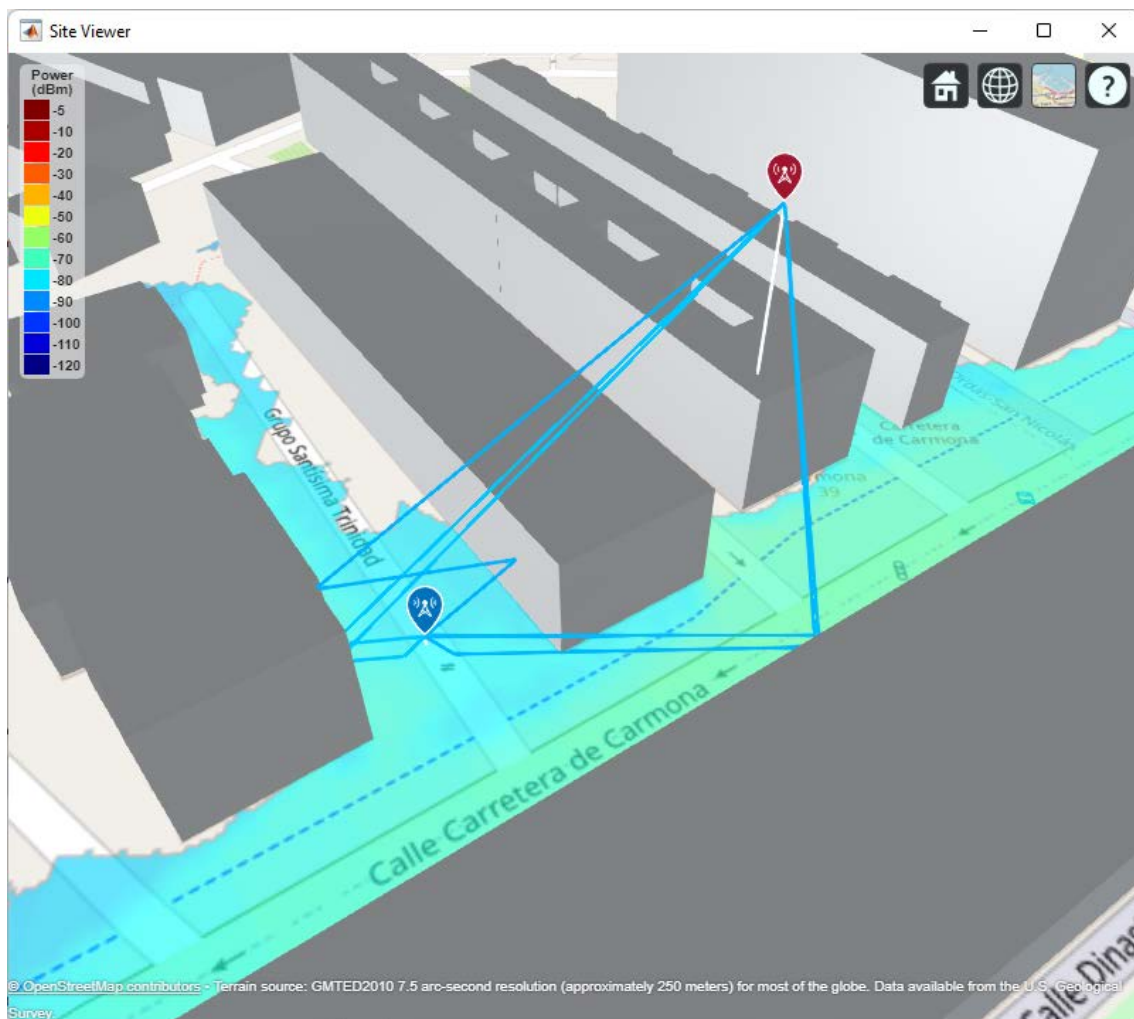


Ilustración 8-13. Resultado de cálculo con raytrace y 2 reflexiones.

NOTA 1: Si pulsas este botón y no hay mapa cargado saldrá un mensaje de aviso que indica que debes cargar un mapa. Ilustración 8-9

NOTA 2: Si pulsas este botón y no se ha elegido localización del transmisor (tx) [2] saldrá un mensaje de aviso indicando que debes elegir un transmisor.

