



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE
PREDICCIÓN DE COBERTURAS RADIOELÉCTRICAS BASADA
EN EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN GUIDE DE MATLAB.**

Autor: Jose Luis Medrán del Río

Tutor: Lorenzo Rubio Arjona

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela
Técnica Superior de Ingenieros de
Telecomunicación de la Universitat Politècnica
de València, para la obtención del Título de
Graduado en Ingeniería de Tecnologías y
Servicios de Telecomunicación

Curso 2015-16

Valencia, 10 de septiembre de 2016

Resumen

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha implementado una herramienta de estimación de coberturas radioeléctricas sobre el entorno de programación GUIDE de MATLAB. La herramienta, denominada MatCover, a partir de la introducción de los parámetros que caracterizan al transmisor (Tx) y receptor (Rx) permite obtener determinados resultados: pérdidas punto a punto (PTP), mapas de cobertura zonal, cálculo de relación portadora a interferencia (CIR, Carrier-to-Interference) y mapas de mejor enlace (best server), así como la estimación de potencia recibida a lo largo de un recorrido concreto definido previamente.

En esta versión inicial, MatCover tiene implementados los modelos de propagación de Okumura-Hata y Xia Bertoni, junto con el diagrama de radiación de diferentes antenas típicas utilizadas en los sistemas de radiocomunicaciones. La gran ventaja de MatCover frente a otras herramientas comerciales es la posibilidad de que el usuario pueda introducir su propio modelo de propagación y los diagramas de las antenas a emplear en el Tx y Rx. Esto se ha conseguido siguiendo una programación modular de modo que el usuario solo debe escribir el código de su modelo en base a unos parámetros de entrada que tienen en cuenta el perfil entre Tx y Rx y que son proporcionados por MatCover según el modelo digital del terreno (MDT).

MatCover ha sido diseñada y programada para conseguir una interfaz sencilla e intuitiva para el usuario, facilitando así su uso. Los resultados generados por MatCover pueden ser guardados para un posterior análisis o visionado en la aplicación Google Earth.

Resum

En el present Treball Fi de Grau (TFG) s'ha implementat una eina d'estimació de cobertures radioelèctriques sobre l'entorn de programació GUIDE de MATLAB. L'eina, denominada MatCover, a partir de la introducció dels paràmetres que caracteritzen al transmissor (Tx) i receptor (Rx) permet obtenir determinats resultats: pèrdues punt a punt (PTP), mapes de cobertura zonal, càlcul de relació portadora a interferència (CIR, Carrier-to-Interference) i mapes de millor enllaç (best server), així com l'estimació de potència rebuda al llarg d'un recorregut concret definit prèviament.

En aquesta versió inicial, MatCover té implementats els models de propagació de Okumura-Hata i Xia Bertoni, juntament amb el diagrama de radiació de diferents antenes típiques utilitzades en els sistemes de radiocomunicacions. El gran avantatge de MatCover enfront d'altres eines comercials és la possibilitat que l'usuari pugui introduir el seu propi model de propagació i els diagrames de les antenes a emprar en el Tx i Rx. Açò s'ha aconseguit seguint una programació modular de manera que l'usuari solament ha d'escriure el codi del seu model sobre la base d'uns paràmetres d'entrada que tenen en compte el perfil entre Tx i Rx i que són proporcionats per MatCover segons el model digital del terreny (MDT).

MatCover ha sigut dissenyada i programada per a aconseguir una interfície senzilla i intuïtiva per a l'usuari, facilitant així el seu ús. Els resultats generats per MatCover poden ser guardats per a una posterior anàlisi o visionat en l'aplicació Google Earth.

Abstract

In this final thesis, a radio electric coverage estimation tool has been implemented using GUIDE, a programming environment that belongs to MATLAB. The tool, named MatCover, from the introduction of characteristic parameters of the transmitter (Tx) and the receiver (Rx) is able to obtain certain results: Point to Point losses (PTP), zonal coverage maps, Carrier to Interference Ratio (CIR) and best server maps, as well as the estimation of the received power along a route defined by the user.

In this initial version, MatCover has implemented the propagation models of Okumura-Hata and Xia-Bertoni, along with the radiation pattern of some typical antennas used in radio telecommunication systems. The biggest advantage of MatCover versus others commercial tools

is the possibility that the user can introduce his own propagation models and radiation patterns to use in the Tx and Rx. This has been achieved following a modular programming so that the user only has to write the code of his model based on some input parameters that take into account the Tx-Rx profile and that are proportioned by MatCover according to the digital elevation model (DEM).

MatCover has been designed and programmed to accomplish an intuitive and simple interface for the user, facilitating its use. The results generated by MatCover can be saved for later analysis or viewing in Google Earth.

Índice

Capítulo 1. Introducción, objetivos y estructura del TFG.....	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura de la memoria.....	10
1.4 Estructura del trabajo	11
Capítulo 2. Planificación del sistema y modelos de propagación.	12
2.1 Fases de la planificación	12
2.1.1 Caracterización del canal radio	12
2.1.2 Desarrollo de una solución basada en software de predicción	13
2.1.3 Medidas sobre la zona a dimensionar.....	14
2.1.4 Optimización de la solución.....	14
2.2 Modelos de propagación	14
2.2.1 Introducción a los modelos de propagación	14
2.2.2 Clasificación de los modelos de propagación	15
Capítulo 3. Funcionamiento de MatCover.....	18
3.1 Introducción	18
3.2 Funciones de la herramienta.....	19
3.2.1 Cargar mapa	20
3.2.2 Mostrar perfil Tx-Rx	21
3.2.3 Distancia.....	22
3.2.4 Guía.....	23
3.2.5 Selección de parámetros.....	23

3.2.6 Funciones de visionado	24
3.2.7 Funciones de cálculo de cobertura	26
Capítulo 4. Conclusiones y futuras ampliaciones del trabajo.....	32
Anexo I. Modelos de propagación implementados en MatCover	33
Okumura-Hata.....	33
Xia-Bertoni.....	34
Anexo II. Diseño de diagramas de radiación	38
Anexo III. Guía de usuario MatCover.....	43
Bibliografía	67

Capítulo 1. Introducción, objetivos y estructura del TFG

1.1 Introducción

En los últimos años la planificación de las redes se ha convertido en un aspecto muy importante a la hora del desarrollo e implementación de las redes de telecomunicaciones, siendo esta fase una de las más importantes ya que de hacerse óptimamente simplificará la fase de implementación sobre el terreno suponiendo un ahorro importante en el presupuesto final del proyecto.

Por este motivo, desde el 2000, con la llegada de Atoll al mercado, al tiempo actual se han desarrollado diversas herramientas destinadas a tratar con esta fase de desarrollo de una red de telecomunicación. Atoll es una plataforma de diseño y optimización de redes inalámbricas, fue de las primeras herramientas diseñadas y ha ido evolucionando con el paso del tiempo convirtiéndose en una de las mejores *suites* de radioplanificación. Se trata de una herramienta muy completa de fácil uso, en sus últimas versiones se ha añadido la posibilidad de combinar las medidas sobre el terreno con las dadas por modelos de propagación para optimizar una red de telecomunicación. Hay más herramientas de predicción de coberturas disponibles para el público como pueden ser ICS de ATDI, ASSET de TEOCO, Planet de InfoVista... Como vemos, se está llenando un mercado el cual hace apenas 15 años no contaba nada más que con Atoll. La más completa a día de hoy sería la *suite* de ICS, que cuenta con infinidad de posibilidades para el usuario profesional, Atoll sería una opción recomendada para un usuario menos exigente, siendo las dos excelentes opciones.

Además, en los últimos años se está observando un incremento de las herramientas de predicción online, permitiendo a los usuarios realizar mediciones sin necesidad en algunos casos de pagar los elevados costes de las licencias que presentan este tipo de aplicaciones, ya que en la mayoría de los casos esta solución es gratis o únicamente se paga por análisis realizado. Otra ventaja de estas herramientas es que el usuario no necesita de un equipo potente y caro ya que los cálculos se realizan en los servidores de los proveedores del análisis. Dos ejemplos de estas aplicaciones que se encuentran en auge son CloudRF y “Xirio-online”, además los proveedores de *software* tradicionales también están añadiendo esta opción a su oferta como es el caso de ICS y su posibilidad de hacer cálculos en la nube.

Con el desarrollo de este trabajo, de nuestra herramienta MatCover, no pretendemos competir con estos programas de planificación, ya que, para lograrlo, no bastaría con una sola persona ni con un solo cuatrimestre de trabajo. Nuestro propósito con este TFG es el de diseñar una herramienta de estimación de coberturas que permita al usuario incorporar sus propios modelos de propagación y diagramas de radiación, ya que estos dos aspectos vienen completamente restringidos en los programas de radioplanificación a los implementados de serie.

MatCover tiene como finalidad predecir coberturas radioeléctricas sobre el terreno, obteniendo una primera aproximación ante un posible dimensionamiento de una red de comunicación. La herramienta que se ha confeccionado se basa en la estructura de los SIG (Sistemas de Información geográfica), que permiten la obtención, almacenamiento, manipulación, análisis y gestión de todo tipo de datos de cualquier índole: económicos, sociales, demográficos... procedentes del estudio de diversas disciplinas y que se encuentran vinculados a una referencia espacial con el objetivo de ayudarnos en la toma de decisiones, estas decisiones en el caso de MatCover englobarían la predicción de la cobertura producida por unas antenas sin necesidad de tener que instalarlas en primer lugar, lo cual es muy importante en una primera fase de

aproximación a la hora de dimensionar ciudades, ya que como ya se ha comentado, si se parte de un buen primer acercamiento, esto concurrirá en un importante ahorro económico y de tiempo. MatCover se diferencia de los SIG tradicionales en que nos hemos enfocado en las comunicaciones en su totalidad, si bien se pueden importar datos del terreno provenientes de estos.

A la hora de diseñar esta herramienta de predicción de coberturas la primera decisión que se tuvo que tomar es sobre que *software* o lenguaje de programación realizar la implementación. Para responder a esta cuestión se reflexionó sobre el tipo de datos que se iban a utilizar en los distintos cálculos a realizar, llegando a la conclusión de que el software que debía ser usado debería ser uno que permitiese un manejo completo de matrices de datos, ya que serán los principales elementos que configuren el cálculo de coberturas. Bajo esta premisa se llegó a la conclusión de que la mejor opción se trata de la plataforma MATLAB. Esto se debe a que MATLAB es una herramienta que simplificándola mucho, trabaja principalmente con matrices, lo que nos permitirá un mejor control sobre el procesado de los datos. Además cuenta con la ventaja de estar ampliamente extendida por las universidades y ser una de las herramientas más recurridas a la hora de realizar distintas operaciones complejas debido a su enorme versatilidad, abarcando no sólo el mundo de las matemáticas, sino que gracias a la inclusión de diversos *toolbox* la experiencia del usuario se amplía enormemente. Por todo esto decidimos que el uso de MATLAB era la mejor opción a la hora de acometer este proyecto. Dentro de MATLAB elegimos la última versión disponible a la hora de realizar este trabajo, la versión 2016a, por lo que existe la posibilidad de que alguna versión anterior presente algún tipo de incompatibilidad. Elegimos esta versión por ser la última disponible y por introducir una serie de funciones que facilitan la programación.

Volviendo al desarrollo de MatCover, la estructura de los entornos sobre los que realizamos los cálculos de cobertura se encuentran en formato *raster*, es decir, la zona de estudio se divide en celdas rectangulares, cada una con un único valor de altura que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Estos valores son almacenados en matrices que posteriormente serán utilizadas por MatCover con el objetivo de predecir la cobertura recibida en cada celda. A la hora de dimensionar una zona, se debe buscar un compromiso entre precisión y tiempo de computación, ya que un mayor número de celdas nos otorga mayor precisión, pero también hace que los tiempos de ejecución aumenten exponencialmente.

A la hora de confeccionar MatCover, la elección del tipo de datos sobre los que trabajar fue un punto de inflexión, ya que condicionaría el resto del trabajo. Se eligió el formato *raster* por varios motivos, en primer lugar, se trata de un estándar en los SIG, lo cual nos favorece a la hora de encontrar mapas, ya que estamos hablando de un estándar maduro que cuenta con soporte de infinidad de comunidades. Por otra parte, se adecua perfectamente a nuestras necesidades, la distribución en matrices de los datos es un aspecto que nos facilitará enormemente el procesado de los datos a través de Matlab. La simplicidad y la velocidad de ejecución son otros factores que nos hicieron decantarnos por este formato.

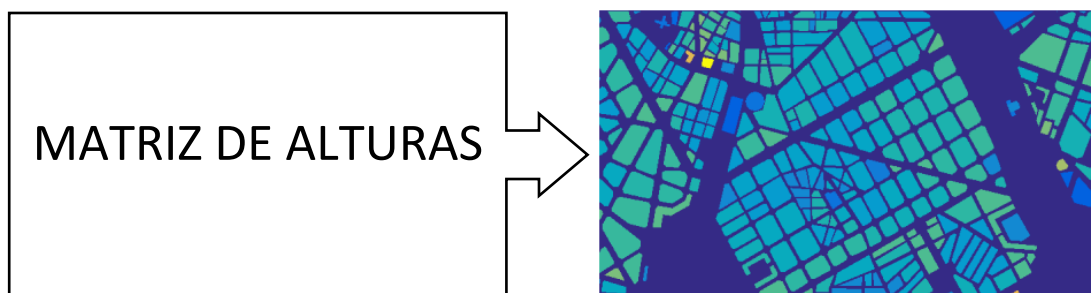


Figura 1. Representación de una ciudad en formato raster.

Para que MatCover sea capaz de ofrecer una estimación de la cobertura radioeléctrica además de la información del entorno son necesarios otros datos que deben ser introducidos por el usuario previamente como pueden ser entre otros: la potencia transmitida, las ganancias de transmisor y receptor o el modelo de propagación con el que se van a realizar los cálculos. También se ofrece la posibilidad de cargar distintos tipos de antenas previamente diseñadas que se registrarán a un formato específico, esto lo vemos en detalle en el *Anexo I*.

Antes de continuar con el proceder de MatCover, nos gustaría dejar constancia que la herramienta desarrollada ha sido elaborada de tal manera que es fácilmente ampliable en un futuro con nuevas funcionalidades. De la misma manera la implementación de nuevos modelos de propagación no supone ningún problema ni debería acarrear ninguna modificación en el código base de MatCover, ya que en su desarrollo se han tenido en cuenta estas posibles futuras ampliaciones.

En la siguiente figura observamos de manera esquemática el proceder de MatCover a la hora de realizar cualquier tipo de cálculo.

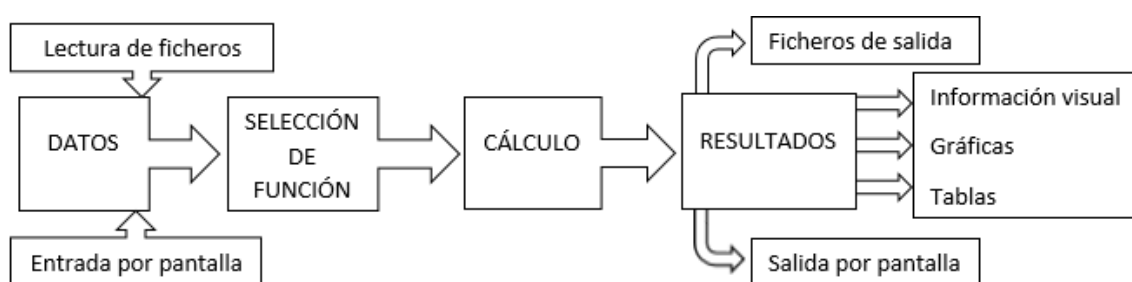


Figura 2. Esquema de funcionamiento.

Podemos observar en esta figura la estructura modular que presenta MatCover que tiene el objetivo de facilitar futuras modificaciones o ampliaciones sin necesidad de alterar el código base.

Dicho esto, una vez que MatCover posee los datos necesarios, el usuario puede elegir entre una serie de funciones que explicaremos brevemente a continuación y que serán explicadas en mayor detalle en un futuro capítulo:

- **Distancia.** Se trata del cálculo más básico de nuestra herramienta. Nos devuelve la distancia entre dos puntos en el mapa cargado.
- **Mostrar Perfil Tx-Rx.** Nos muestra el perfil existente entre el transmisor y el receptor.
- **PTP.** Calcula la potencia recibida sobre un único receptor.
- **Zona.** Se trata de la extensión directa de la función PTP. Nos devuelve el nivel de potencia recibida en una zona designada por el usuario.
- **Mejor enlace.** Nos devuelve el mejor transmisor de entre una serie de posibles transmisores para un receptor específico o una zona designada por el usuario.
- **CIR.** *Carrier Interference Ratio*, calcula el nivel de portadora a interferente sobre una zona.
- **Recorrido.** Sobre un recorrido introducido previamente por el usuario, MatCover nos devuelve la potencia recibida en función de la distancia recorrida.
- **Google Earth.** Nos permite visualizar resultados previamente guardados sobre Google Earth.
- **Mapa 3D.** Se trata de una visualización del mapa de trabajo en una nueva figura en 3 dimensiones.

En la siguiente figura podemos apreciar la vista de la ventana inicial de MatCover.

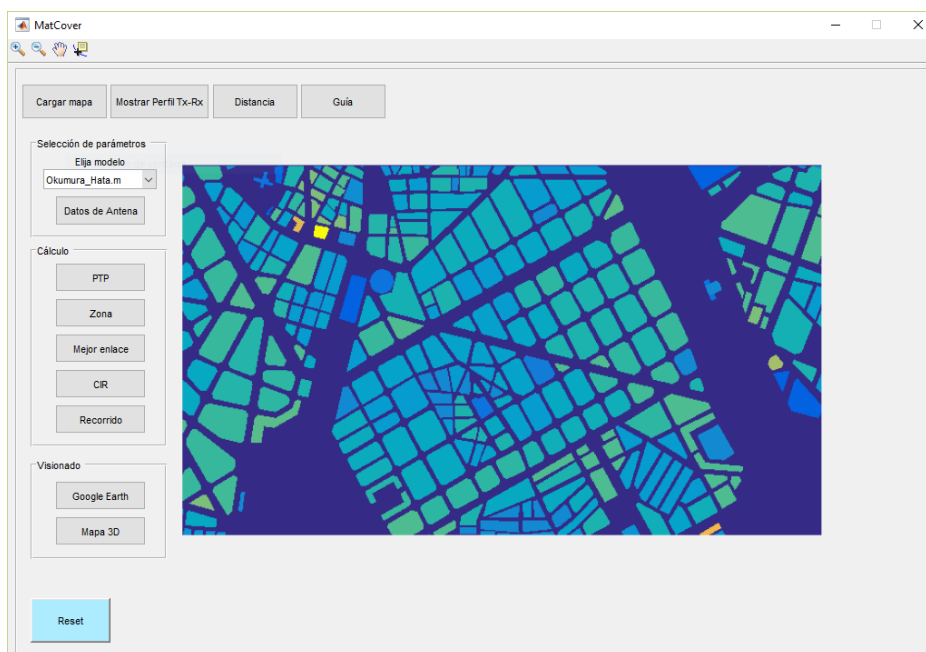


Figura 3. Ventana inicial de MatCover.

Cómo podemos observar en la figura anterior, además de los botones referidos a los cálculos mencionados anteriormente, se aprecian otros botones que ayudan a mejorar la experiencia de usuario como pueden ser el botón “Reset”, que nos devuelve a la ventana inicial cuando queramos hacerlo, el botón “Guía”, que nos ofrece una detallada guía de usuario que es recomendable leerse la primera vez que se ejecuta MatCover. En la parte superior encontramos también una barra de herramientas que cuenta con *zoom*, arrastre y cursor, con el objetivo de facilitar el visionado de los resultados sobre el mapa. Además observamos un panel de parámetros del sistema como son el modelo de propagación y el diagrama de radiación de la antena.

En resumen, durante este trabajo hemos desarrollado una herramienta capaz de predecir coberturas radioeléctricas confiriéndola de una estructura modulada que facilitaría su posterior trabajo con la herramienta a nivel de programación. MatCover se basa en el uso de entornos de tipo raster y de modelos de propagación para realizar los cálculos, los cuales son de fácil implementación sin necesidad de modificar el código base para crear nuevos modelos.

1.2 Objetivos

El objetivo principal que se ha perseguido con el desarrollo de este TFG es la creación de una herramienta de predicción de coberturas radioeléctricas destinada al uso académico, con este objetivo en mente a la hora de desarrollar MatCover nos hemos guiado por una serie de bases u objetivos secundarios los cuales se enumeran a continuación:

1. **Accesibilidad al usuario.** Para hacer uso de nuestra herramienta el usuario no debe comprar un costoso paquete de herramientas característico de los SIG o de las otras posibilidades que se encuentran en el mercado. Además, MATLAB se encuentra disponible en los principales sistemas operativos, Windows, Mac y Linux, haciendo que nuestra herramienta sea ejecutable por prácticamente cualquier usuario que lo desee sin necesidad de realizar grandes modificaciones en su sistema.

2. **Simplicidad.** Eliminando todas las funciones inherentes a los SIG y centrándonos en un grupo de aplicaciones en concreto logramos disminuir el grado de dificultad de uso de la herramienta. Esto se pone aún más de manifiesto con el diseño de una interfaz sencilla y concisa que aúna en una sola ventana todas las posibles aplicaciones.
3. **Concreción.** Si simplificamos y cercamos el rango de aplicaciones conseguimos además de disminuir el grado de dificultad aumentar el grado de enfatización en lo que a nosotros de verdad nos importa.
4. **Estructura moduable.** Cómo ya hemos dicho la herramienta debe permitir ampliaciones (modelos de propagación, nuevas funciones...) sin necesidad de alterar el código base de la aplicación.
5. **Visualización sobre Google Earth.** La visualización de los resultados sobre una de las más importantes aplicaciones de mapas es tiene como base el agrandar al usuario y facilitar su comprensión de los resultados al verlos directamente sobre una vista satelita.

1.3 Estructura de la memoria

Una vez presentadas tanto la introducción como los objetivos de este trabajo, en los siguientes capítulos desarrollamos con más detalle MatCover, explicando tanto su base teórica como su funcionamiento y estructura interna.

El capítulo 2 ofrece una explicación teórica sobre todo lo que está detrás de una herramienta como MatCover. En primera instancia desarrollamos el concepto de planificación de un sistema de telecomunicación y sus fases para finalizar señalando la historia de los modelos de propagación así como su definición y categorización aportando algunas directrices de la ITU-R a la hora de clasificar los tipos de entorno de propagación.

En el capítulo 3 nos centramos en el desarrollo y explicación del funcionamiento de MatCover y de todas sus funciones de manera individual.

En el capítulo 4 finalizamos el trabajo aportando las conclusiones finales y las posibles futuras ampliaciones que creemos que se podrían aplicar a MatCover en un futuro.

Además de estos capítulos presentamos tres anexos que facilitarán el uso y ampliarán las posibilidades del usuario. El Anexo I explica cómo se realizan nuevos diagramas de radiación compatibles con MatCover, desarrollando cuál es su estructura y aportando un ejemplo que servirá como base para el usuario. El anexo II presenta una detallada guía de usuario que recomendamos que lea el usuario antes de usar MatCover por primera vez. El anexo III desarrolla los modelos de propagación introducidos en MatCover, Okumura-Hata y Xia Bertoni.

1.4 Estructura del trabajo

El desarrollo del trabajo ha sido dividido en fases con el objetivo de optimizar tiempos y lograr una correcta realización del mismo. Las fases que se han llevado a cabo a lo largo del trabajo tras tomar la decisión de llevarlo a cabo han sido:

1. **Familiarización con GUIDE de MATLAB.** Este entorno se trataba de un sector desconocido para nosotros. Este periodo comenzó en febrero de 2016 y se dilató un mes hasta que tuvimos la confianza de acometer el desarrollo de la herramienta MatCover.
2. **Desarrollo de una primera versión de MatCover.** En este estadio la herramienta contaba con muchos errores que imposibilitaba el uso fluido del usuario de MatCover. Desde marzo hasta mayo de 2016 nos encargamos de esta fase de aproximación a los resultados finales.
3. **Programación de modelos de propagación y modulación de la herramienta.** En junio decidimos dejar de lado el pulido de errores y nos dedicamos a la programación del modelo Okumura-Hata y Xia-Bertoni y de aportar versatilidad a la herramienta, modulando sus diferentes partes y creando un formato para la creación de diagramas de radiación.
4. **Depuración, pulido de código y adición de funcionalidades extra.** El objetivo era presentar el trabajo en julio, sin embargo, tomamos una decisión conjunta con nuestro tutor y decidimos que era mejor concentrarnos en realizar un buen trabajo y presentarlo en septiembre. Por lo que a finales de junio y durante el mes de Julio acometimos el trabajo de pulir el código, depurar errores y añadir alguna funcionalidad que habíamos dejado pendiente, como la visión de resultados en Google Earth.
5. **Desarrollo de la memoria.** Una vez finalizada la parte de programación de MatCover, los días restantes de julio y agosto entero fueron dedicados a la elaboración de la presente memoria. Con la finalización de la misma damos por finalizado el TFG.

	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
1	⊕ ⊕ ⊕ ⊕						
2		⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕					
3					⊕ ⊕ ⊕		
4						⊕ ⊕ ⊕ ⊕	
5							⊕ ⊕ ⊕ ⊕

TABLA 1 Estructuración temporal del trabajo

Capítulo 2. Planificación del sistema y modelos de propagación.

2.1 Fases de la planificación

Para el despliegue de una red de telefonía móvil la planificación y el dimensionamiento del acceso radio se convierten en elementos fundamentales a tener en cuenta por el operador, ya que de su correcta elaboración depende el nivel de inversión en el proyecto final, así como la disminución de posibles imprevistos durante el despliegue de la red.

La planificación de una red de telefonía móvil se puede dividir en varias fases:

1. Caracterización del canal radio.
2. Desarrollo de una solución basada en *software* de predicción.
3. Medidas sobre la zona a dimensionar.
4. Optimización de la solución.

Estos son los principales pasos que siguen los operadores a la hora de dimensionar una nueva red, estas etapas son dependientes entre sí por lo que se han de realizar en orden sin excluir ninguna de ellas con el fin de lograr un resultado óptimo.

A continuación, procederemos a explicar en detalle cada una de estas etapas.

2.1.1 Caracterización del canal radio

Cuando hablamos del canal radio [2] nos referimos al medio que hay entre el transmisor y el receptor, este medio no es perfecto, sino que presenta obstáculos que influyen en la propagación de la señal provocando que en el camino entre el transmisor y el receptor haya reflexiones, refracciones, difracciones y dispersiones. Estos fenómenos influyen en la calidad de la señal y dificultan enormemente el correcto análisis del canal ya que en su mayoría estos fenómenos son extremadamente aleatorios lo que implica que su modelación sea un hecho más estadístico que determinista.

De este modo, las condiciones ideales de propagación se ven alteradas en la mayoría de los casos por las características eléctricas de la superficie de la Tierra, así como de su geografía y atmósfera heterogénea que implican que la propagación en espacio libre sea un hecho solamente aplicable teóricamente al vacío. En la realidad, con el objetivo de facilitar cálculos y ya que las variaciones pueden ser asumibles se suele tomar como propagación en espacio libre al trayecto libre de obstáculos entre el emisor y el receptor.

Las pérdidas de propagación [3] que se producen sobre cualquier trayecto se definen por:

$$P_L(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r}$$

Siendo P_t la potencia transmitida y P_r la potencia recibida.

En el caso de que exista LOS (*line of sight*), es decir, propagación en espacio libre, la potencia recibida se puede aproximar con bastante exactitud por:

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) + K(dB) - 10\gamma \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right]$$

Donde:

- K es una constante adimensional que depende de las características de la antena y las pérdidas por espacio libre hasta la distancia d_0 .
- Los valores típicos para d_0 son 1m para entornos *indoor* y de entre 100m y 1km para entornos al aire libre.
- Empíricamente, la relación entre la potencia media recibida y la distancia es determinada por la expresión anterior, donde γ es denominado exponente de *pérdidas de propagación*. Los valores típicos de γ son:

Entorno	Exponente de <i>Path Loss</i> , γ
Espacio Libre	2
Área urbana	2.7 a 3.5
Área suburbana	3 a 5
Indoor (LOS)	1.6 a 1.8

TABLA 1 Exponente γ en función del entorno [3]

Los mecanismos básicos de propagación [2] en las comunicaciones radio son: refracción, reflexión, dispersión y difracción. Estos no son fenómenos aislados si no que suelen ocurrir conjuntamente en las radiocomunicaciones y son enormemente importantes en las radiocomunicaciones ya que permiten que la cobertura no se limite únicamente a la visión directa entre transmisor y receptor ampliando el alcance en cuotas muy elevadas.

En entornos urbanos, es común la presencia de propagación multicamino [2]. En cualquier comunicación terrestre, la señal llegará al receptor no sólo por la vía directa, sino también como resultado de múltiples reflexiones de obstáculos como pueden ser edificios, montañas, suelo, agua, etc. que se encuentran adyacentes al camino principal.

La señal total que recibe el receptor será el sumatorio de todas las señales recibidas. Como cada una tendrá unas características propias de distancia al receptor y velocidad relativa, las señales se sumarán o restarán atendiendo a sus fases relativas. Este fenómeno da lugar al desvanecimiento multicamino. Además, esta diferencia de tiempos de llegada al receptor provocada por las diferentes distancias al mismo, puede llegar a provocar ISI [2] (*Intersymbol interference*), es decir, el receptor puede llegar a no ser capaz de diferenciar los estados que le han sido transmitidos debido al solapamiento espectral.

2.1.2 Desarrollo de una solución basada en software de predicción

Nuestra herramienta se ha diseñado con el fin de responder a esta fase de la planificación. En este punto se trata de crear una herramienta automatizada (o hacer uso de una ya existente) capaz de aplicar los modelos teóricos sobre zonas de interés con el objetivo de obtener una predicción del nivel de señal que podríamos obtener. Hay que entender que el resultado obtenido es sólo una aproximación y su precisión dependerá del modelo escogido, es decir, de las variables que se hayan tenido en cuenta a la hora de realizar los cálculos.

Más tarde dedicaremos un capítulo a explicar las características de los principales modelos de predicción que hay y explicaremos en detalle los que hemos implementado de serie en nuestra aplicación. De forma general, se podría decir que la precisión de un modelo de propagación depende directamente de la cantidad de variables involucradas, es decir, los modelos

más complejos serán más precisos, pero también serán más exigentes computacionalmente hablando.

2.1.3 Medidas sobre la zona a dimensionar

Los datos obtenidos sobre el terreno son fundamentales a la hora de determinar potenciales obstáculos para el nivel de señal que no estaban presentes en los mapas de la zona de estudio y por lo tanto no han sido tenidos en cuenta por la herramienta utilizada.

También es necesario obtener medidas de las zonas que a priori son más propensas a tener problemas de cobertura, como pueden ser los límites entre las celdas. Los datos obtenidos en esta fase serán de gran utilidad para la última fase de la planificación de una red de telecomunicaciones.

2.1.4 Optimización de la solución

Una vez tenemos los datos obtenidos por los modelos de simulación y por las medidas realizadas sobre el terreno es hora de finalizar el diseño de la red de telecomunicación. La base del diseño será el resultado obtenido por la simulación y su modificación dependerá de los datos obtenidos por las mediciones sobre el terreno, estos ajustes se suelen realizar basándose en la experiencia y en la intuición del grupo diseñador. Sin embargo, los últimos avances en *software* de predicción contemplan la posibilidad de añadir estas medidas al modelo de simulación para obtener una optimización automática teniendo en cuenta los datos que se han obtenido mediante mediciones. Estas innovaciones se pueden observar en las *suites* de Atoll e ICS.

2.2 Modelos de propagación

Los modelos de propagación hacen referencia a una serie de algoritmos y experiencias documentadas que aplicados por separado o conjuntamente permiten definir con cierta exactitud las pérdidas de propagación existentes entre transmisor y receptor en un ambiente dado.

2.2.1 Introducción a los modelos de propagación

Históricamente [1] podemos observar una evolución en la aplicación de los modelos de propagación observando una clara progresión tanto a nivel de precisión como de complejidad.

Los primeros modelos de propagación datan de los años 60 y se caracterizaban por ser aplicables sobre áreas rurales o grandes zonas de cobertura sin la reutilización de frecuencias. Eran métodos empíricos basados en medidas realizadas principalmente sobre EEUU y Japón. Los modelos más representativos de esta corriente son: los Ábacos de Bullington, el modelo de Okumura y las primeras curvas de propagación propuestas por el CCIR (UIT-R P.1546).

Alrededor de los años 70 surgieron los primeros modelos informatizados que diferenciaron entre zonas rurales y zonas urbanas. En el caso de las zonas rurales se basaron en el estudio y aplicación de los perfiles del terreno sobre algoritmos de predicción con el objetivo de modelar la propagación, pertenecen a esta categoría los modelos de Egli, Longley y el método Rice. Para las áreas urbanas el modelo más empleado fue el de Okumura-Hata, basado en las curvas de propagación de Okumura. Otro modelos de esta época que mejoraron el de Hata son los de: Allsebrook y Parsons; Ibrahim y Parsons; Ikegami y el de Walfisch-Bertoni.

La segunda generación de métodos informatizados se caracteriza en el caso de las zonas rurales por el uso de Bases de Datos del Terreno (BDT o GIS) que proporcionan resultados de cobertura que se imprimen sobre los propios mapas. Para zonas urbanas se emplean procedimientos semiempíricos basados en BDT de ciudades. El ejemplo más representativo de esta etapa es el COST 231 Walfisch-Ikegami.

Finalmente surgen métodos físicos y empíricos usados en entornos microcelulares y de interiores basados en la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD) en la que se requiere un gran volumen de información obtenida de las BDT de ciudades y planos de edificios, y que sean lo bastante precisos (ya que si no lo son los errores son del orden de una zona de cobertura).

2.2.2 Clasificación de los modelos de propagación

Tal y como observamos en la figura 4, existen muchas posibles clasificaciones de los métodos de propagación en función del ambiente de propagación, el área de cobertura o el origen de los datos.

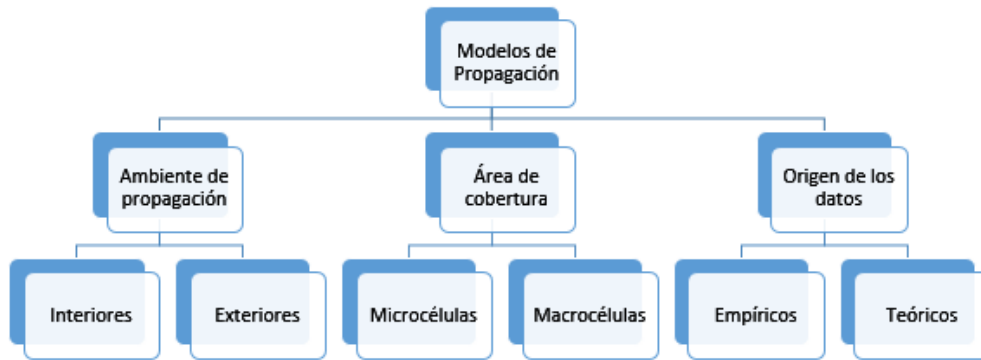


Figura 4. Clasificación básica de modelos de propagación.

La clasificación más extendida tiene en cuenta el origen de los datos y diferencia entre empíricos y teóricos. Los modelos empíricos se basan en mediciones realizadas sobre el terreno que posteriormente son procesadas en forma de fórmulas matemáticas que son aplicables a entornos de características similares como es el caso de las curvas de Okumura. Los modelos teóricos se basan en la aplicación directa de la física sobre toda la información posible relativa a las ciudades o entornos en los que serán aplicados. Ambos tipos tienen sus ventajas e inconvenientes, en el caso de los modelos empíricos tienen la ventaja de tener un amplio rango de aplicación, proporcionar bastante exactitud y ser relativamente sencillos de computar. La mayor dificultad que presenta este tipo de modelos radica en la obtención de los datos sobre los que se desarrollará el modelo. En cuanto a los modelos teóricos, se tratan de modelos extremadamente exactos pues aplican directamente las teorías físicas, pero por contrapartida son computacionalmente muy exigentes. Por ello existe una tercera vertiente en esta categoría de clasificación que engloba a los modelos que llamamos semiempíricos, que buscan el compromiso entre aplicar las leyes físicas y el procesamiento de datos experimentales.

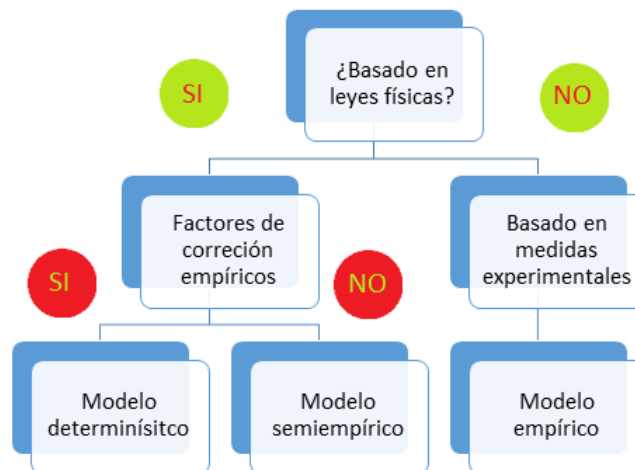


Figura 5. Clasificación del modelo de propagación según origen.

Como ya hemos comentado previamente, la propagación de las ondas radioeléctricas raramente se produce en un entorno aislado e ideal, sino que en la mayoría de los casos el entorno por el que se propagan las ondas se encuentra obstaculizado por la presencia de obstáculos fijos o móviles. La ITU-R [4] en su recomendación P.1411-8 (07/2015) identifica cinco entornos distintos que considera los más habituales y reconoce que cada categoría involucra a una amplia variedad de posibles entornos estableciendo que el objetivo es ofrecer modelos de propagación que sean representativos de los entornos más frecuentes. La Tabla 2 enumera los cinco entornos.

Entorno	Descripción y degradaciones de la propagación significativas
Urbano de construcción muy alta	<ul style="list-style-type: none"> – Valle urbano profundo con una gran actividad, caracterizado por avenidas con edificios de alta densidad y varias decenas de pisos, hecho que da como resultado un valle urbano profundo – Los edificios de alta densidad y los rascacielos se alternan, hecho que da como resultado trayectos de propagación con abundante dispersión sin visibilidad directa – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de retardos muy largos de trayecto – El tráfico intenso y el elevado flujo de visitantes en la zona actúan como reflectores, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas – Los árboles y las calles proporcionan un ensombrecimiento dinámico
Urbano de construcción alta	<ul style="list-style-type: none"> – Valle urbano, caracterizado por avenidas con edificios altos de varios pisos – La altura de los edificios reduce la probabilidad de una contribución significativa de la propagación que pasa por encima de los tejados – Las hileras de edificios altos hacen posible la existencia de largos retardos de trayecto – El gran número de vehículos en movimiento en la zona actúa como reflector, lo que añade una deriva Doppler a las ondas reflejadas
Urbano de construcción baja/Suburbano	<ul style="list-style-type: none"> – Típicamente calles anchas – Las alturas de los edificios suelen ser inferiores a tres pisos, lo que hace probable la difracción por los tejados – Pueden producirse en ocasiones reflexiones y ensombrecimientos producidos por los vehículos en movimiento – Los efectos principales son: retardos grandes y pequeñas derivas Doppler
Zona residencial	<ul style="list-style-type: none"> – Construcciones de uno y dos pisos – Las calles suelen ser de doble dirección con vehículos estacionados a ambos lados – Es posible que haya vegetación densa a ligera – Tráfico motorizado generalmente ligero
Rural	<ul style="list-style-type: none"> – Pequeñas casas rodeadas de amplios jardines – Influencia de la altura del terreno (topografía) – Posibilidad de vegetación densa a ligera – Tráfico motorizado ocasionalmente elevado

TABLA 2 Entornos de funcionamiento físico – Degradaciones de la propagación [4]

Para cada uno de los cinco entornos distintos la ITU-R considera dos escenarios posibles de los móviles. De esta manera, se dividen los usuarios según se trate de peatones o de vehículos. Para estas dos aplicaciones la velocidad del móvil es bastante distinta, dando lugar a derivas Doppler diferentes. La Tabla 3 muestra velocidades típicas para estos escenarios.

Entorno	Velocidad de los usuarios peatonales (m/s)	Velocidad de los usuarios en vehículos
Urbano de construcción muy alta/ Urbano de construcción alta	1,5	Velocidades típicas del centro de la ciudad del orden de 50 km/h (14 m/s)
Urbano de construcción baja/ Suburbano	1,5	Unos 50 km/h (14 m/s) En autopistas hasta 100 km/h (28 m/s)
Residencial	1,5	Unos 40 km/h (11 m/s)
Rural	1,5	80-100 km/h (22-28 m/s)

TABLA 3 Entornos de funcionamiento físico – Velocidad típica del móvil [4]

El tipo de mecanismo de propagación predominante depende también de la altura de la antena de la estación de base con relación a los edificios circundantes. La Tabla 4 enumera los tipos de células típicos en la propagación en exteriores de trayecto corto.

Tipo de célula	Radio de la célula	Posición típica de la antena de la estación de base
Microcélula	0,05 a 1 km	Exteriores; montada por encima del nivel medio de los tejados; las alturas de algunos edificios circundantes pueden ser superiores a la de la antena de la estación de base
Microcélula urbana densa	0,05 a 0,5 km	Exteriores; montada por debajo del nivel medio de los tejados
Picocélula	Hasta 50 m	Interiores o exteriores (montada por debajo del nivel máximo de los tejados)

TABLA 4 Definición de tipos de célula [4]

En nuestro proyecto hemos incluido dos modelos de propagación, el Okumura-Hata, modelo empírico, y el Xia-Bertoni, modelo semiempírico. En el Anexo I los detallaremos con precisión.

Capítulo 3. Funcionamiento de MatCover

3.1 Introducción

En el siguiente capítulo se estudiará cuál es la rutina de funcionamiento que sigue MatCover en la realización de las operaciones.

Este proceso, aunque es muy similar para las distintas operaciones, presenta algunas variaciones que como veremos a continuación están ligadas al número de antenas que se haya que tener en cuenta.

En cualquier caso, MatCover realiza cuatro pasos generales a la hora de realizar cualquier tipo de cálculo.

1. **Entrada de datos.** Los datos son introducidos por el usuario a través de cuadros de diálogo o cargados a partir de diferentes ficheros. Según el tipo de dato, será utilizable por todas las funciones o sólo por algunas, una vez cargado el modelo de propagación, éste es accesible para todas las aplicaciones, en el caso de los diagramas de radiación, éstos serán accesibles para las funciones que sólo necesiten una antena. Si se necesitan más de una antena, el diagrama será solicitado por la función en cuestión.
2. **Selección de función.** Una vez la herramienta está en posesión de los datos necesarios para realizar los cálculos (excepto en el caso mencionado anteriormente, en cuyo caso estos datos se introducirán dentro de la propia función), el usuario debe seleccionar una aplicación entre las disponibles.
3. **Cálculo.** En función de la aplicación seleccionada MatCover realizará un cálculo o una serie de cálculos concretos con el objetivo de aportar los resultados específicos de dicha función. Las aplicaciones en MatCover no están relacionadas entre sí por lo que no se comparten resultados entre las mismas, de esta manera conseguimos modular completamente la herramienta y diferenciar sus partes, lo que facilitaría posibles ampliaciones u optimizaciones.
4. **Presentación de resultados.** La visión de los resultados se puede realizar en el propio mapa de la ventana inicial o en una figura aparte que puede ser guardada para el posterior análisis o visión en Google Earth.