Ilustración 8-11

NOTA 3: Si pulsa este botón y no se ha elegido localización del receptor (rx) [3] saldrá un mensaje de aviso indicando que debes elegir un receptor.

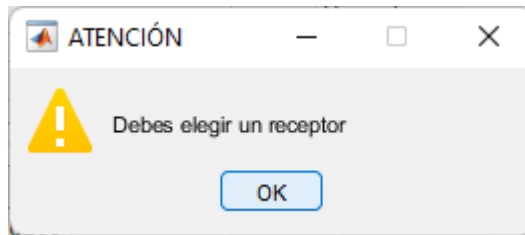


Ilustración 8-14. Mensaje de advertencia: Debes elegir un receptor

6. Latitud y longitud del transmisor.
7. Latitud y longitud del recetor
8. Altura y sensibilidad en dB de la antena receptora
9. Altura y potencia en dBm de la antena transmisora
10. Parámetros para el cálculo de cobertura.
 - Frecuencia de transmisión en Hz
 - Rango de cálculo en metros
 - Número máximo de reflexiones.

3. **Cálculo de cobertura en entorno rural.** A pulsar sobre este botón se abre esta ventana:

The image shows a MATLAB App window titled "MATLAB App". It contains two main sections: "Localización" and "Parámetros de la antena".

Localización:

- Button: "Elegir localización" (1)
- Latitud: 37.674657 (5)
- Longitud: -2.103458

Parámetros de la antena:

- Frecuencia (Hz): 2.4e+09
- Altura (m): 15
- Orientación antena (°): 200
- Potencia Trx (dBm): 15
- Tipo de antena: Omnidireccional
- Modelo de propagación: Longley-rice (6)

Buttons:

- Ver antena (2)
- Ver intensidad del campo eléctrico (3)
- Calcular cobertura (4)
- Salir

Ilustración 8-15. Interfaz del apartado cálculo de cobertura en entorno rural

1. **Elegir localización.** Muestra sobre un mapa satelital la ubicación de la latitud y longitud que se indique en los campos [5] "Latitud" y "Longitud"



Ilustración 8-16. Ubicación de la antena transmisora

2. **Ver antena.** Muestra una figura con la antena seleccionada en [6]