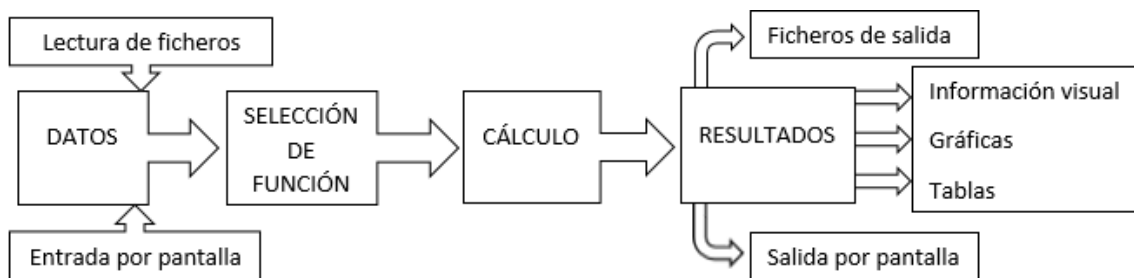


Figura 6. Esquema de funcionamiento.

Antes de entrar en detalle en las funciones de la herramienta, cabe destacar la estructura de carpetas de MatCover. Siguiendo el ejemplo de la estructura modular de programación, la estructura de carpetas también está dividida en carpetas, cada una con archivos comunes. De esta manera podemos agrupar los modelos de propagación, las antenas, los mapas... haciendo más fácil al usuario la acción de cargar archivos.

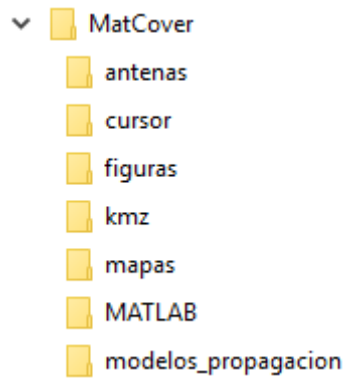


Figura 7. Estructura de carpetas.

3.2 Funciones de la herramienta

El objetivo principal de MatCover es el cálculo de coberturas, por ello la mayoría de las funciones tienen dicho fin, pero también hay funciones secundarias que son necesarias para el correcto funcionamiento de MatCover o que aportan otros resultados que no tienen que ver con el cálculo de coberturas.

A continuación, veremos todas las funciones con las que cuenta MatCover, sin embargo, en primer lugar recordaremos la ventana inicial de MatCover sobre la que residen todas las funciones.

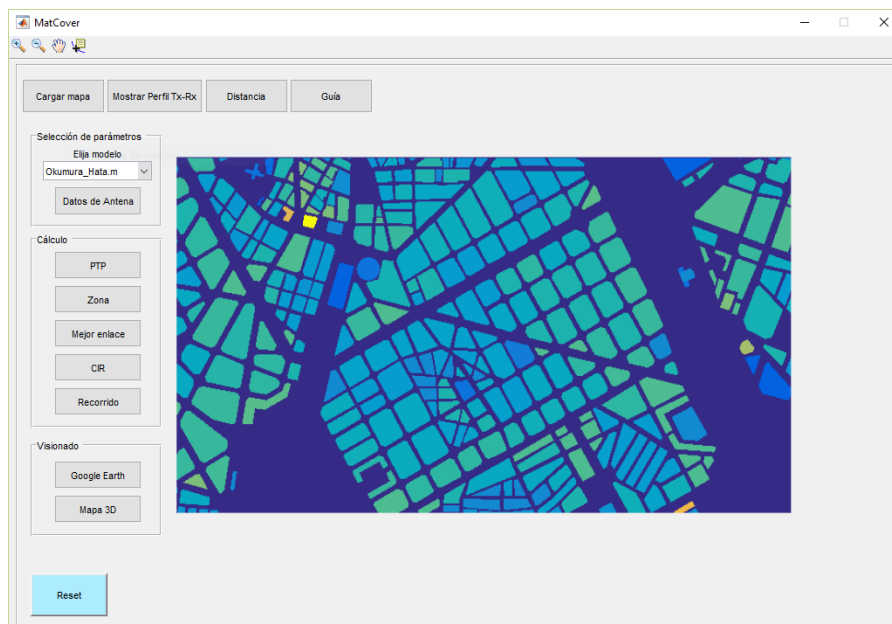


Figura 8. Ventana inicial de MatCover

La explicación que se hará más adelante atenderá únicamente a la actividad de la función sin describir la ejecución de la misma. En el Anexo II encontraremos una guía que detallará minuciosamente los pasos que ha de seguir el usuario en cada función.

MatCover carga directamente el archivo .txt sin necesidad de realizar ninguna conversión a otro tipo de archivo gracias a la función *arcgridread* del *mapping toolbox* de Matlab, que introduce una serie de funciones que facilitan el trabajo con información geográfica.

En concreto la instrucción que utilizamos para cargar y mostrar el mapa en la herramienta es:

```
[z r] = arcgridread('mapas/valencia.txt');  
handles.mapas=mapshow(z,r,'DisplayType','surface');
```

De esta manera, cargamos sobre la estructura *handles* el mapa de tipo *surface*, que sea *surface* nos permite cargar las tres coordenadas, incluyendo la de la altura de cada punto facilitando el cálculo posterior de las distintas funciones, además de permitir el visionado en 3D del mapa si se desea.

El resultado de esta función se verá en el *axes* de la ventana inicial de MatCover.



a)



b)

Figura 10. a) y b) representan ejemplos de mapas cargados

3.2.2 Mostrar perfil Tx-Rx

Esta es una función independiente de los cálculos de cobertura que nos muestra el perfil entre el transmisor y el receptor representando en el eje x la distancia entre el transmisor y el receptor y en el eje y la altura de los edificios que se encuentran entre ellos.



Figura 11. Representación de la línea que une un transmisor y receptor.

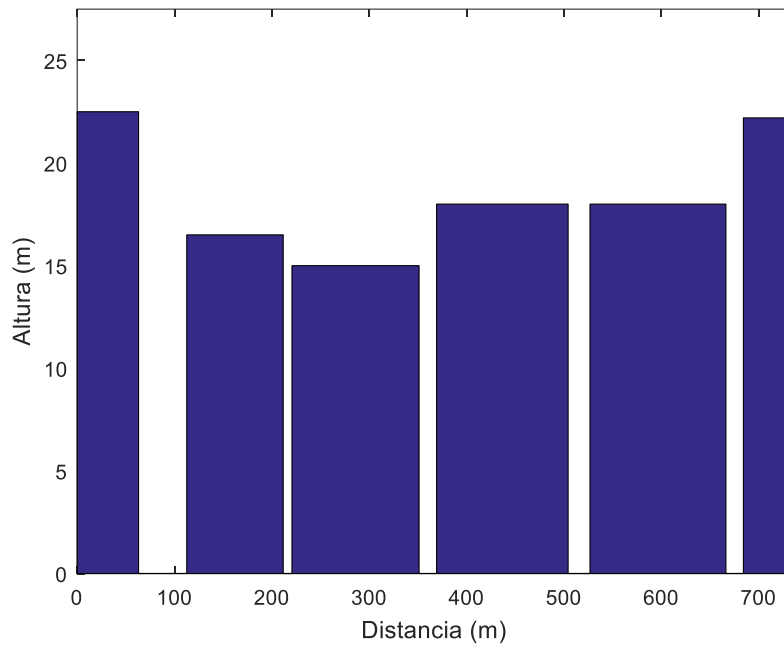


Figura 12. Perfil Tx-Rx.

En las figuras anteriores podemos observar tanto la línea que une el transmisor y el receptor como la representación del perfil que une ambos puntos.

3.2.3 Distancia

La función “*distancia*” se trata de la más simple de MatCover, únicamente devuelve la distancia entre dos puntos previamente elegidos por el usuario.

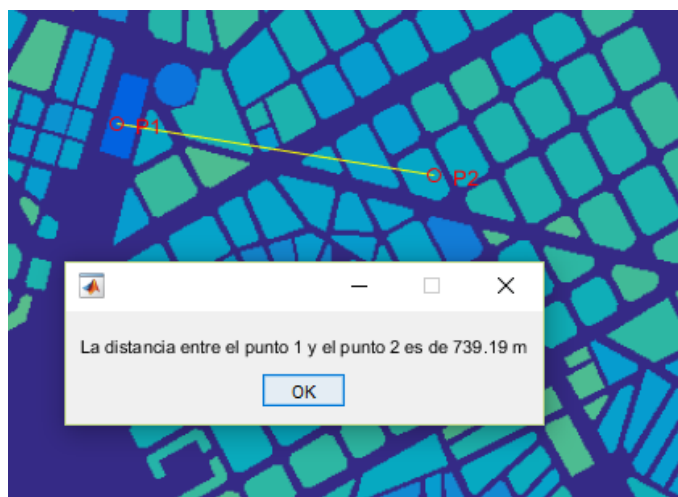


Figura 13. Función “distancia”.

3.2.4 Guía

La función asociada al botón “Guía” abre un archivo .pdf que contiene una guía de usuario detallada que explica paso a paso cómo se realizan todos los posibles cálculos que se pueden hacer con MatCover. Dicha guía se adjunta en un anexo II de este mismo documento.



Figura 14. Guía de usuario.

3.2.5 Selección de parámetros

No se trata de una función tal cual pero es un apartado muy importante de MatCover. Esta sección de la ventana inicial hace referencia a los dos principales parámetros necesarios para realizar los cálculos de cobertura, la elección del modelo de propagación y del diagrama de radiación de la antena transmisora. Se ha elegido abstraer estas dos elecciones de las funciones y que actúen de manera global sobre todas las funciones con el objetivo de agilizar cálculos sucesivos.

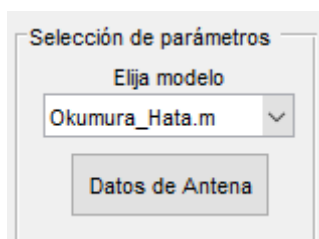


Figura 15. Selección de parámetros.

La opción de seleccionar los datos de la antena no es efectiva para las funciones en las que actúen dos o más antenas, sólo es válida para los cálculos que hacen uso de una antena (PTP, Mejor enlace sobre un punto y Potencia sobre un recorrido). Esto se hace con el objetivo de poder dar mayor versatilidad a las funciones permitiendo la elección individual del diagrama de radiación de cada antena involucrada en los cálculos, que, de otra manera, si aplicásemos el mismo diagrama a todas las antenas estaríamos ante una situación irreal y perderíamos el enfoque práctico que tiene esta herramienta.

La elección del modelo de propagación sí es única y se hace desde este panel, en el menú desplegable tendremos los modelos de propagación que se han añadido a la ruta del explorador de archivos que se ha habilitado para albergar a los modelos de propagación.

3.2.6 Funciones de visionado

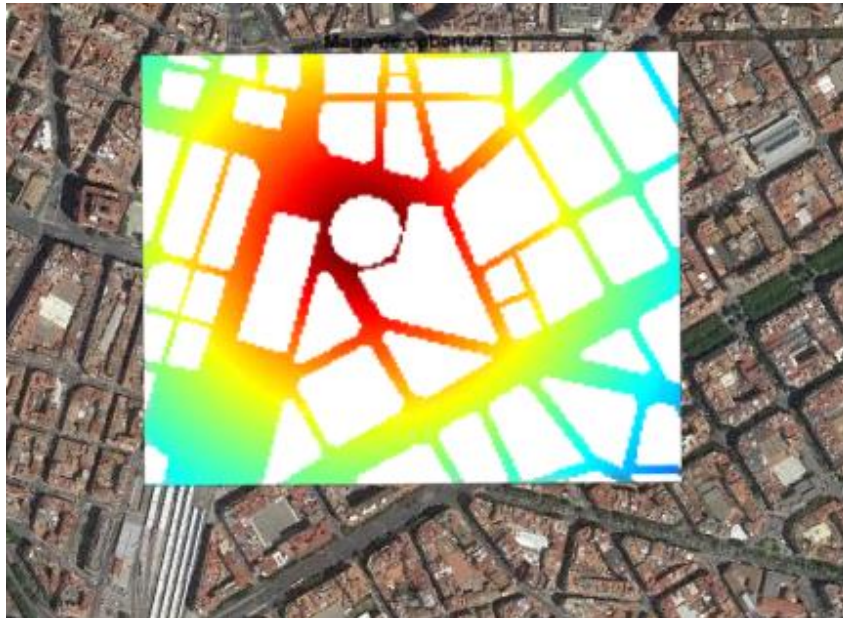
Estas funciones no realizan cálculos, pero permiten obtener otra visión del mapa de trabajo por un lado y de los resultados por otro.



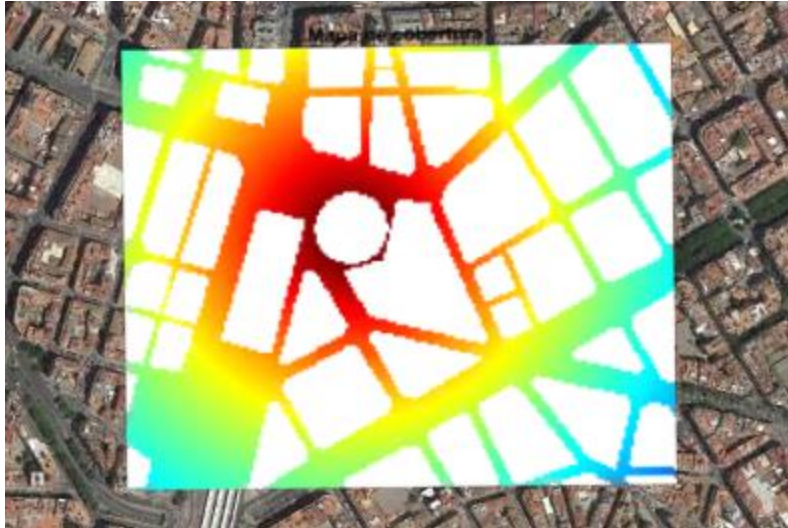
Figura 16. Funciones de visionado.

Google Earth

A partir de los ficheros guardados de las funciones de cálculo que veremos a continuación podemos observar estos resultados a través de Google Earth. Para que este visionado sea eficiente, los edificios en 3D en la aplicación de Google Earth deberán estar desconectados ya que los resultados son en 2D.



a)



b)

Figura 17. Representación sobre Google Earth.

Hay ocasiones en las que el mapa utilizado y el que presenta Google Earth no serán completamente iguales sino que podrá existir una ligera disparidad entre las coordenadas de ambos mapas. Esto puede ser debido a que los mapas utilizados por el usuario sean antiguos y no sean muy precisos. En estas ocasiones la solución es simple, tendremos que elegir un punto de referencia en ambos mapas y obtener la deriva existente, con este dato podremos modificar la proyección sobre Google Earth haciendo uso del fichero “deriva.m” incluido en el directorio de funciones de nuestro proyecto y sustituyendo este dato en el mismo.

El resultado lo podemos observar en la figura anterior. En el caso a) existe una deriva de 100 metros en el eje horizontal y 172 metros en el eje vertical que ha sido subsanada en b).

Mapa 3D

Esta función simplemente nos muestra el mapa que tenemos cargado sobre MatCover en una nueva figura en 3D.

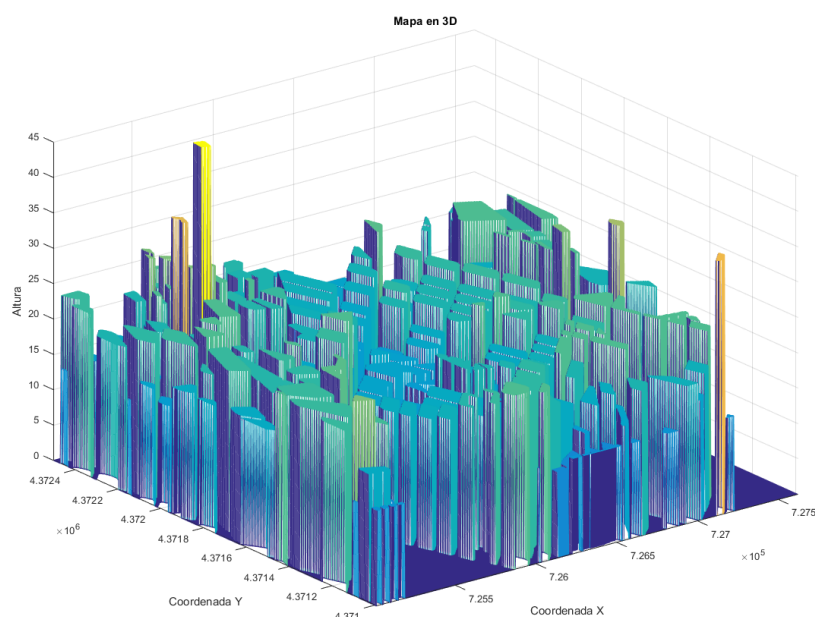


Figura 18. Mapa en 3D.

3.2.7 Funciones de cálculo de cobertura

El cálculo de coberturas es la esencia de este trabajo. A continuación se detallan las distintas funciones que se han programado con el objetivo de cubrir los principales casos de cobertura para una o más antenas y para uno o más posibles receptores.

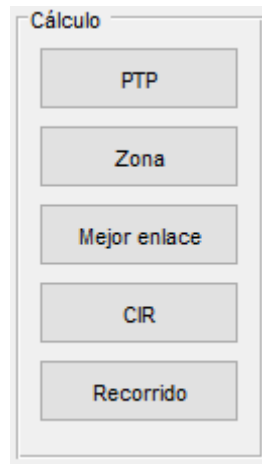


Figura 19. Funciones de cálculo de cobertura.

PTP

El cálculo "PTP" se utiliza para obtener la potencia recibida por un único receptor como consecuencia de la acción de una única antena atendiendo al diagrama de radiación de la misma, a los datos inherentes a la antena transmisora y al receptor y al modelo de propagación designado.

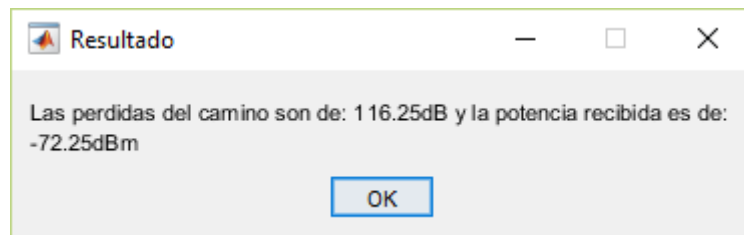


Figura 20. Ventana de resultados de "PTP".

Los resultados se muestran en una ventana emergente informándonos de las pérdidas del camino y la potencia recibida

Zona

El cálculo "Zona" es una versión extendida de "PTP", es decir, el objetivo de esta función sigue siendo obtener la potencia recibida, pero en este caso, no sobre un único receptor sino en una zona a la elección del usuario dentro del mapa previamente cargado.

Los cálculos se realizarán conforme al modelo de propagación elegido y en algún caso es posible que se nos solicite dar algún dato más sobre la zona de trabajo. Por ejemplo, en el modelo de propagación Okumura-Hata debemos elegir el tipo de zona sobre el que se realizarán los cálculos.

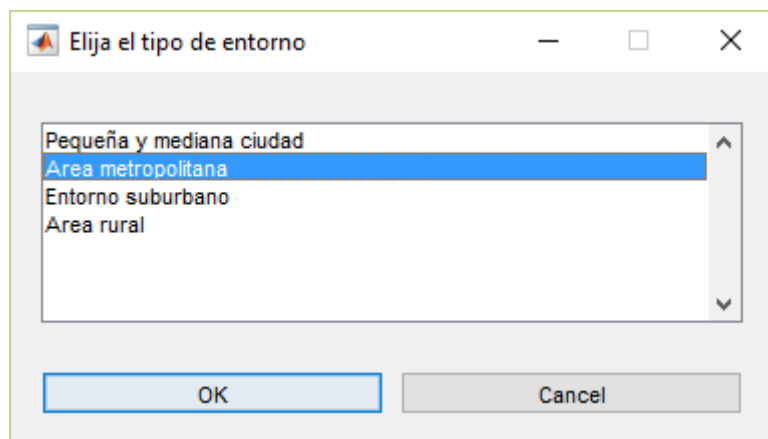


Figura 21. Tipo de zona de estudio.

Tras rellenar los datos y esperar a que se realicen los cálculos, MatCover nos ofrece dos opciones a la hora de representar los resultados, en el mapa o en una figura aparte.

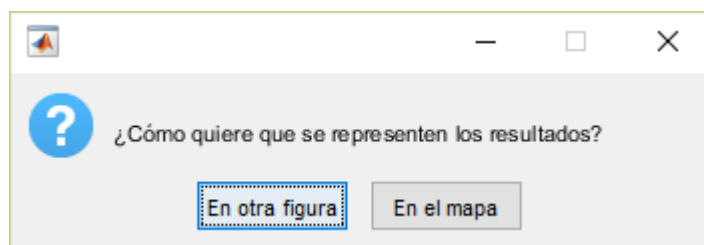


Figura 22. Elección de representación de resultados.

Si representamos los resultados en una figura sólo veremos la zona donde se han realizado los cálculos.

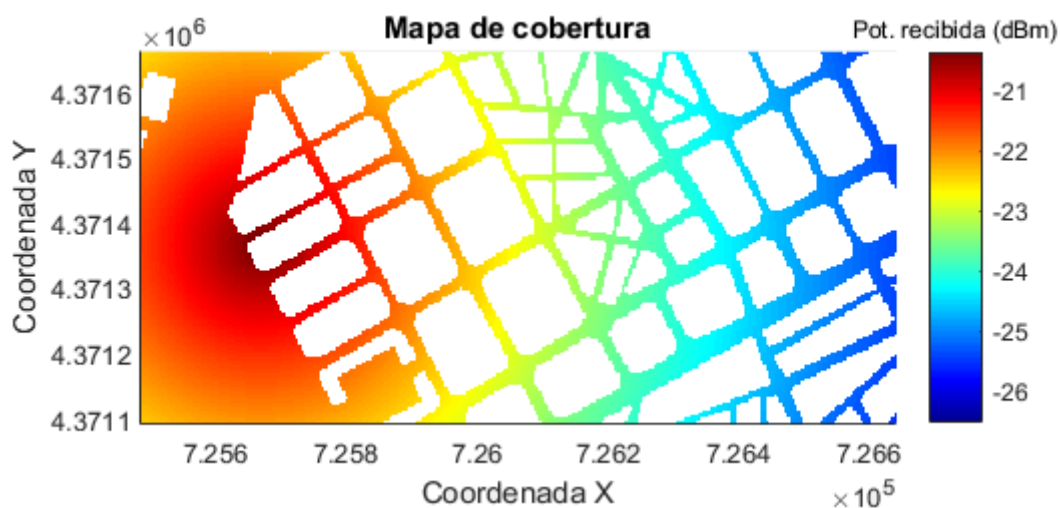


Figura 23. Representación de cobertura en una figura nueva.

La representación en una figura aparte tiene las ventajas de abstraer los resultados a una nueva ventana y el poder trabajar con las distintas herramientas que nos ofrece MatLab en sus figuras. Entre las utilidades que nos ofrece se encuentran la posibilidad de guardar la figura para una posterior visualización en MATLAB o en Google Earth, añadir cursores para ver el dato exacto de potencia recibida en cada punto o la impresión de los resultados.



Figura 24. Barra de herramientas de la figura

Si por otra parte elegimos ver los resultados en el mapa de MatCover también contaremos con una escala de colores donde nos haremos una idea aproximada del valor de potencia recibida en toda la zona y con un cursor para ver con detalle algún punto específico.

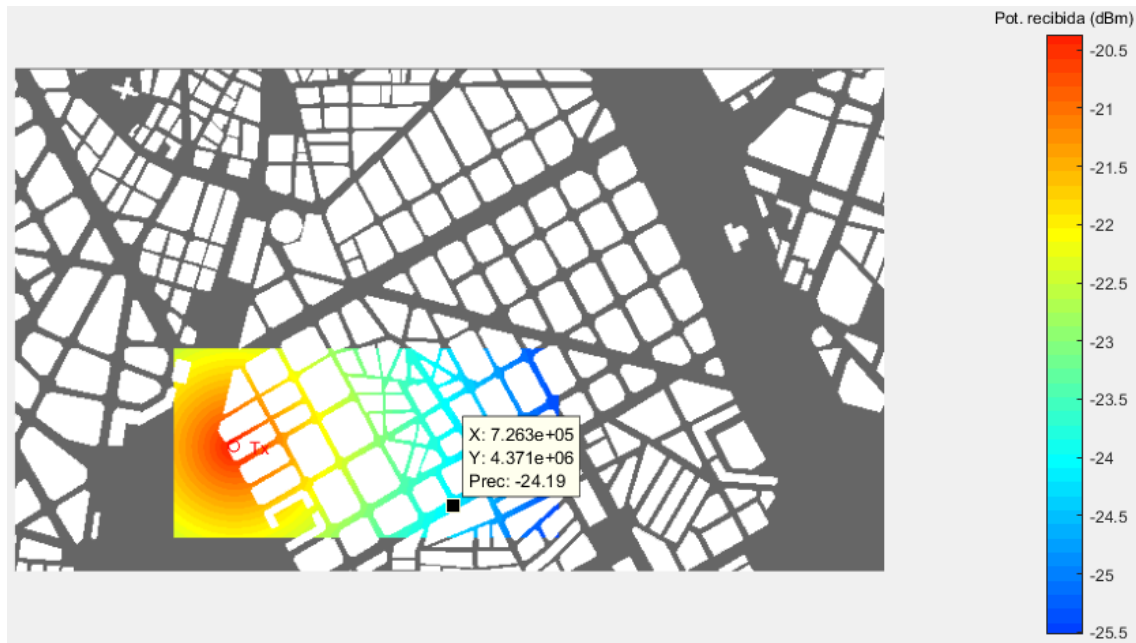


Figura 25. Representación de cobertura en mapa.

Mejor enlace

El cálculo de “Mejor enlace” consiste en determinar de entre una serie de transmisores, cuál es el que ofrece mayor potencia a un receptor dado. Nuestra función tiene dos variantes, la primera realiza el cálculo en un único punto designado por el usuario, en cambio la segunda se aplica a una zona del interés del usuario y como resultados se muestra en qué porciones de la zona estudiada tiene mejor cobertura una determinada antena.

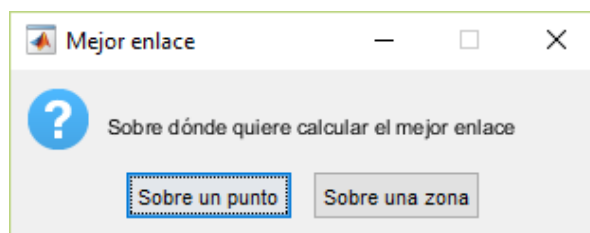


Figura 26. Selección de variante de la función.

En caso de seleccionar un único receptor los resultados se mostrarán en una tabla con los datos de potencia recibida en función de cada transmisor.

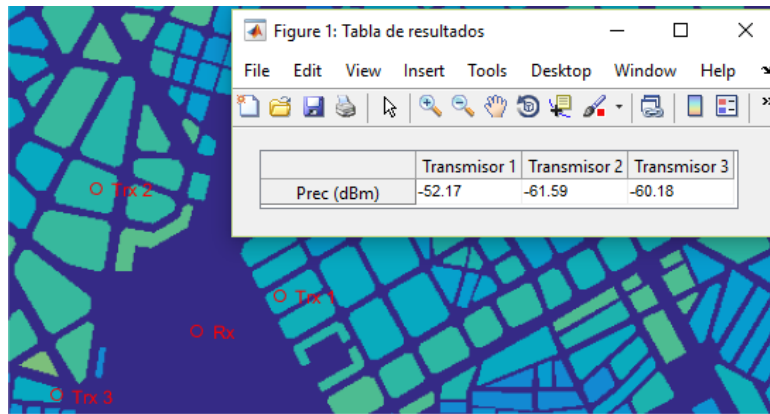


Figura 27. Representación de resultados.

Si, por otro lado, elegimos la opción “Sobre una zona”, en lugar de elegir un solo punto, designaremos una zona de estudio. Los resultados obtenidos sobre dicha zona se podrán representar como en el caso de “PTZ” sobre el propio mapa o en una figura diferente.

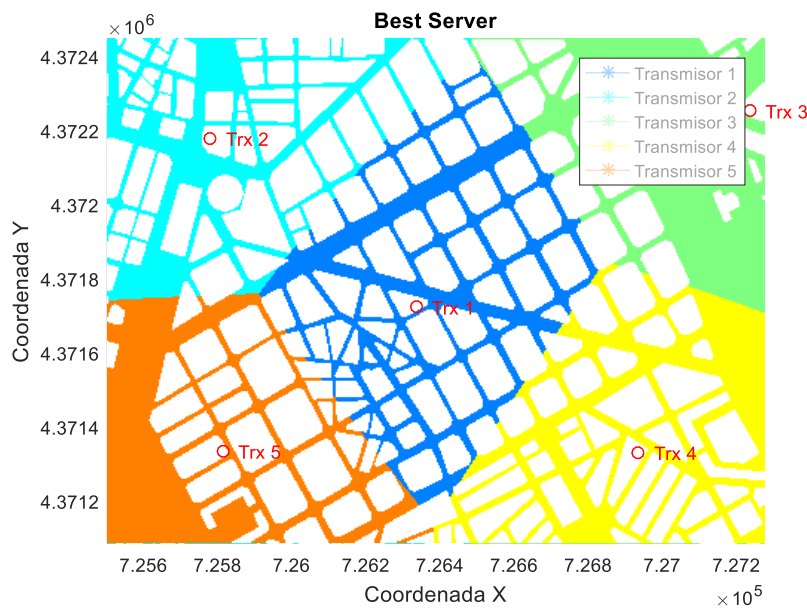


Figura 28. Representación de resultados en una figura nueva.

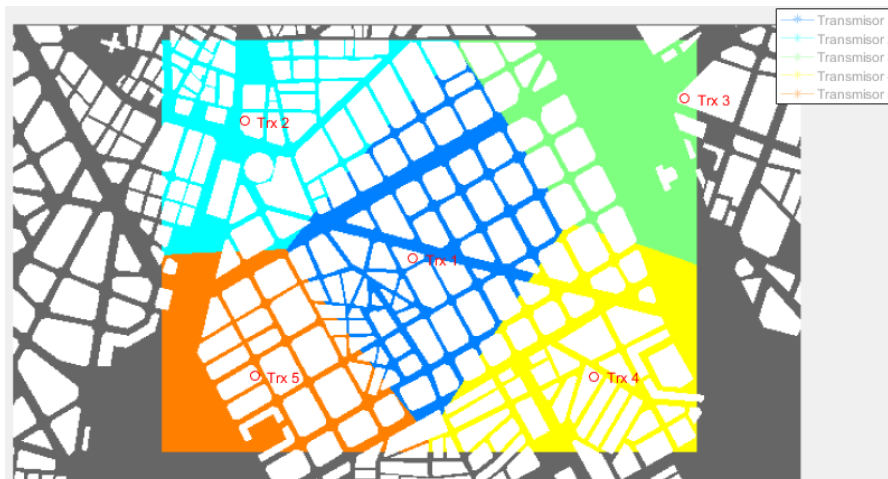


Figura 29. Representación de resultados sobre el mapa.

CIR

En un sistema de telecomunicaciones real sobre una zona habitada el cálculo de la potencia recibida no es tan sencillo como calcular directamente las pérdidas entre el transmisor y el receptor y restárselas a la potencia transmitida por la antena transmisora. El cálculo de la relación señal a interferente se basa en la selección de varios transmisores de los cuáles uno es el transmisor principal. Con esta función podemos analizar cómo afecta a la potencia recibida por una antena principal la presencia de antenas ajenas a dicha comunicación.

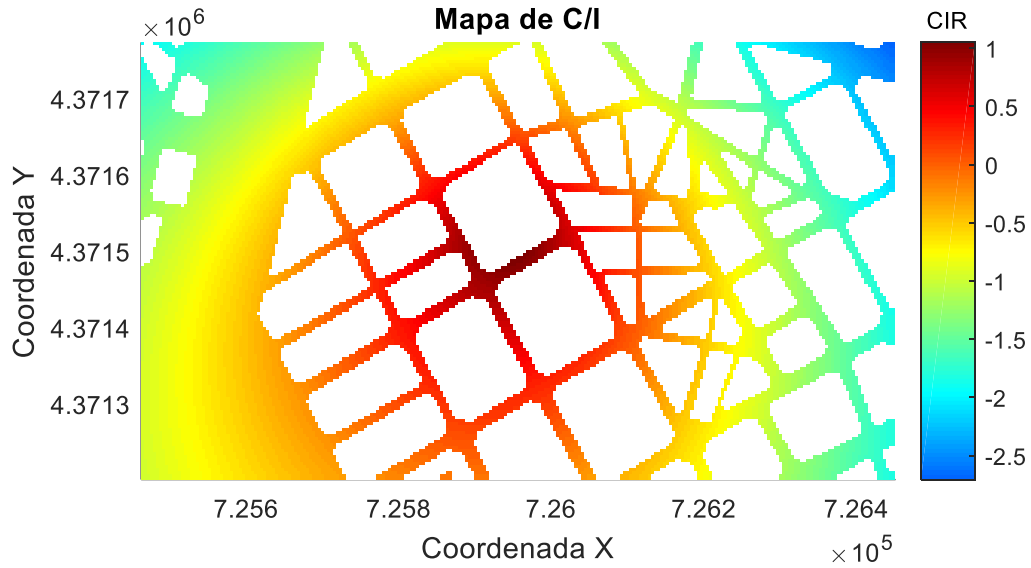


Figura 30. Representación de resultados en una figura nueva.

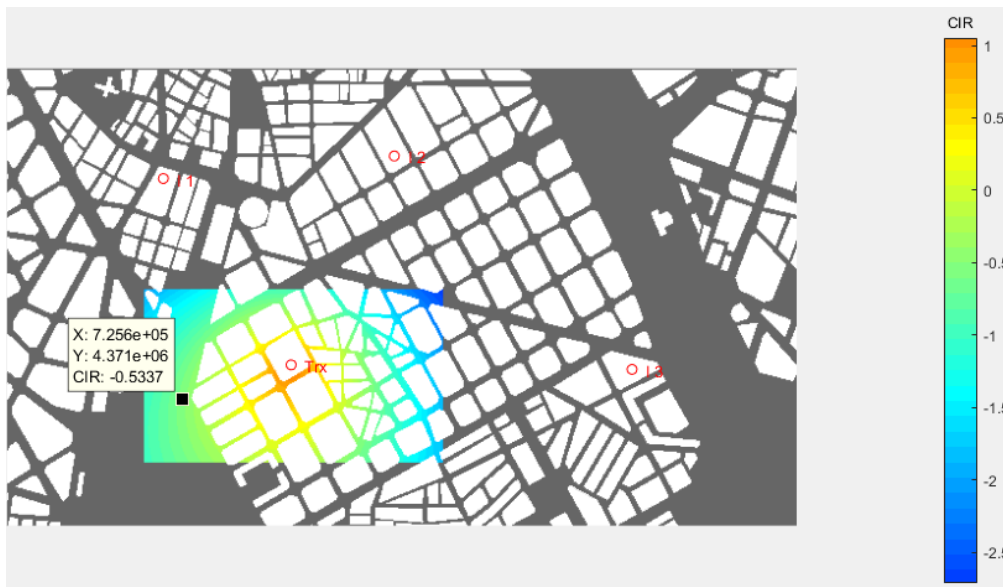


Figura 31. Representación de resultados sobre el mapa.

Recorrido

En esta función el usuario define un recorrido sobre un mapa previamente cargado sobre el que desea obtener medidas de potencia recibidas por una determinada antena definida por el usuario.

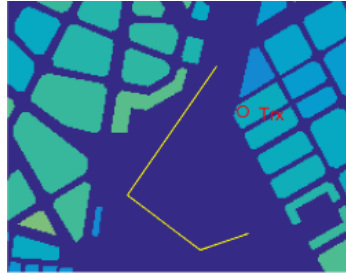


Figura 32. Recorrido del receptor.

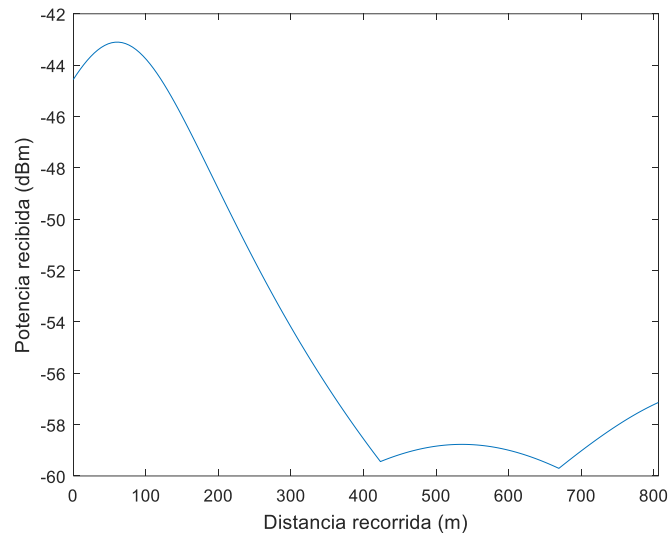


Figura 33. Potencia recibida durante el recorrido

Capítulo 4. Conclusiones y futuras ampliaciones del trabajo

Previamente hemos tratado de explicar la base teórica sobre la que se basa este trabajo y más tarde el funcionamiento interno y capacidades que posee MatCover. En los anexos detallamos los modelos de propagación introducidos en la versión inicial, un manual de usuario de la herramienta completamente detallado y una guía para el diseño de las matrices que representan el diagrama de radiación de las antenas que se podrán cargar en MatCover.

MatCover se ha realizado con la intención de aportar una herramienta de estimación de coberturas que goce de las funciones más comunes y utilizadas para la predicción de coberturas radioeléctricas además de permitir al usuario incorporar sus propios modelos de propagación y diagramas de radiación. El usuario encontrará MatCover como una herramienta muy intuitiva, que no presenta un nivel de complejidad elevado y que se centra en las funciones principales necesarias para el estudio de las radiocomunicaciones.

Hemos mantenido nuestra idea de realizar un software totalmente modulable, facilitando el trabajo a futuros compañeros que quieran ampliar MatCover o simplemente quieran añadir otros modelos de propagación u otros diagramas de radiación para conseguir una herramienta más completa y hemos conseguido mostrar los resultados por Google Earth, lo cual era un objetivo estético distintivo que nos habíamos propuesto. El uso de MATLAB como plataforma de MatCover hace que nuestra herramienta sea fácilmente accesible ya que MATLAB es un *software* muy extendido debido a su gran versatilidad y potencia de cálculo. También cabe recalcar que MATLAB está disponible en MacOS, Linux y Windows, lo que significa que MatCover también lo está.

Algunas futuras líneas de trabajo sobre MatCover podrían ser:

- Lo más sencillo sería ampliar el abanico de modelos de propagación con los que cuenta la herramienta. Nosotros nos hemos decidido por la inclusión de dos de los modelos más típicos a la hora del estudio de la propagación como son el modelo de Okumura-Hata y el modelo Xia-Bertoni. Aun así, existen muchos otros modelos de igual o mejor exactitud que pueden ser incluidos en MatCover sin más dificultad que la propia programación del mismo.
- También se pueden añadir más diagramas de radiación basados en el Anexo II de esta memoria. Nosotros hemos incluido además del diagrama isotrópico, el diagrama perteneciente a un dipolo a 900 MHz.
- Una modificación más notable sería añadir la posibilidad de elegir la elevación de la antena durante los cálculos, ahora mismo es posible crear fácilmente antenas con distinta elevación, pero sobre una antena ya realizada no es posible variar su elevación durante la ejecución de las funciones de cálculo como si podemos hacer con el azimuth.
- Se podría pensar en guardar las variables que contienen los datos de cobertura para propósitos diversos como puede ser la mera documentación de un cómputo realizado o la comparación directa entre mismas zonas de cobertura con antenas de diferentes diagramas de radiación.

Anexo I. Modelos de propagación implementados en MatCover

Okumura-Hata

El modelo de Okumura-Hata [5][6] está basado en una campaña de medidas llevada a cabo en Tokyo por Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano y K. Fukuda. Esta campaña de medidas derivó en un conjunto de curvas que prevén el nivel de atenuación media relativa al espacio libre en función de la frecuencia, la distancia entre transmisor y receptor y su altura, además de varios factores de corrección específicos para diferentes entornos de propagación. Se trata de un modelo muy conocido y utilizado debido a su sencillez y moderada exactitud.

La aportación de Hata a este modelo fue el establecimiento de una serie de fórmulas matemáticas que describen las curvas propuestas por Okumura. Dichas expresiones empíricas son lo que se conocen bajo el nombre de modelo de Okumura-Hata. Comúnmente, la expresión que da lugar a las pérdidas de propagación se representa como:

$$PL = A + B \log_{10} d + C$$

Donde:

- d es la distancia entre el transmisor y el receptor (km).
- A, B y C son factores que dependen de la frecuencia y de las alturas de las antenas, en el caso de los dos primeros y del entorno en el caso de C .

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_m)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_b$$

Donde:

- f_c representa la frecuencia de la portadora (MHz).
- h_b y h_m son las alturas de la estación base y del móvil respectivamente (m).

La función $a(h_m)$ y el factor C dependen de la zona de estudio:

- Pequeñas y medianas ciudades:

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8)$$

$$C = 0$$

- Áreas metropolitanas:

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\log_{10}(1.54h_m))^2 - 1.1 & \text{para } f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log_{10}(11.75h_m))^2 - 4.97 & \text{para } f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$$

$$C = 0$$

- Entornos suburbanos:

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8)$$

$$C = -2 \left[\log_{10} \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5.4$$

- Área rural:

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8)$$

$$C = -4.78[\log_{10}(f_c)]^2 + 18.33 \log_{10} f_c - 40.98$$

El rango de validez del modelo Okumura-Hata tiene las siguientes limitaciones:

- f_c : 150 a 1500 MHz.
- h_b : 30 a 200 m.
- h_m : 1 a 10 m.
- d : 1 a 20 km.

Se puede observar que el rango de validez del modelo Okumura-Hata no incluye la banda de 1800 MHz comúnmente usada para la segunda y tercera generación de telecomunicaciones móviles. Este problema se resolvió por el COST 231 – Modelo Hata, el cuál extiende la región de validez desde los 1500 a los 2000 MHz definiendo:

$$A = 46.3 + 33.9 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_m)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_b$$

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8)$$

$$C = \begin{cases} 0, & \text{en pequeñas y medianas ciudades} \\ 3, & \text{en áreas metropolitanas} \end{cases}$$

El modelo Okumura-Hata también asume que no hay obstáculos dominantes entre la estación base y la estación móvil, y que el perfil del terreno varía poco.