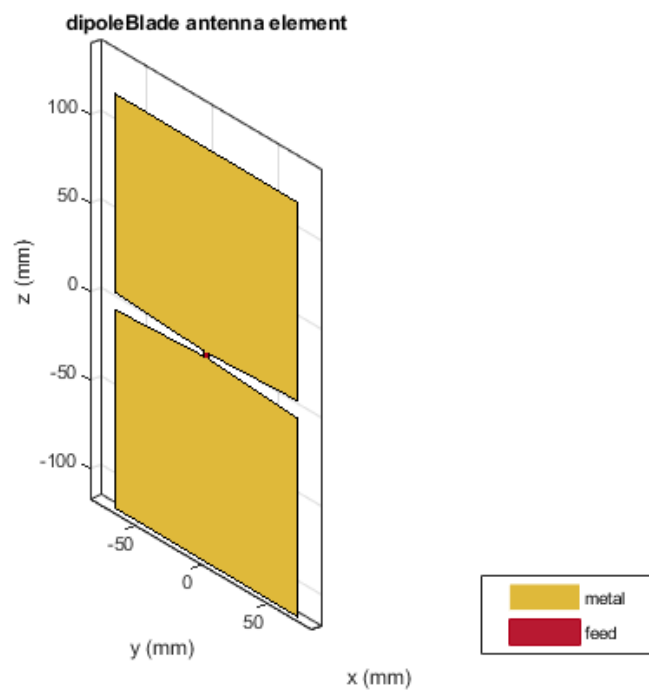
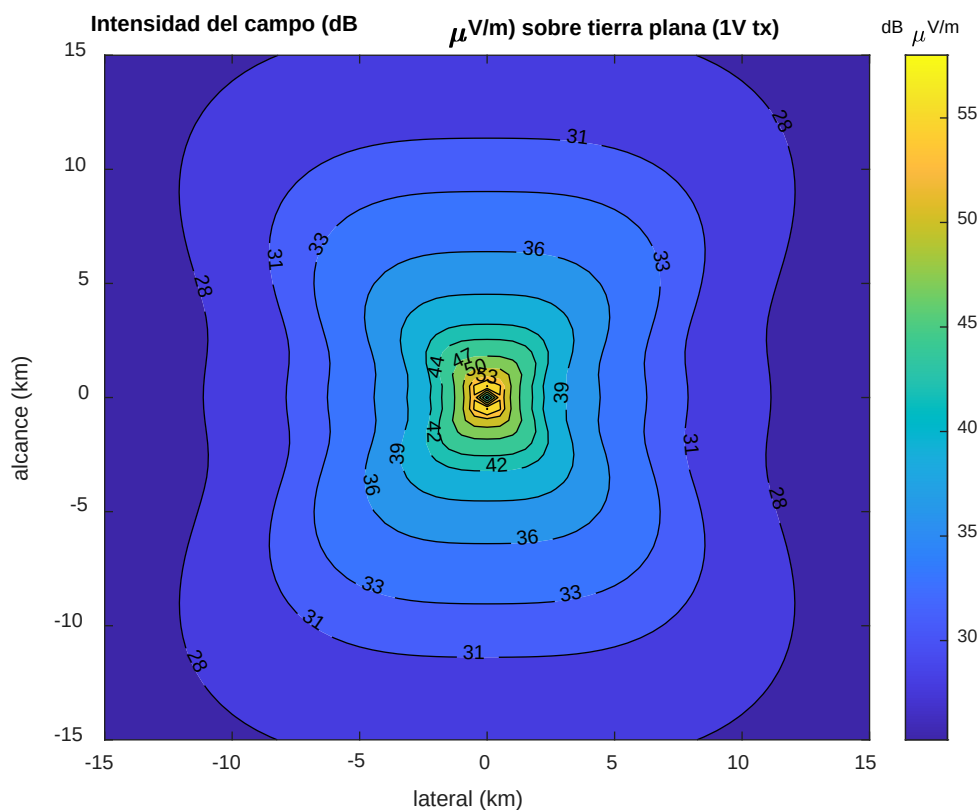


Ilustración 8-17. Antena tipo dipoleBlade

3. **Ver intensidad del campo eléctrico.** Muestra una figura del campo electromagnético según la antena elegida en [6].