Xia-Bertoni

El modelo Xia-Bertoni ha sido programado a partir de las especificaciones propuestas por Xirio-online, lugar de dónde se ha obtenido la información concerniente a dicho modelo [7]. Se trata un modelo semiempírico que permite estimar las pérdidas propagación sobre entornos urbanos y suburbanos. La principal ventaja de este modelo de propagación frente a otros similares como el de Walfisch-Bertoni radica en la no limitación de la altura de la antena transmisora respecto a la altura media de los edificios a la hora de ser implementado ya que ésta se puede encontrar a una altura similar, por encima o por debajo.

El modelo identifica tres mecanismos importantes que intervienen en la propagación de señales radio en entornos urbanos y suburbanos:

1. Propagación en condiciones de espacio libre.
2. Difracción tejado-calle entre el edificio de difracción final (EDF) y la estación móvil.
3. Difracción multipantalla debida a la interacción de la onda con los edificios interpuestos entre la estación base y el EDF.

La Figura 34 muestra el perfil típico del trayecto de propagación estudiado por el modelo, así como los parámetros geométricos que intervienen en el proceso de cálculo.

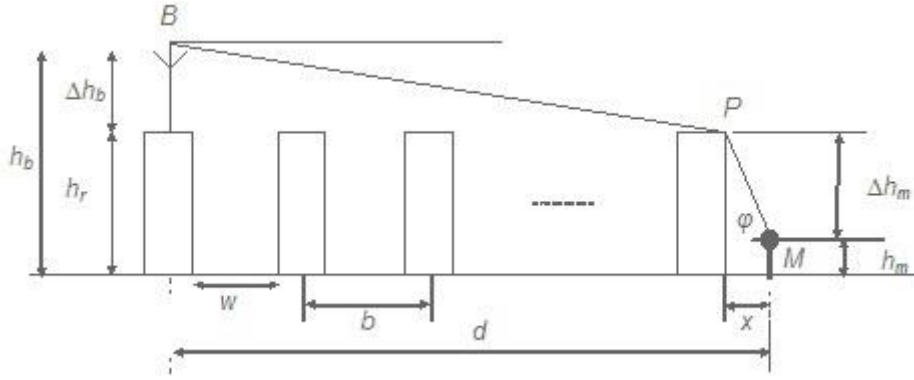


Figura 34. Escenario típico de propagación para $\Delta h_b \gg 0$ [7].

Considerando las contribuciones a las pérdidas de propagación derivadas de los procesos de propagación mencionados anteriormente, las pérdidas totales de propagación, PL , se obtienen como:

$$PL (dB) = L_0 + L_{rts} + L_{msd}$$

Donde L_0 es la pérdida en condiciones de espacio libre, L_{rst} es la pérdida de difracción tejado-calle, y L_{msd} es la pérdida debido a difracción multipantalla.

La pérdida en condiciones de espacio libre, L_0 , es función de la frecuencia y la distancia entre el transmisor y el receptor. A continuación se presentan las expresiones para tres diferentes escenarios:

1. Altura de antena de estación base por encima del nivel de los tejados, $h_b \gg h_r$

$$L_0 (dB) = 32.45 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f$$

donde f está expresada en MHz y d en km.

2. Altura de antena de estación base muy cerca del nivel de los tejados, $h_b \approx h_r$

$$L_0 (dB) = 29.45 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f$$

En este caso se añade un factor empírico igual a $\sqrt{2}$ (3dB) que tiene en cuenta la contribución de los rayos originados por dispersión local desde los edificios próximos a la estación base, que produce, en término medio, un refuerzo de la emisión hacia el receptor.

3. Altura de antena de estación base por debajo del nivel de los tejados, $h_b < h_r$

El valor de L_0 se calcula como en el 2º caso.

El análisis y cálculo de la pérdida de difracción tejado-calle, L_{rts} , se realiza a través de la Teoría Geométrica de Difracción (GTD, *Geometrical Theory of Diffraction*). Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_{rts} = -10 \log \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left(\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{2\pi + \varphi} \right)^2 \right]$$

donde:

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\Delta h_m}{x} \right)$$

$$r = [(\Delta h_m)^2 + x^2]^{1/2}$$

$$\Delta h_m = h_r - h_m$$

- r es la distancia del punto de difracción P a la estación móvil M.
- Δh_m es la diferencia entre el nivel de altura media de los tejados (h_r) y la altura del móvil (h_m).
- x es la distancia horizontal de la estación móvil al edificio donde se produce la última difracción. En general, $x = w/2$, donde w representa el ancho de la calle.

Expresando la ecuación anterior en función de la frecuencia f (MHz), resulta:

$$L_{rts} (dB) = -27.78 + 10 \log_{10} r + 10 \log_{10} f + 20 \log_{10} [\varphi(2\pi + \varphi)]$$

La pérdida por difracción multipantalla, L_{msd} , se evalúa mediante la siguiente expresión genérica:

$$L_{msd} (dB) = -10 \log_{10} |Q_M|$$

El cálculo del parámetro Q_M presenta una elevada complejidad por lo que en función de la altura relativa del transmisor con respecto a la altura media de los edificios se aproximará de forma individual.

1. $h_b \gg h_r$

El valor del parámetro Q_M se aproxima mediante la expresión:

$$Q_M \approx 2.35 \left(\frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0.9}$$

donde:

$$\Delta h_b = h_b - h_r$$

En base a una serie de campañas de medida realizada por los autores del modelo, la expresión se modifica de la siguiente manera:

$$Q_M \approx 2.35 \left(\frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0.9} \frac{1}{d^{1-4 \cdot 10^{-3} \Delta h_b}}$$

Al final nos queda la siguiente expresión para las pérdidas por difracción multipantalla:

$$L_{msd} (dB) = 14.9 - 18 \log_{10} \Delta h_b - 9 \log_{10} b - 9 \log_{10} f + 20(1 - 4 \cdot 10^{-3} \Delta h_b)(3 + \log_{10} d)$$

donde d está en km, b en m y f en MHz.

2. $h_b \approx h_r$

Este escenario corresponde a estaciones base cuyas antenas se encuentran 2-3 m por encima del nivel medio de los edificios. El parámetro Δh_b se aproxima como $\Delta h_b \approx 0$ y la solución propuesta por Xia-Bertoni para Q_M es la siguiente:

$$Q_M \approx \frac{b}{d}$$

donde la distancia d está expresada en km y b en m.

3. $h_b < h_r$

Este caso corresponde a estaciones base cuyas antenas se encuentran por debajo del nivel medio de los tejados.

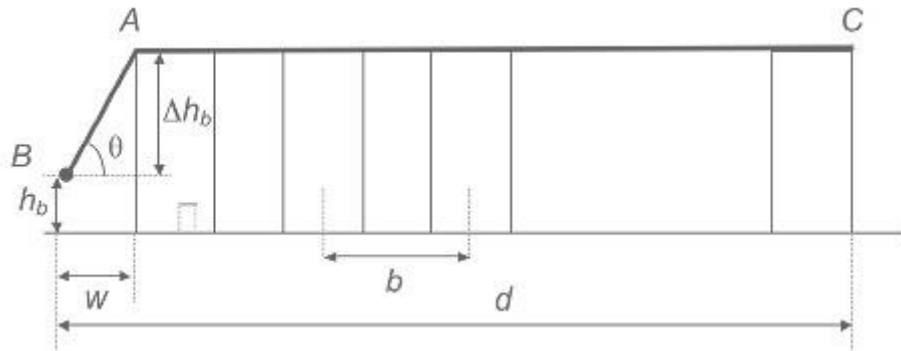


Figura 35. Escenario típico de propagación para $h_b < 0$ [7].

En la figura anterior observamos dos procesos de difracción individuales, el trayecto BA, desde el transmisor hasta el primer edificio obstáculo y el trayecto AC, que da lugar a un proceso de difracción múltiple por la hilera de edificios restantes. Un análisis detallado permite obtener el término Q_M^2 :

$$Q_M^2 = \left[\frac{d}{2\pi(d-b)} \right]^2 \frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta h_b)^2 + b^2}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2$$

Sustituyendo el valor de Q_M^2 en la ecuación de las pérdidas por difracción multipantalla, con la simplificación $d - b \approx d$, la pérdida por difracción multipantalla L_{msd} , se escribe mediante la siguiente ecuación:

$$L_{msd} = 35.2 - 20\log_{10}b + 20\log_{10}d + 10\log_{10}r' + 10\log_{10}f + 20\log_{10}[\theta(2\pi + \theta)]$$

donde d está en km, f en MHz, r' y b en m, y el ángulo θ en radianes, siendo:

$$r' = [w^2 + (\Delta h_b)^2]^{1/2} \quad \theta = -tg^{-1} \left(\frac{\Delta h_b}{w} \right)$$

Anexo II. Diseño de diagramas de radiación

MatCover no trabaja con un diagrama de radiación fijo e invariable sino que el usuario puede cargar un diagrama de radiación previamente diseñado y elegir el apuntamiento de la antena.

El formato que se ha elegido para definir las antenas es un fichero .mat de MATLAB que contendrá una matriz con los ángulos de apuntamiento y elevación y sus respectivas ganancias con respecto a la antena isotrópica.

NaN	0	5	10	15	20	25	30
-90	0	0	0	0	0	0	0
-85	0	0	0	0	0	0	0
-80	0	0	0	0	0	0	0
-75	0	0	0	0	0	0	0
-70	0	0	0	0	0	0	0
-65	0	0	0	0	0	0	0
-60	0	0	0	0	0	0	0
-55	0	0	0	0	0	0	0
-50	0	0	0	0	0	0	0
-45	0	0	0	0	0	0	0
-40	0	0	0	0	0	0	0
-35	0	0	0	0	0	0	0
-30	0	0	0	0	0	0	0
-25	0	0	0	0	0	0	0
-20	0	0	0	0	0	0	0
-15	0	0	0	0	0	0	0
-10	0	0	0	0	0	0	0
-5	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 36. Diagrama de radiación de antena isotrópica.

En la figura anterior podemos observar el diseño que presenta un diagrama de radiación válido para emplear en MatCover. La primera celda no nos interesa y la hemos dotado de un valor NaN y el resto de celdas definen el diagrama, la primera columna define los ángulos de elevación y presenta un rango de $[-90,90]$, mientras que la primera fila representa los ángulos de apuntamiento y tiene un rango de $[0,360]$. Para conocer el valor exacto para el azimuth y elevación de cada punto de la zona de cálculo MatCover interpolará linealmente sobre esta matriz.

A la hora de diseñar un diagrama de radiación tenemos dos opciones. En primer lugar podemos recurrir a los catálogos de los fabricantes y crear la matriz desde cero, o en el caso de no necesitar una antena de un fabricante y un modelo determinados, MATLAB presenta en su *toolbox* de antenas diferentes posibilidades de antenas genéricas cuyo diagrama dependerá de una serie de variables que lo definen.

Antenna Modeling and Visualization

bowtieRounded	Create rounded bowtie dipole antenna
bowtieTriangular	Create planar bowtie dipole antenna
dipole	Create strip dipole antenna
dipoleFolded	Create folded dipole antenna
dipoleMeander	Create meander dipole antenna
dipoleVee	Create V-dipole antenna
invertedF	Create inverted-F antenna over rectangular ground plane
invertedL	Create inverted-L antenna over rectangular ground plane
monopole	Create monopole antenna over rectangular ground plane
monopoleTopHat	Create capacitively loaded monopole antenna over rectangular ground plane
loopCircular	Create circular loop antenna
loopRectangular	Create rectangular loop antenna
spiralArchimedean	Create Archimedean spiral antenna
spiralEquiangular	Create equiangular spiral antenna
patchMicrostrip	Create microstrip patch antenna
pifa	Create planar inverted-F antenna
biquad	Create biquad antenna
cavity	Create cavity-backed antenna
customAntennaMesh	Create 2-D custom mesh antenna on X-Y plane
helix	Create helix antenna on ground plane
horn	Create horn antenna
reflector	Create reflector-backed antenna
slot	Create rectangular slot antenna on ground plane
vivaldi	Create Vivaldi notch antenna on ground plane
yagiUda	Create Yagi-Uda array antenna
waveguide	Create rectangular waveguide
show	Display antenna or array structure

Figura 37. Captura de la lista de funciones del “Antenna Toolbox” de MATLAB.

En la figura anterior observamos todas las posibles variantes que nos ofrece MATLAB a la hora de diseñar una antena, dichas posibilidades abarcan desde simples monopolos o dipolos a antenas en hélice o de cuerno.

A continuación se detallarán varios ejemplos de cómo se diseñaría un diagrama de radiación con el formato de MatCover a partir del *toolbox* de antenas de MATLAB.

Dipolo

Vamos a diseñar el diagrama de radiación perteneciente a un dipolo con ayuda de MATLAB. En primer lugar tenemos que crear un objeto dipolo:

```
>> d=dipole

d =

dipole with properties:

Length: 2

Width: 0.1000

FeedOffset: 0

Tilt: 0

TiltAxis: [1 0 0]
```

Hemos creado un objeto dipolo por defecto, observamos que se puede modificar el diseño del dipolo, en caso de ser necesario podríamos cambiar la longitud, el ancho, el offset de alimentación o la inclinación del mismo.

Para ver la representación gráfica del dipolo que hemos creado utilizamos:

```
>> show(d)
```

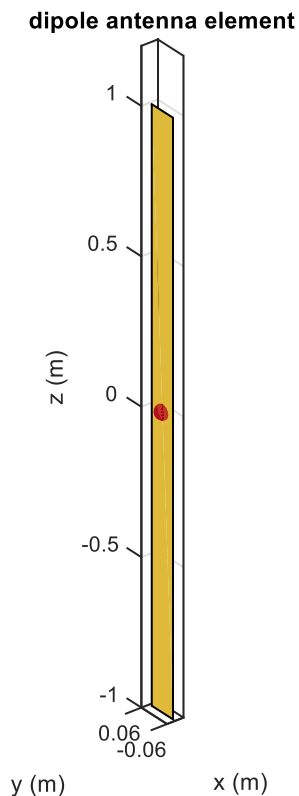


Figura 38. Representación gráfica del dipolo por defecto.

En este punto es posible modificar la elevación de la antena para modificar el diagrama de radiación. Lo óptimo sería poder modificar la elevación desde las propias funciones de cálculo, sin embargo, no hemos sido capaces de lograr una solución que fuese computacionalmente buena. Para modificar la elevación en primer lugar debemos elegir el eje sobre el que queremos hacer *Tilt* a la antena, que sería, según el diagrama sería el eje Y:

```
>> d.TiltAxis=[0 1 0];
```

Y ahora elegiríamos los grados con:

```
>> d.Tilt=90;
```

Una vez seleccionada la elevación que queremos, nuestro objetivo es obtener el diagrama de radiación y esto lo conseguimos con la instrucción:

```
[fieldval,azimuth,elevation] = pattern(object,frequency,azimuth,elevation)
```

Esta instrucción nos devuelve el diagrama del objeto que hayamos definido para una frecuencia determinada y en unos rangos de azimuth y elevación definidos por el usuario. En nuestro caso vamos a diseñar un dipolo a 900 MHz en el rango máximo de representación. Esto se logra de la siguiente manera:

```
>> [gain,azimuth,elevation] = pattern(d,900E6,0:5:360,-90:5:90);
```

Si queremos observar el diagrama utilizamos la instrucción anterior sin definir ningún *output*.


```
>> pattern(d,900E6,0:5:360,-90:5:90)
```

```
Output : Directivity
Frequency : 900 MHz
Max value : 6.31 dBi
Min value : -11.2 dBi
Azimuth : [0° , 360°]
Elevation : [-90° , 90°]
```

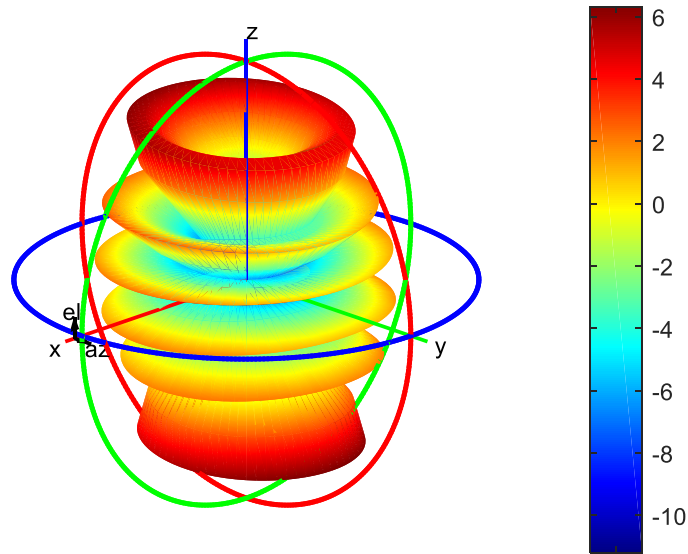


Figura 39. Diagrama de radiación del dipolo.

Para finalizar, a partir de las variables que hemos obtenido de la función *pattern*, vamos a confeccionar la matriz tipo que hemos presentado al inicio del anexo. Para lograr nuestro objetivo emplearemos las siguientes instrucciones:

```
[m,n]=size(gain);
dipolo900MHz=zeros(m+1,n+1);
dipolo900MHz(1)=NaN;
dipolo900MHz(2:end,1)=elevation';
dipolo900MHz(1,2:end)=azimuth;
dipolo900MHz(2:end,2:end)=gain;
```

NaN	0	5	10	15	20	25	30
-90	-10.0506	-10.0506	-10.0506	-10.0506	-10.0506	-10.0506	-10.0506
-85	-5.9553	-5.8567	-5.7538	-5.6480	-5.5409	-5.4337	-5.3281
-80	-2.0278	-1.9403	-1.8462	-1.7467	-1.6437	-1.5388	-1.4338
-75	-0.0077	0.0584	0.1318	0.2110	0.2947	0.3812	0.4688
-70	1.0655	1.0915	1.1250	1.1652	1.2111	1.2615	1.3151
-65	2.6760	2.6900	2.7107	2.7377	2.7701	2.8069	2.8469
-60	4.7844	4.8433	4.9055	4.9700	5.0357	5.1014	5.1659
-55	5.3052	5.3991	5.4916	5.5814	5.6674	5.7488	5.8247
-50	2.2196	2.2917	2.3600	2.4235	2.4818	2.5343	2.5807
-45	-5.0393	-5.3024	-5.5917	-5.9061	-6.2439	-6.6025	-6.9787
-40	-2.8326	-2.9187	-3.0207	-3.1374	-3.2670	-3.4074	-3.5560
-35	-1.1899	-1.2085	-1.2358	-1.2713	-1.3142	-1.3636	-1.4182
-30	1.8652	1.9364	1.9917	2.0309	2.0543	2.0628	2.0576
-25	-2.3965	-2.3856	-2.3929	-2.4177	-2.4590	-2.5153	-2.5845
-20	-5.9670	-6.0930	-6.2628	-6.4758	-6.7307	-7.0253	-7.3563
-15	-3.4358	-3.4848	-3.5527	-3.6382	-3.7395	-3.8546	-3.9808
-10	1.8415	1.8586	1.8535	1.8268	1.7797	1.7141	1.6325
-5	-2.3892	-2.4011	-2.4342	-2.4875	-2.5596	-2.6484	-2.7515
0	-5.0638	-5.0844	-5.1460	-5.2474	-5.3863	-5.5596	-5.7632

Figura 40. Matriz representativa del diagrama de radiación del dipolo.

Ya tenemos una matriz que podemos usar en MatCover, sólo falta guardarla en el directorio de antenas de nuestro trabajo:

```
save('antenas/dipolo900MHz.mat','dipolo900MHz');
```

A partir de este momento podremos usar el dipolo diseñado en cualquier función de MatCover. De esta manera que hemos detallado podremos crear cualquier tipo de antena que queramos utilizar en nuestra herramienta.

Anexo III. Guía de usuario MatCover

En el presente anexo se detallará con precisión cómo funciona cada una de las funciones de MatCover. Este documento será un perfecto punto de partida para los nuevos usuarios de nuestra herramienta, ya que, aunque es una herramienta muy simple de utilizar, un manual puede ayudar a los usuarios que no están acostumbrados a usar herramientas de cálculo de cobertura.

MatCover trabaja sobre MATLAB, por lo que es necesario abrir MATLAB para ejecutar la herramienta. Una vez abierto, deberemos especificar dónde se encuentra la carpeta MatCover y añadir todos sus contenidos a la ruta de MATLAB.

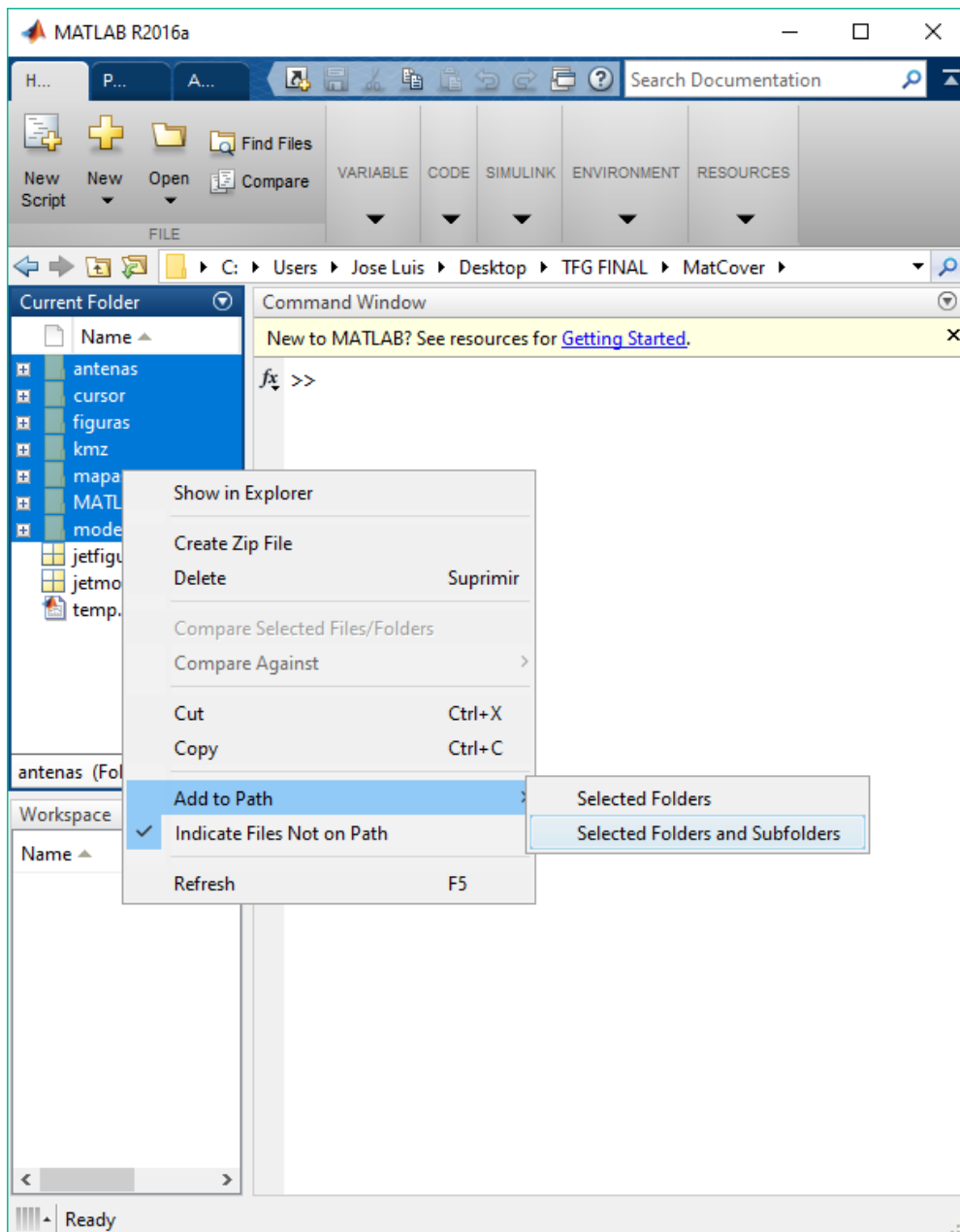


Figura 41. Adición de MatCover a la ruta de MATLAB.

Una vez añadida la carpeta, ya podremos usar MatCover. Para ello simplemente tendremos que introducir en la ventana de comandos el nombre de la herramienta:

```
>> MatCover
```

Como punto de partida veremos la ventana inicial sobre la que se realizan todas las tareas de MatCover.

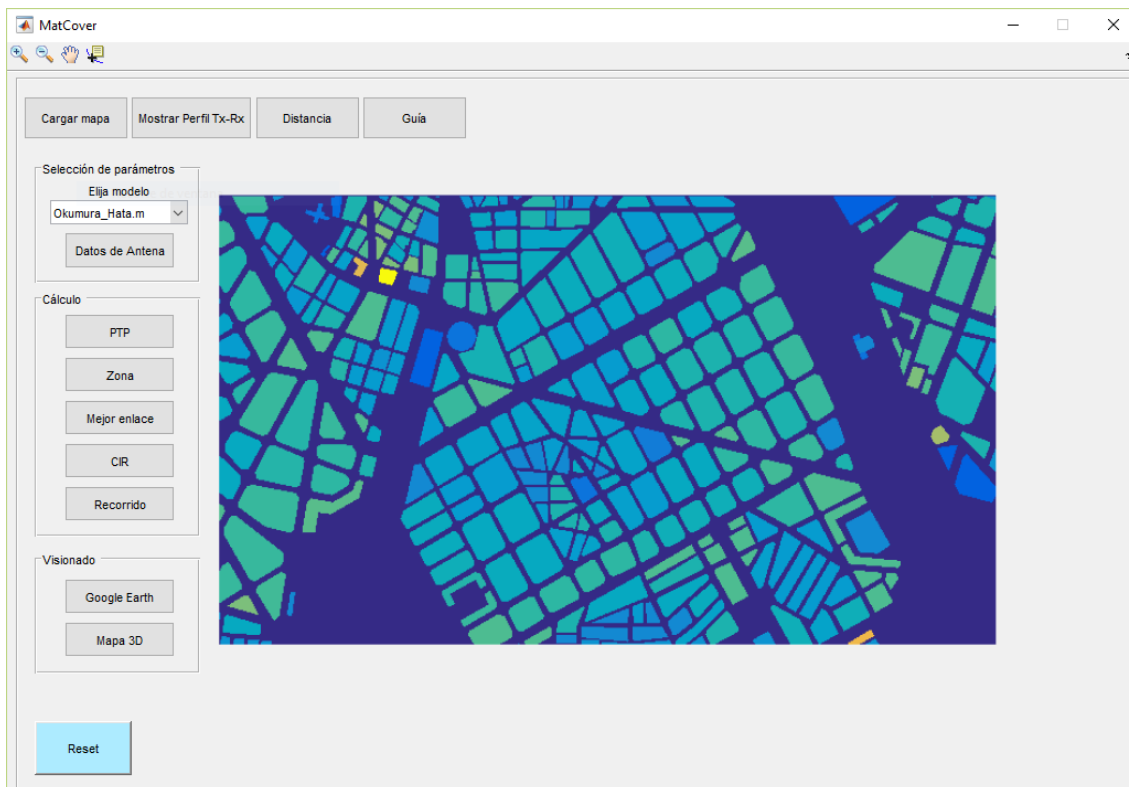


Figura 42. Ventana inicial de MatCover.

En primer lugar MatCover necesita un mapa sobre el que trabajar y hacer los cálculos que le pidamos. Por defecto, MatCover se inicia con la zona centro de Valencia. Si queremos cargar otro mapa deberemos hacer uso del botón que administra esta función, “Cargar mapa”.

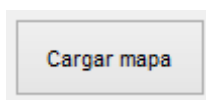


Figura 43. Botón “Cargar mapa”.

Al pulsar este botón se abrirá el explorador de archivos en la carpeta predefinida para los mapas. Por defecto, MatCover incluye la zona centro de Valencia y una zona de Munich.

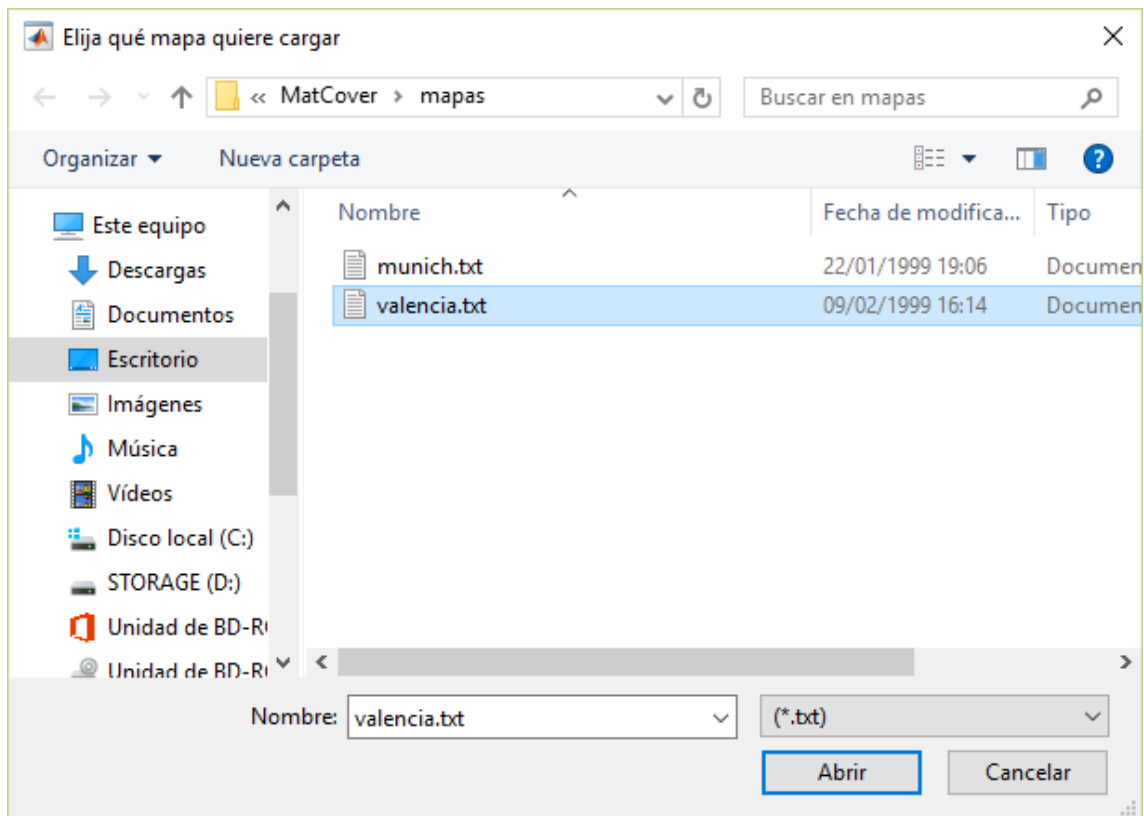


Figura 44. Ventana de selección de mapa.

Una vez elegido el mapa, éste se cargará sobre la ventana inicial de MatCover y ya se podrán realizar las operaciones que se quieran sobre él. En cualquier momento se puede cambiar de mapa con el objetivo de desarrollar otras operaciones.

Una vez se ha seleccionado el mapa con el que se quiere trabajar se debe elegir el modelo de propagación, el cual se usará para realizar los cálculos de cobertura. Esta selección se realiza dentro del panel de “Selección de parámetros”, en la parte izquierda de MatCover.

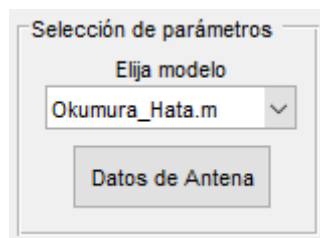


Figura 45. Panel de “Selección de parámetros”.

Este panel consta de dos posibles selecciones, en la parte superior se encuentra un desplegable con los modelos de propagación que se encuentran en la carpeta de “modelos_propagacion” dentro del proyecto. En ese desplegable se elegirá el modelo de propagación que el usuario considere oportuno para los cálculos sucesivos que planea acometer.

En la parte inferior se encuentra un botón que se utiliza para elegir el diagrama de radiación de la antena. Esta elección sólo es necesario realizarse en los cálculos de cobertura que sólo necesiten de una antena para desarrollarse, en el resto de funciones, la selección del diagrama de antenas se hará individualmente para todas las antenas que formen parte del desarrollo de la función. Las funciones que necesitan que se seleccione previamente la antena son:

- PTP.
- PTZ.
- Recorrido.

En el resto de funciones la selección del diagrama de radiación se realiza dentro de la propia función de manera individual.

El menú que se abre al pulsar el botón “Datos de Antena” nos da a elegir entre usar el diagrama de radiación perteneciente a una antena isotrópica o cargar otra antena desde el explorador de archivos.

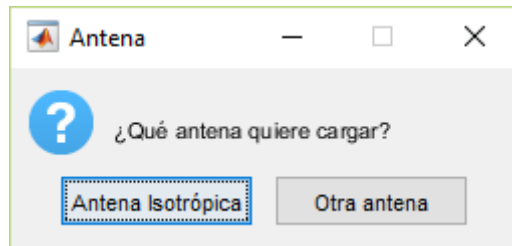


Figura 46. Menú de selección de antena.

En caso de querer cargar otro diagrama y seleccionar la opción “Otra antena”, el explorador de archivos se abrirá en la ubicación predefinida donde se guardan los diagramas de radiación que se hayan diseñado con antelación.

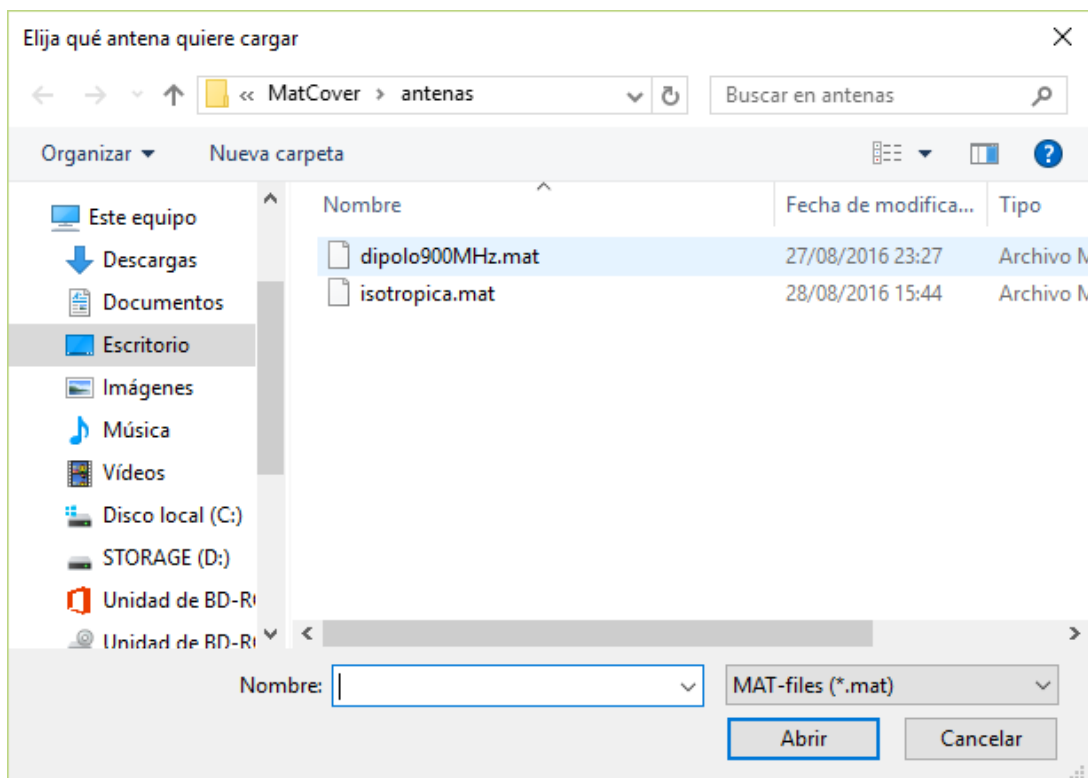


Figura 47. Pantalla de selección de antena.

Una vez seleccionados estos parámetros ya se puede proceder a realizar los cálculos que el usuario quiera.

Antes de comenzar a definir las funciones se debe precisar que hay unos mecanismos de seguridad para que el usuario no pueda introducir los datos de manera incorrecta y que se

produzcan errores de ejecución. Estos mecanismos son comunes a prácticamente todas las funciones por lo que se explicarán en detalle únicamente la primera vez que aparezcan.

Para empezar vamos a detallar una serie de funciones que no tienen como objetivo el cálculo de coberturas sino de conocer con más detalle las especificaciones de un trayecto determinado.

Mostrar Perfil Tx-Rx

Esta función ofrece una representación del perfil existente entre dos puntos.

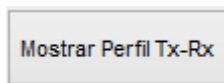


Figura 48. Botón “Mostrar Perfil Tx-Rx”.

Cuando el usuario presione el botón mostrado en la anterior figura, MatCover deshabilitará todas las demás opciones para que no haya algún posible conflicto durante la ejecución de la función que pueda ocasionar errores de ejecución.

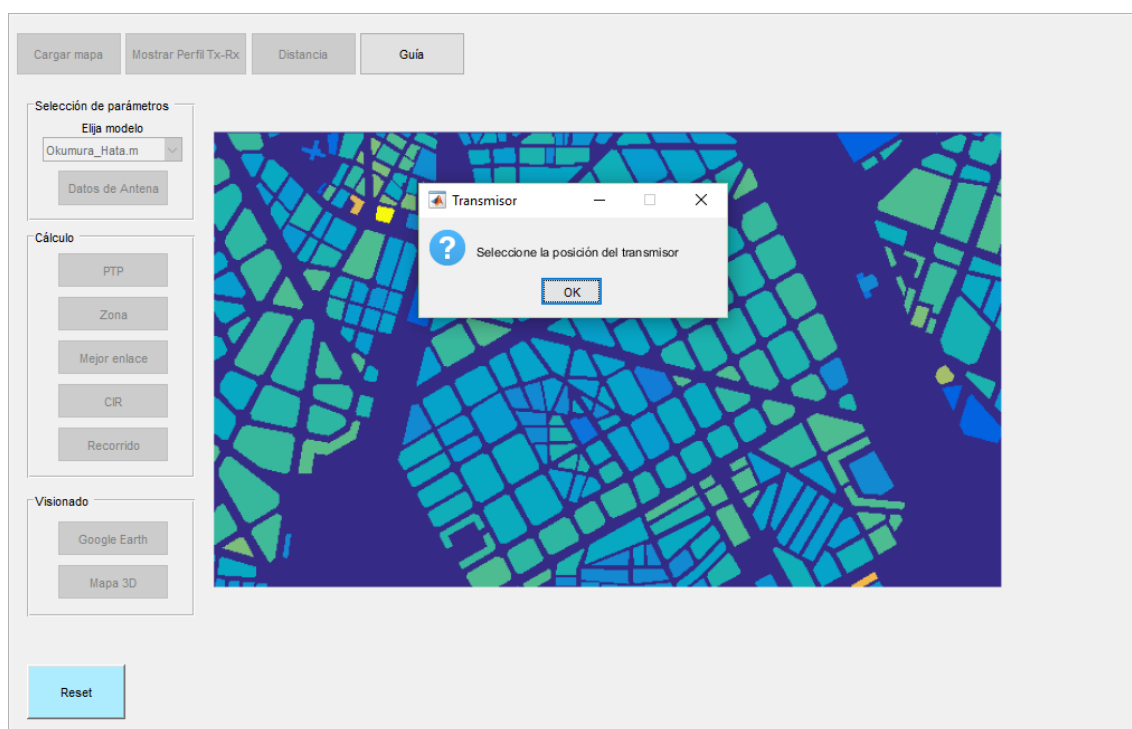


Figura 49. MatCover con botones deshabilitados.

Observamos que dos botones no han sido deshabilitados, éstos son el botón de “Reset”, por si el usuario quiere parar la ejecución de la función dentro de ella, y el botón de “Guía” que abrirá un PDF que incluirá este anexo. Este primer paso es común a todas las funciones de MatCover y se trata de uno de los mecanismos de seguridad.

Volviendo al desarrollo de la función, antes que nada debemos introducir la posición del transmisor como nos indica el cuadro de diálogo, para ello tenemos que pulsar primero el botón “OK” para proseguir con la ejecución, si cerramos el cuadro de diálogo pulsando sobre la “x”, MatCover considerará que no quiere proseguir con el desarrollo de la función y volverá a la ventana inicial.



Figura 50. Selección de localización.

El punto que situemos debe estar dentro de los límites del mapa, si no lo está, MatCover reportará un error.

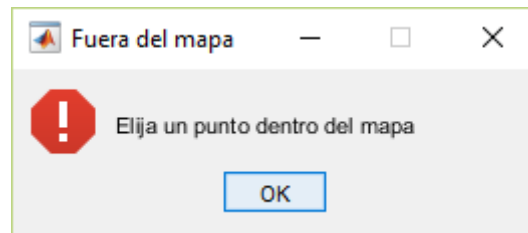


Figura 51. Error de localización.

Si la localización del transmisor es correcta, pasaremos a elegir la situación del receptor. De nuevo, si queremos volver a la ventana inicial deberemos cerrar el cuadro de diálogo con la "X".

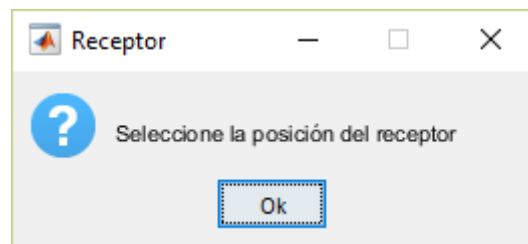


Figura 52. Selección de receptor.

A la hora de seleccionar el receptor como ocurría en la selección del transmisor, si seleccionamos un punto fuera del mapa MatCover nos reportará un error. Este sistema de seguridad está presente siempre que tengamos que seleccionar un punto o zona sobre el mapa.

Una vez seleccionado el receptor se abrirá una nueva figura que contendrá el perfil del trayecto elegido por el usuario.