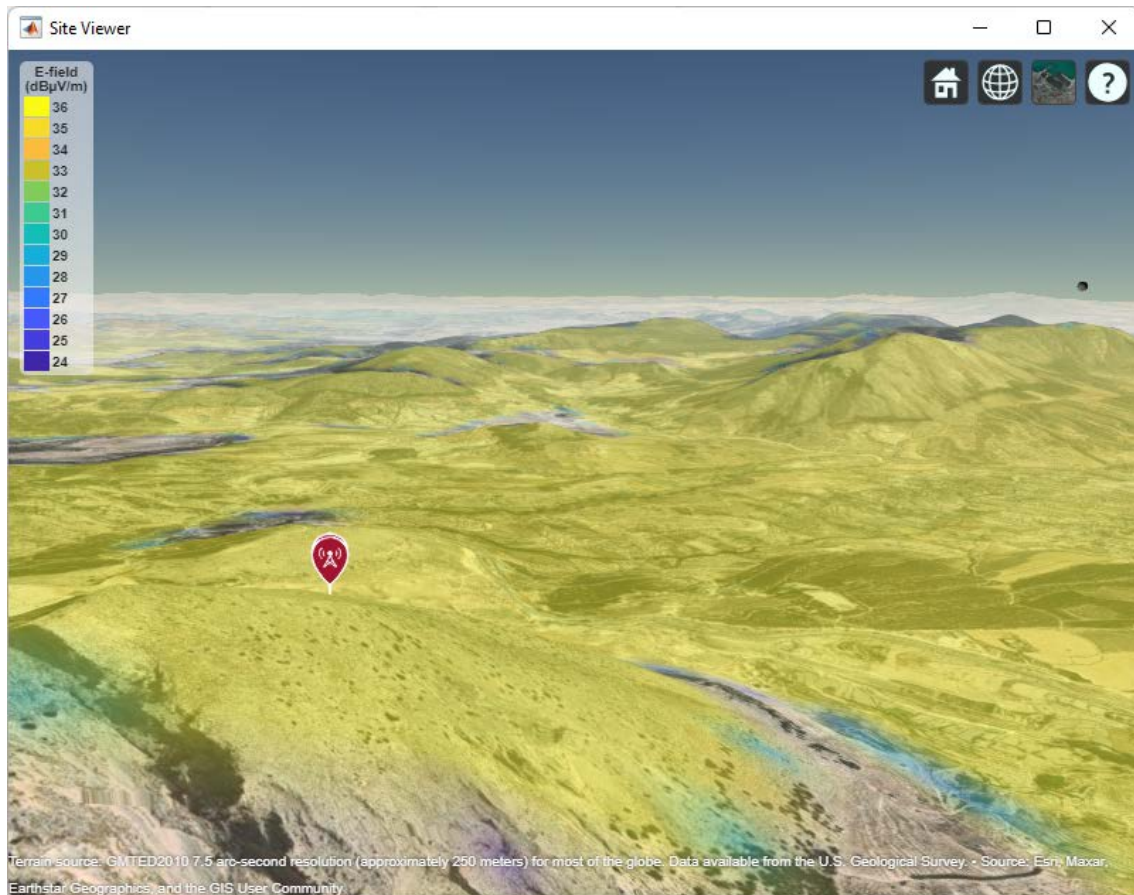


Ilustración 8-19. Imagen del cálculo realizado

5. Latitud y longitud del transmisor.
6. Parámetros para el cálculo de cobertura.
 - Frecuencia de transmisión en Hz
 - Altura de la antena en metros
 - Orientación de la antena en grados
 - Potencia de transmisión en dBm
 - Tipo de antena: omnidireccional o directiva
 - Modelo de propagación: Espacio libre, raytraicing o espacio libre + lluvia.

8.3 Anexo III. Empaquetar aplicación

En este anexo veremos como empaquetar nuestra aplicación para luego poder instalarla como una aplicación de MATLAB.