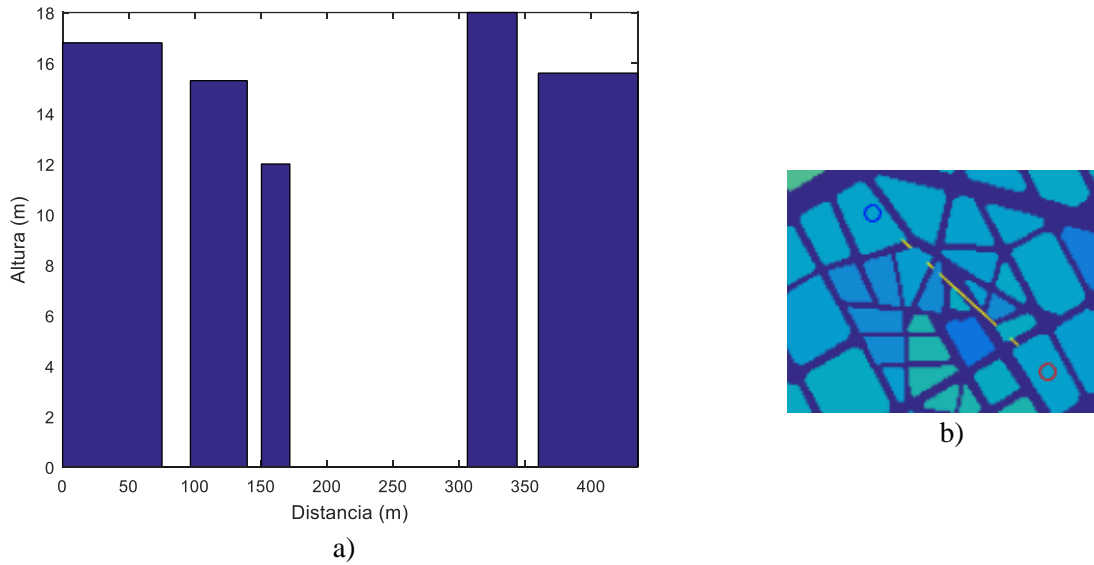


Figura 53. a) representa el perfil y b) es la visión del camino sobre el mapa.

En este punto podemos guardar la figura o realizar cualquier operación sobre ella que contenga la barra de herramientas de figuras de MATLAB.

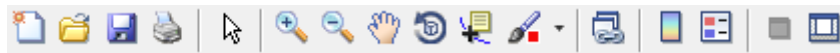


Figura 54. Barra de herramientas de MATLAB.

Para finalizar la función y volver a la ventana inicial deberemos cerrar la figura. Una vez cerrada, MatCover limpiará el mapa de los puntos y líneas que pueda haber y el usuario podrá seguir trabajando.

Distancia

La función distancia únicamente mide la distancia que hay entre dos puntos.

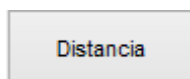


Figura 55. Botón de la función “Distancia”.

MatCover solicitará de la misma manera que lo hizo en la función “Mostrar Perfil Tx-Rx” dos puntos. En cualquier solicitud de introducción de puntos o zonas el usuario puede volver a la ventana inicial si cierra el cuadro de diálogo pulsando sobre la esquina superior derecha.

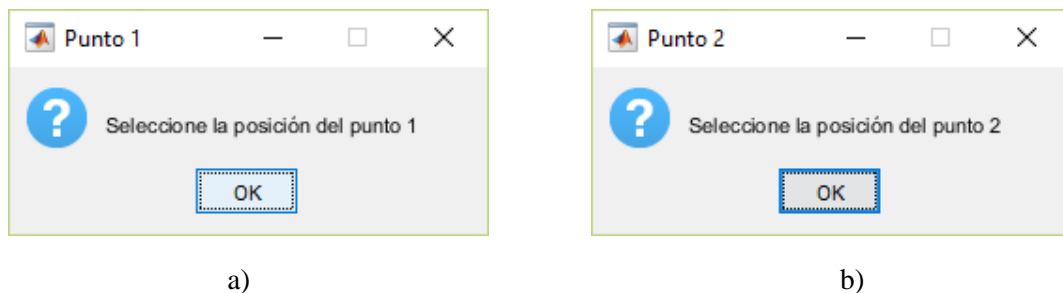


Figura 56. Selección de a) punto 1 y b) punto 2.

A partir de los dos puntos MatCover calculará la distancia que hay entre ellos y la mostrará por pantalla en un nuevo cuadro de diálogo.

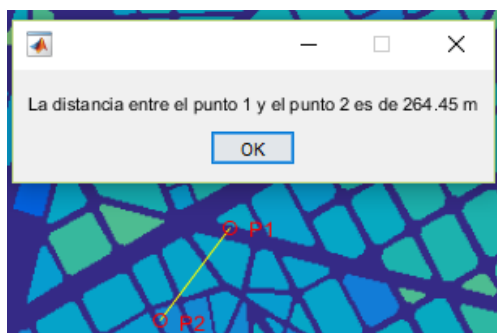


Figura 57. Distancia entre los dos puntos.

Para finalizar la función “Distancia” el usuario puede darle tanto a “OK” como cerrar el cuadro para limpiar el mapa y volver a la ventana inicial.

Guía

El botón “Guía” abre un archivo .pdf el cual contiene este anexo. Sirve de manual y se puede acceder a él en prácticamente cualquier momento de la ejecución de MatCover.



Figura 58. Botón de la función “Guía”.

Mapa 3D

Esta función nos permite visualizar en una figura nueva el mapa que tenemos cargado en ese momento en 3 dimensiones, esta visualización permitirá al usuario observar de una manera más sencilla la diferencia de alturas entre edificios además de hacerse una idea más elaborada sobre el terreno en el que va a trabajar.

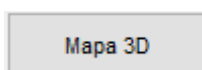


Figura 59. Botón de la función “Mapa 3D”.

Al pulsar el botón veremos directamente el mapa en 3D sin que se necesite de ninguna otra interacción por parte del usuario.

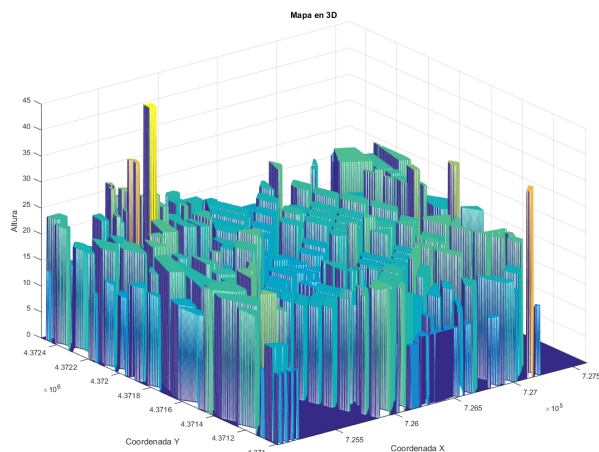


Figura 60. Mapa en 3D.

Cuando hayamos finalizado de visualizar el mapa finalizaremos la función cerrando la figura.

PTP

Esta es la primera de las funciones principales de MatCover y que involucran el cálculo de coberturas.

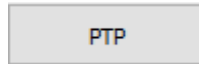


Figura 61. Botón de la función "PTP".

Recordamos que para acceder a esta función previamente se han debido cargar el modelo de propagación y antena deseados por el usuario, en caso contrario MatCover lanzará un aviso y no permitirá continuar con la ejecución de la función.

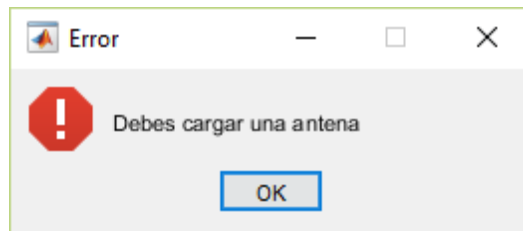
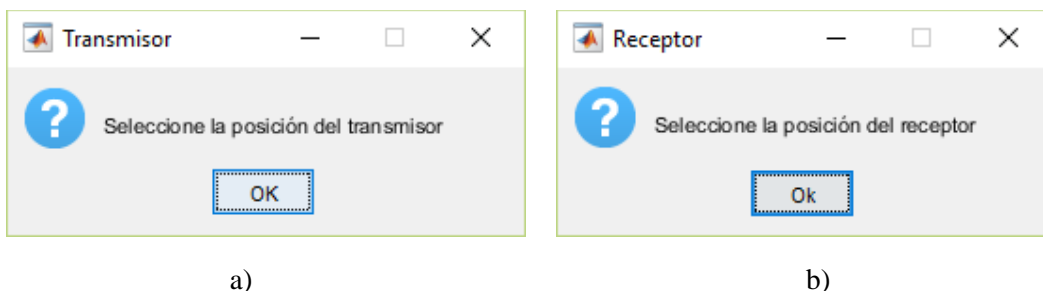


Figura 62. Aviso de carga de diagrama de radiación.

Si los parámetros están correctamente cargados MatCover comenzará la ejecución de PTP. En primer lugar se deben seleccionar las posiciones del transmisor y el receptor.



a)

b)

Figura 63. Selección de a) transmisor y b) receptor.

En el caso de la posición del transmisor la única limitación es que el punto se encuentre dentro del mapa, sin embargo, la posición del receptor cuenta con otra limitación más, el receptor debe encontrarse en la calle ya que MatCover es una aplicación de cálculo de coberturas en exteriores.

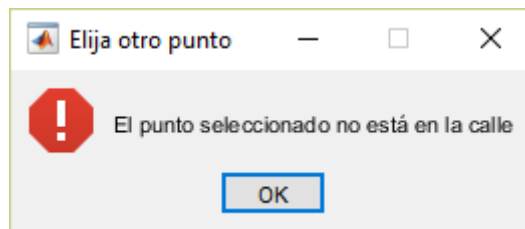


Figura 64. Error de localización del receptor.

En caso de que no hayamos seleccionado un punto en situado en la calle deberemos volver a introducir la ubicación del receptor. Cuando hayamos elegido un punto que cumpla las limitaciones descritas previamente, tendremos que caracterizar una serie de parámetros necesarios

para el cálculo de la cobertura. Estos parámetros serán necesarios en todos los cálculos de cobertura y será el usuario el que los complete basándose en sus necesidades.

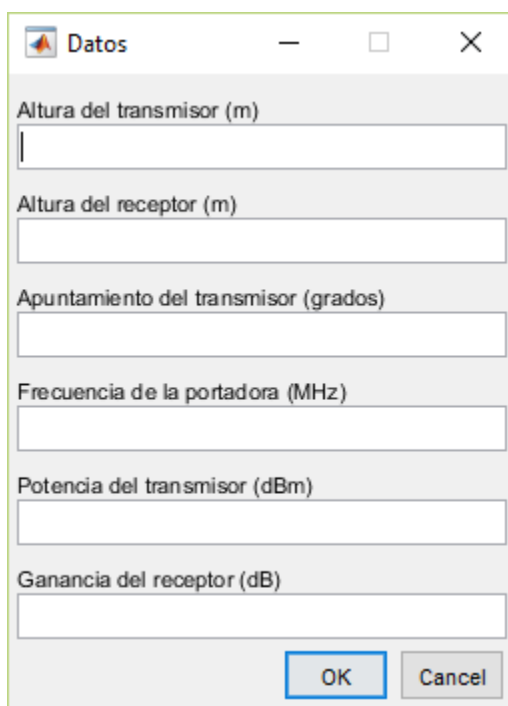


Figura 65. Ventana de introducción de datos.

Si el usuario presiona el botón “*Cancel*”, MatCover se reiniciará a la ventana inicial. En caso de que el usuario quiera proseguir con la ejecución de la función deberá tener en cuenta que con el objetivo de realizar una correcta ejecución de la función hay una serie de limitaciones o medidas de seguridad. En primer lugar, antes de darle a “OK” se deben completar todos los cuadros habilitados para la introducción de datos y sólo se permite la introducción de dígitos. En caso contrario, MatCover lanzará un aviso.

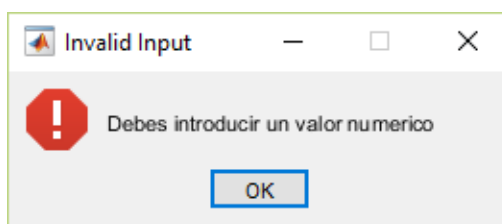
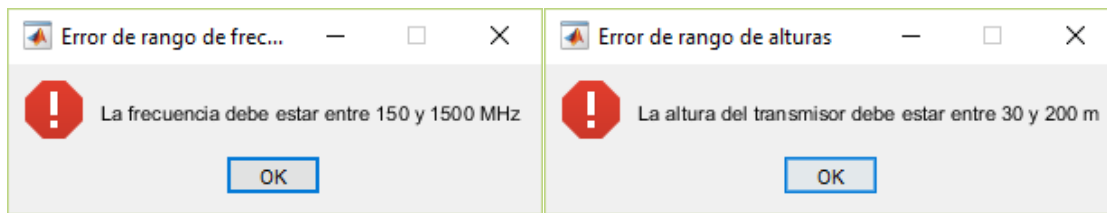


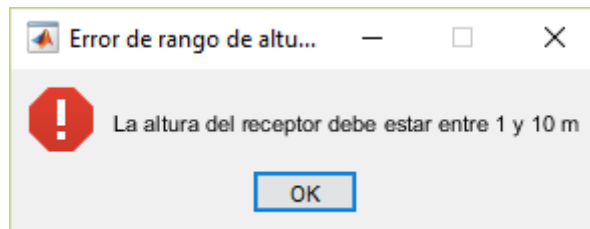
Figura 66. *Invalid Input*.

Por otro lado se encuentran las limitaciones inherentes a los modelos de propagación. Cada modelo de propagación presenta una serie de limitaciones en cuanto a los parámetros del sistema como pueden ser: la altura del transmisor y del receptor, la frecuencia de la portadora, la distancia del receptor... Estos requisitos variarán según el modelo elegido y MatCover nos avisará si hemos introducido algún valor inválido para que podamos subsanarlo. Por ejemplo, si incumplimos todos los requisitos del modelo de Okumura Hata MatCover nos mostrará un aviso por cada valor inválido.



a)

b)



c)

Figura 67. a), b) y c) muestran los errores en la introducción de datos.

Tras hacer saber al usuario los valores inválidos, MatCover vuelve a presentar la ventana de introducción de datos para que el usuario los modifique en concordancia con el modelo elegido.

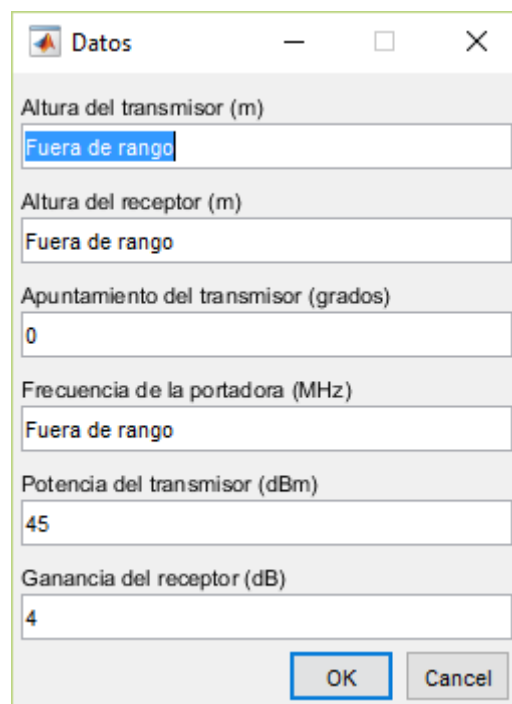


Figura 68. Ventana de introducción de datos.

Este ciclo se repetirá hasta que el usuario introduzca datos válidos para el cálculo de la cobertura o decida finalizar prematuramente la función pulsando el botón “*Cancel*” de la ventana de introducción de datos con lo que finalizaría la ejecución.

Si el usuario ha introducido los datos correctamente, MatCover realizará el cálculo de la cobertura en función de los datos introducidos y las posiciones designadas previamente dando como resultado una ventana como la que se muestra a continuación:

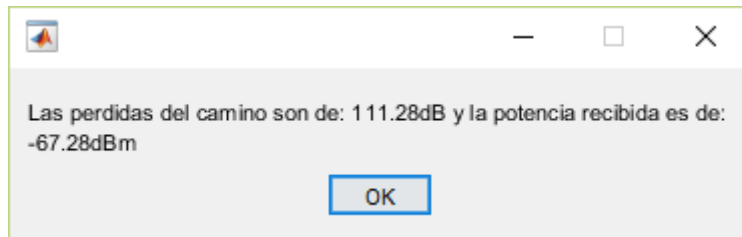
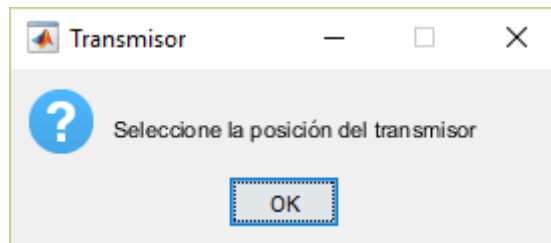


Figura 69. Ventana de resultados de “PTP”.

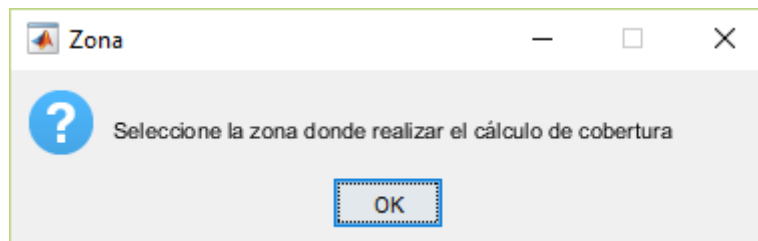
Para finalizar la función el usuario puede darle a “OK” o cerrar la ventana y volverá la ventana inicial de MatCover.

Zona

En la función “Zona” vuelve a ser necesario introducir previamente tanto el modelo de propagación como el diagrama de radiación. Una vez introducidos estos parámetros se puede proceder con la ejecución de la función. En primer lugar MatCover nos solicitará la posición del transmisor tal y como ocurría en la función “PTP”. Sin embargo, en el caso de la ubicación del receptor, en la función “Zona”, el usuario debe introducir una zona donde realizar el cálculo de cobertura.



a)



b)

Figura 70. Selección de a) transmisor y b) zona de cálculo.

Esta zona se delimita pulsando y arrastrando con el botón izquierdo del ratón sobre la superficie del mapa de trabajo. Al igual que con la selección del transmisor, la zona no puede abandonar los límites del mapa, en caso contrario, MatCover lanzará un aviso e instará al usuario a volver a introducir una nueva zona de cálculo.

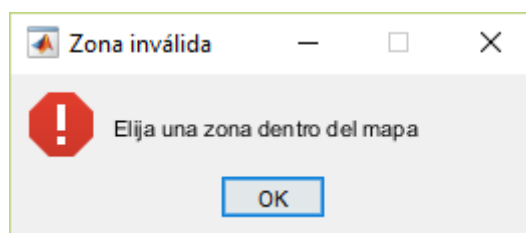


Figura 71. Selección de zona inválida.

También existe otra limitación en cuanto a la delimitación de la zona que ya vimos en la ubicación del receptor en “PTP” y que será común a todas las funciones. Esta es, la posición del receptor, que debe estar en la calle, por lo que a la hora de delimitar la zona, hay que tener en cuenta que al menos una parte de la misma debe estar en la calle, en caso contrario, MatCover lanzará otro aviso y el usuario deberá introducir otra zona que cumpla con las limitaciones.

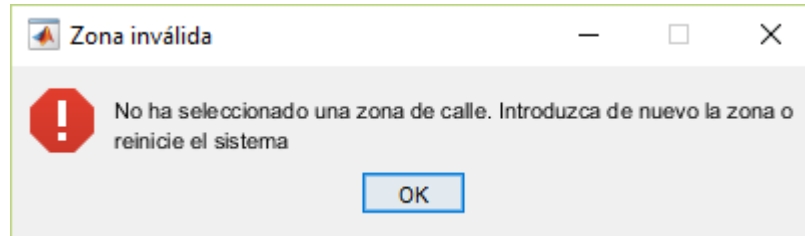


Figura 72. Selección de zona inválida.

Si tanto la ubicación del transmisor como la de la zona de cálculo son válidas, el siguiente paso en la ejecución de la función “Zona” será la introducción de los datos del sistema, se trata de la misma tabla de introducción de valores que comentamos en la función “Zona” con las mismas limitaciones y mensajes de aviso en caso de no cumplirlas. En resumen, los datos introducidos deben ser valores numéricos y deben cumplir los requisitos impuestos por el modelo de propagación elegido.

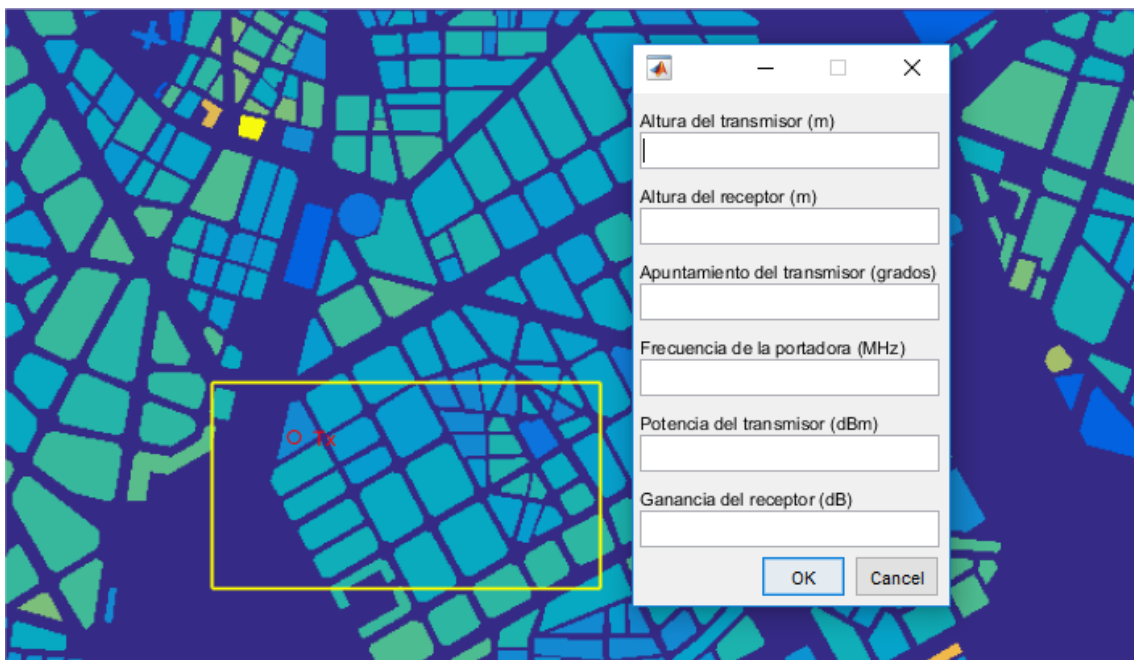


Figura 73. Introducción de datos.