1. En la parte superior de la interfaz de MATLAB se encuentra una pestaña denominada APPS.



Ilustración 8-20. Pestañas de MATLAB

2. Sobre esa pestaña aparece un icono llamado “Package App”

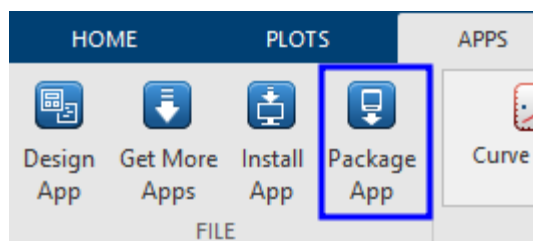


Ilustración 8-21. Package App

3. Se abre una ventana como la siguiente

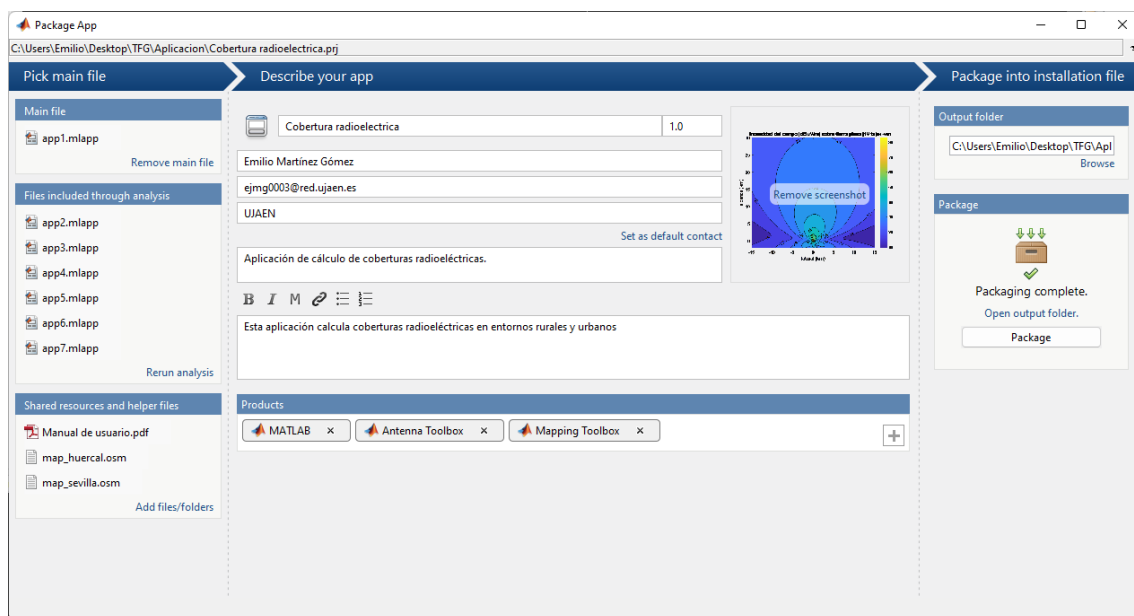


Ilustración 8-22. Interfaz de Package App

Arriba a la izquierda en Main file ponemos la aplicación principal y detecta los archivos u otras aplicaciones necesarias.

Rellenamos los campos de descripción y pulsamos sobre el botón “Package”. Se generará un archivo .mlappinstall y un .prj

8.4 Anexo IV. Requerimientos de la herramienta y guía de instalación

- Requerimientos software:
 - o MATLAB R2020a o superior
 - o Toolbox Mapping
 - o Toolbox antenna
 - o Conexión a internet
 - o Las versiones más recientes de los drivers gráficos disponibles del fabricante de su equipo.
- Requerimientos hardware:
 - o **Procesador.** Se recomienda un procesador Intel o AMD x86-64 con cuatro núcleos lógicos y el soporte al set de instrucciones AVX2
 - o **Espacio en disco.** 3.1 GB sólo para MATLAB y 5-8 GB para una instalación típica. Se recomienda el uso de una unidad de estado sólido (SSD)
 - o **Memoria RAM.** Se recomiendan 8 GB.
 - o **Gráficos.** Se recomienda el uso de una tarjeta gráfica que soporte OpenGL 3.3 con 1 GB de memoria en el GPU.
- Guía de instalación.
 4. En la parte superior de la interfaz de MATLAB se encuentra una pestaña denominada APPS. Ilustración 8-20
 5. Sobre esa pestaña aparece un icono llamado “Install App”

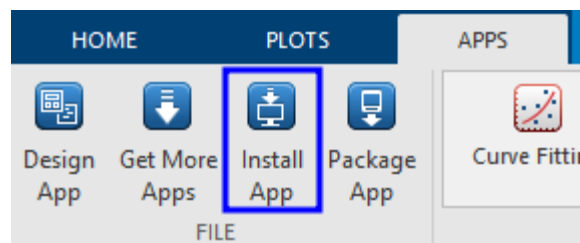


Ilustración 8-23. Install App

6. Seleccionamos el archivo .mlappinstall creado en el punto 8.3. Anexo III.
7. Aparecerá en my Apps

Referencias

- [1] F. A. Sarriá, «Sistemas de Información Geográfica»
- [2] www.openstreetmap.org.
- [3] <http://www.ve2dbe.com/english1.html>.
- [4] Coudé, «<http://www.ve2dbe.com/english1.html>».
- [5] M. M. R. López, : RADIO_MOBILE_DESCRIPCION_Y_BREVES_INSTRUCCIONES_PARA_SU_EMPLEO.
- [6] <https://www.xirio-online.com/web/home/welcome.aspx>.
- [7] geografiainfinita.com.
- [8] «Recomendación ITU-R P.1411-8 (07/2015).».
- [9] «https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-!!!PDF-S.pdf,»
- [10] «ITU-R Recommendation P.526-10,»
- [11] P. J. R. López, «Difracción en obstáculos. Zonas de Fresnel».
- [12] Xirio-online, «Xirio-online,» https://www.xirio-online.com/web/help/es/cost_231.htm.
- [13] F. A. R. Sarria, «Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD,»
- [14] «[mathworks.com](https://es.mathworks.com/products/matlab.html),» <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [15] «Mapping Toolbox™ 3 User's Guide,» www.mathworks.com.
- [16] mathworks, «Antenna Toolbox User's Guide,» 2022.