Si los datos introducidos son inválidos, MatCover nos lanzará avisos diciéndonos donde está el error. Una vez los datos introducidos cumplan las condiciones de MatCover y del modelo de propagación, comenzará el cálculo de cobertura. Podemos observar cuánto queda en la barra de progreso que aparecerá mientras se están realizando los cálculos.

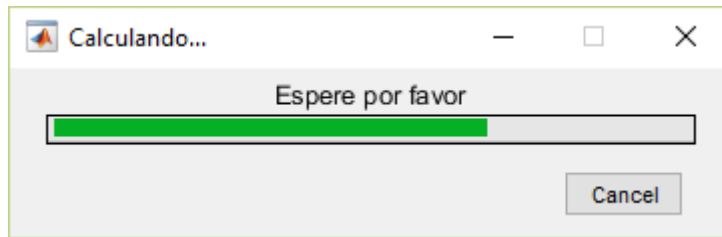


Figura 74. Barra de progreso.

En cualquier momento el usuario puede parar la ejecución de la función pulsando el botón “Cancel” o cerrando la ventana de la barra de progreso.

Cuando MatCover haya finalizado con los cálculos MatCover ofrecerá al usuario dos posibles modos de visualización de los resultados: en el mapa principal o en una figura nueva.

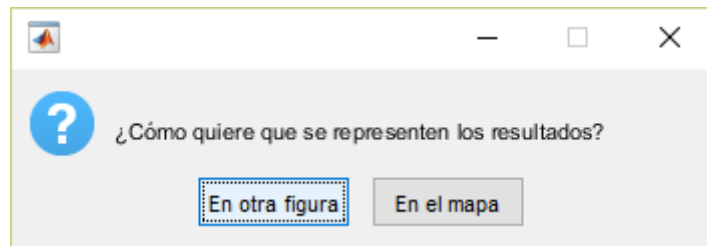


Figura 75. Modos de visualización de resultados

Si elegimos visualizar los resultados en una figura aparte, MatCover abrirá una nueva figura con la zona del mapa que hemos elegido para realizar los cálculos. La potencia recibida estará representada por un mapa de colores que el usuario puede interpretar con la ayuda de la barra de colores que encontrará a la derecha del mapa.

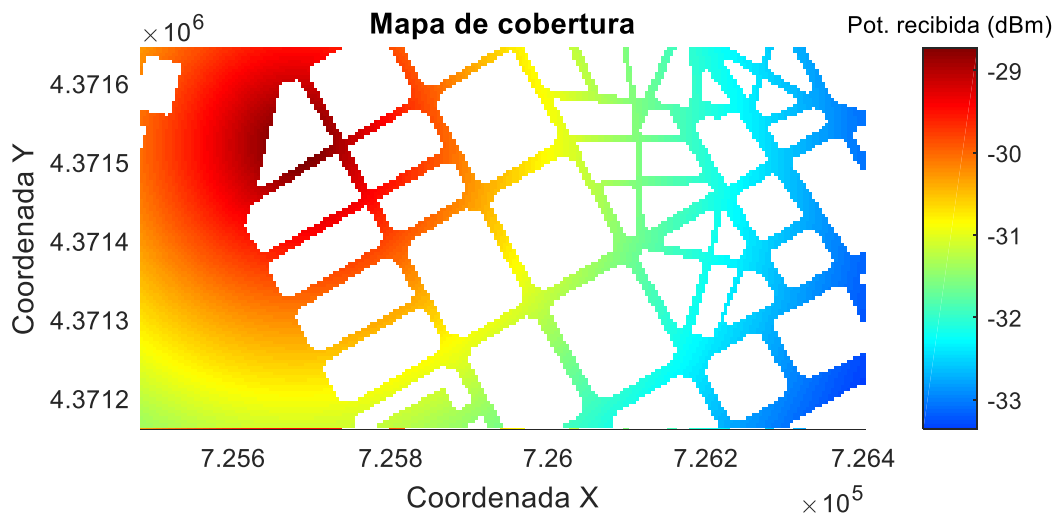


Figura 76. Visualización de resultados en una nueva figura.

En la figura observamos que los edificios están coloreados de color blanco con el objetivo de que el usuario se pueda fijar en los resultados en sí. También podemos observar en el eje x y en el eje y las coordenadas UTM.

Para observar con mayor precisión la potencia recibida en un punto concreto el usuario puede hacer uso de los cursores que se encuentran en la barra de herramientas de la figura. Cuando el usuario haya finalizado de observar los resultados y quiera terminar la ejecución de “Zona”, deberá cerrar la figura en la esquina superior derecha.

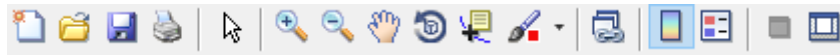


Figura 77. Barra de herramientas de la figura

Si, por el contrario, el usuario ha elegido observar los resultados sobre el mapa principal, la potencia recibida quedará representada siguiendo las mismas directrices que en una figura nueva, con la excepción de que se verá el mapa entero. El usuario también podrá interactuar con cursores sobre el mapa con el objetivo de observar con mayor precisión la potencia recibida en un punto en concreto.

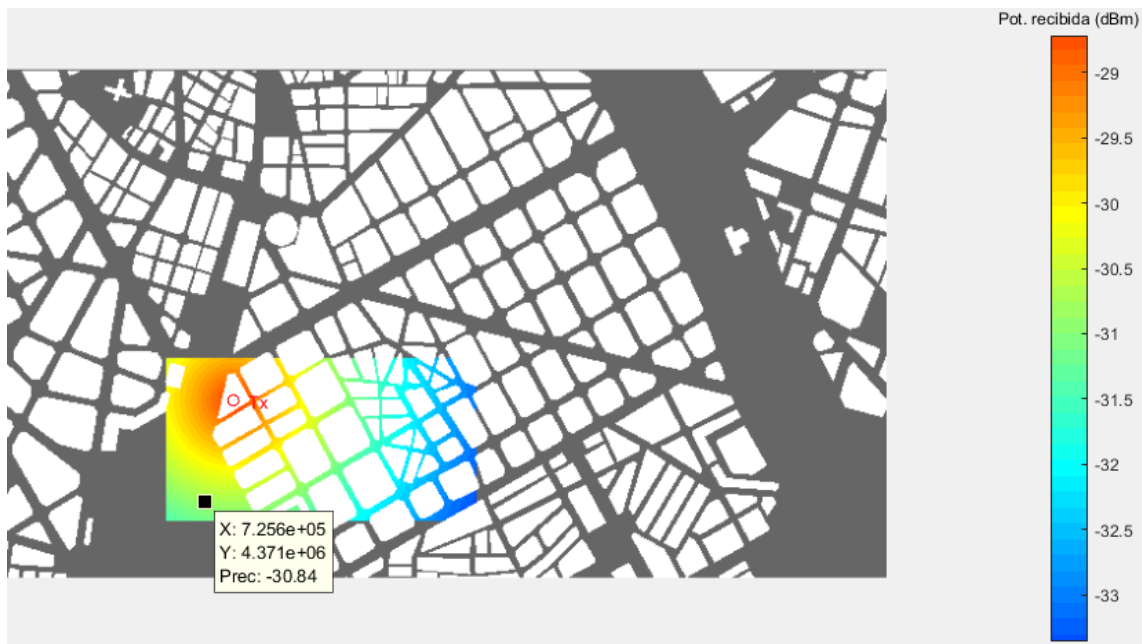


Figura 78. Visualización sobre el mapa principal

Cuando el usuario haya finalizado de observar los resultados, para volver a la ventana inicial y finalizar la ejecución de la función, el usuario deberá hacer clic en la casilla de confirmación que aparecerá en parte superior de la ventana, junto al botón “Guía”.

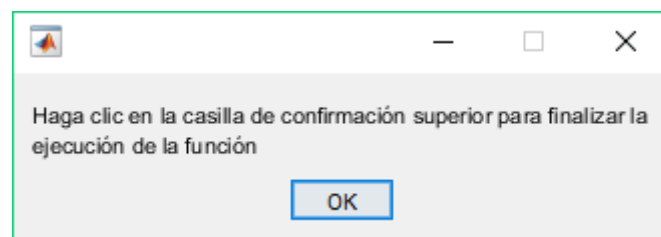


Figura 79. Finalizar “Zona”.



Figura 80. Casilla de confirmación.

[Mejor enlace](#)

La función “Mejor enlace” tiene dos variantes en función del número de receptores. La Ambas tienen el mismo objetivo, ver que transmisor llega mejor al receptor o receptores presentes

en el sistema. Esta función, al contrario de las anteriores, no necesita tener cargado un diagrama de antenas, ya que, como participarán varias antenas en los cálculos, es mucho más versátil tener la opción de poder cargar un diagrama de radiación para cada antena.

En primer lugar, el usuario debe elegir que variante de la función quiere ejecutar.

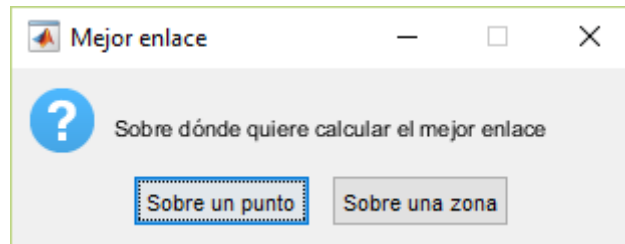


Figura 81. Elección de variante de la función.

Si elegimos la versión “Sobre un punto” el usuario deberá localizar un único receptor sobre el mapa y elegir el número de posibles transmisores.

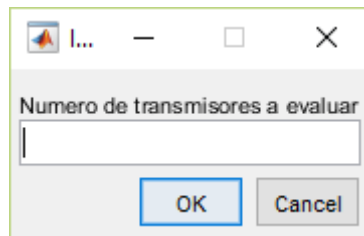
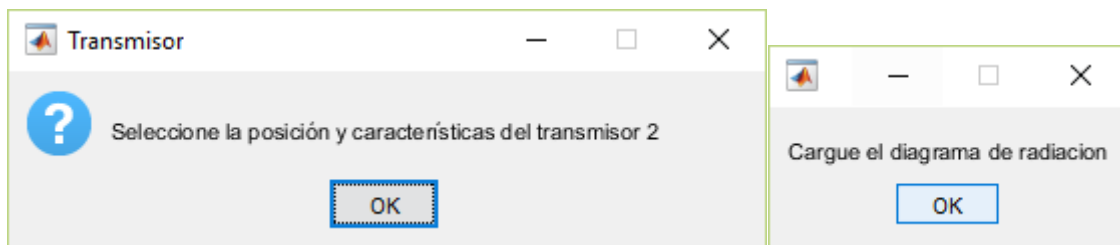


Figura 82. Número de posibles transmisores.

Para cada transmisor el usuario deberá introducir sus características y el diagrama de radiación que quiera para cada uno de ellos.



a)

c)

A screenshot of a dialog box titled "Datos". It contains several input fields for configuration: "Altura del transmisor (m)", "Altura del receptor (m)", "Apuntamiento del transmisor (grados)", "Frecuencia de la portadora (MHz)", "Potencia del transmisor (dBm)", and "Ganancia del receptor (dB)". At the bottom right, there are "OK" and "Cancel" buttons.

b)

Figura 83. a) Configuración de transmisor, b) Ventana de introducción de datos y c) Carga de diagrama de radiación.

Una vez introducidos los datos de todos los transmisores que hayamos elegido se mostrarán los resultados en forma de tabla indicando la potencia recibida por cada transmisor.

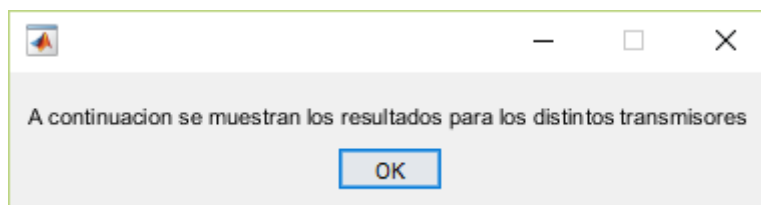


Figura 84. Muestra de resultados.

	Transmisor 1	Transmisor 2	Transmisor 3
Prec (dBm)	-54.40	-55.55	-55.24

Figura 85. Representación de resultados.

Para finalizar la ejecución de esta variante basta con cerrar la figura que contiene a la tabla de resultados.

Si por el contrario queremos ejecutar la variante "Sobre una zona", los pasos serán los mismos que para la variante con un único receptor exceptuando que al principio de la ejecución de la función tendremos que seleccionar una zona donde realizar los cálculos en vez de un único punto.

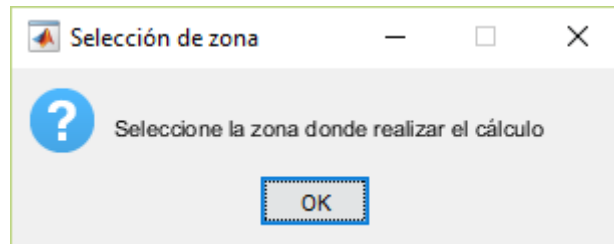


Figura 86. Selección de zona.

Una vez seleccionada la zona, el resto de pasos es igual que en la variante de un único receptor. Tendremos que seleccionar el número de transmisores y caracterizarlos. La presentación de los resultados es similar a la de la función “Zona”. MatCover nos ofrece dos posibles representaciones: en una nueva figura o en el mapa principal.

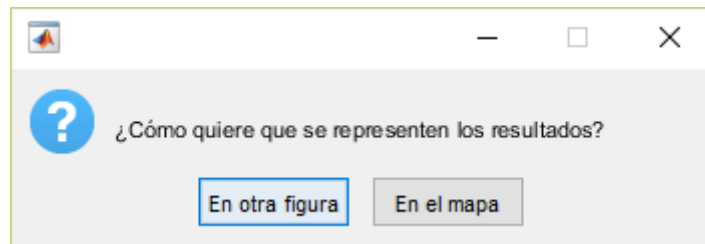


Figura 87. Modos de visualización de resultados.

Si elegimos representar los resultados “En otra figura” obtendremos una visión de la zona seleccionado en una nueva figura de MATLAB, pudiendo hacer uso de la barra de herramientas.

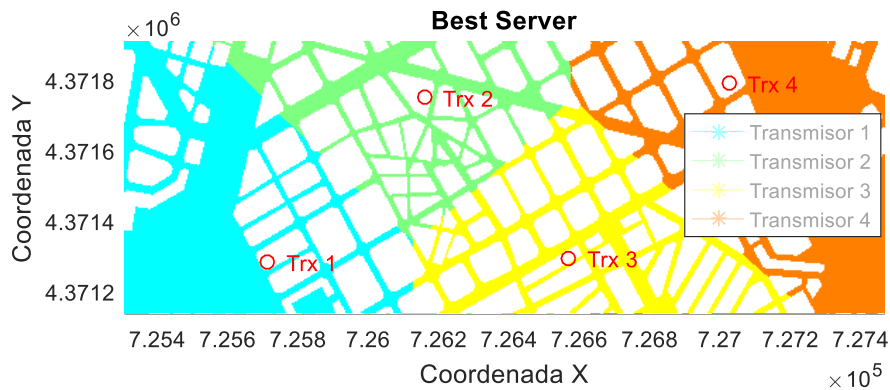


Figura 88. Representación sobre una nueva figura.

Por otra parte, si elegimos visualizar los resultados sobre el mapa principal de MatCover obtendremos un resultado semejante al mostrado a continuación:

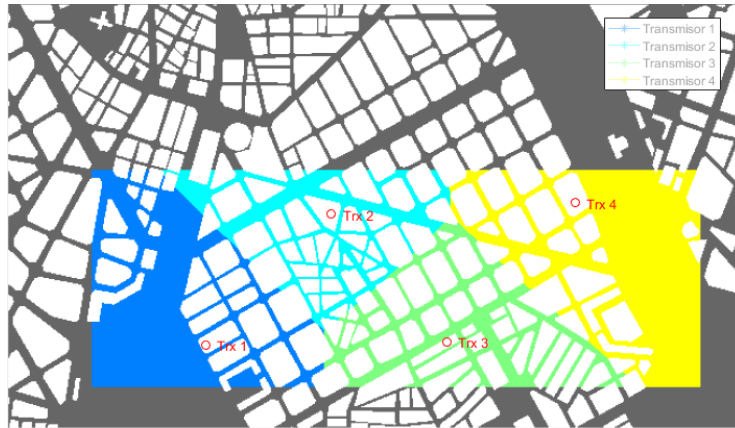


Figura 89. Visualización sobre el mapa principal.

Tal y como ocurría en “Zona”, para finalizar la ejecución de la función el usuario deberá hacer clic en la casilla de confirmación de finalización.

CIR

La ejecución de la función dedicada al cálculo de la relación portadora a interferente es muy similar a la de la función “Zona”, en primer lugar tenemos que seleccionar la zona de cálculo y posteriormente introducir el número de transmisores interferentes.

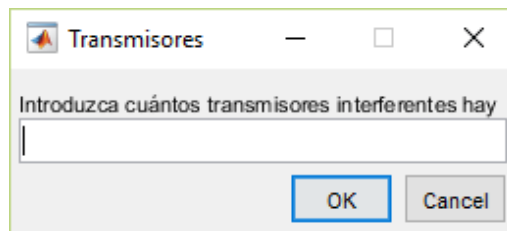
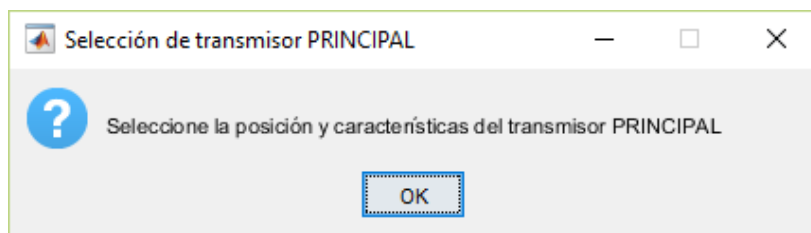
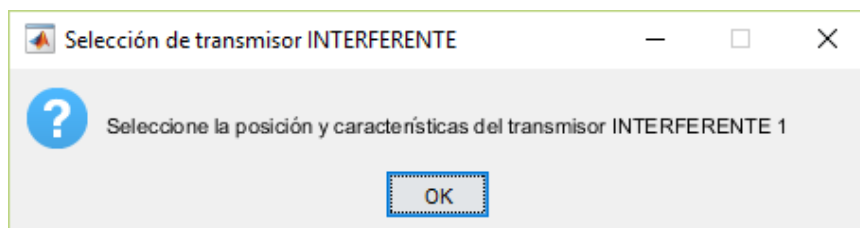


Figura 90. Número de transmisores interferentes.

Una vez introducido el número de transmisores interferentes tendremos que caracterizar tanto el transmisor principal como los interferentes, completando la ventana de datos que ya hemos visto en otras funciones y dotándolas de un diagrama de radiación.



a)



b)

Figura 91. Selección de transmisores a) principal y b) interferentes.

Cuando MatCover tenga todos los datos, procederá a realizar los cálculos de la CIR, mientras se realizan los cálculos se observará el mensaje de espera que vimos en la función “Zona”, y como ocurría con ésta, si pulsamos el botón “Cancel” o cerramos la ventana se cancelará la ejecución de la función y volveremos a la ventana inicial.

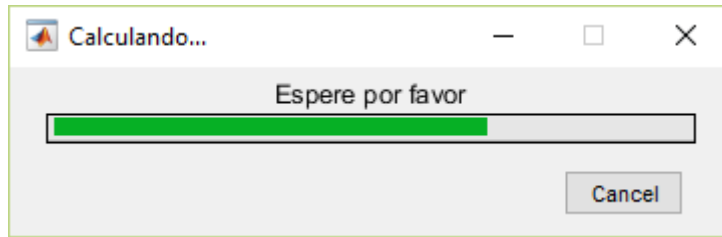


Figura 92. Barra de progreso.

Los modos de visualización de los resultados son los que ya hemos comentado en funciones anteriores, podemos visualizar los resultados en una nueva figura aprovechando la barra de herramientas que ofrece MATLAB para usar el cursor o guardar la figura para su posterior visualización o comparación, o podemos visualizarlos directamente sobre el mapa principal de la aplicación.

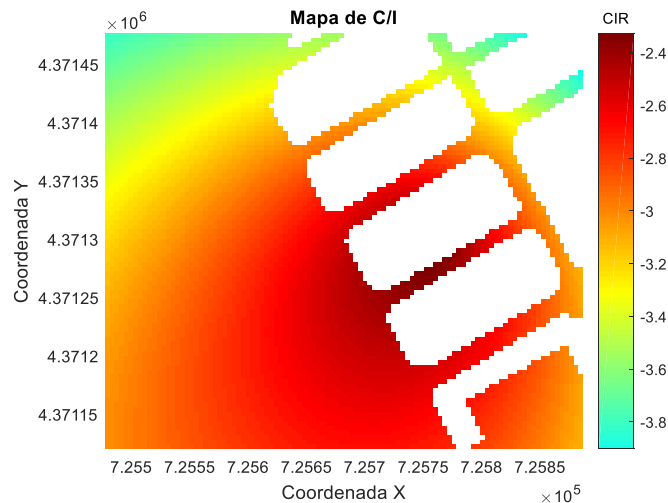


Figura 93. Representación sobre una nueva figura.

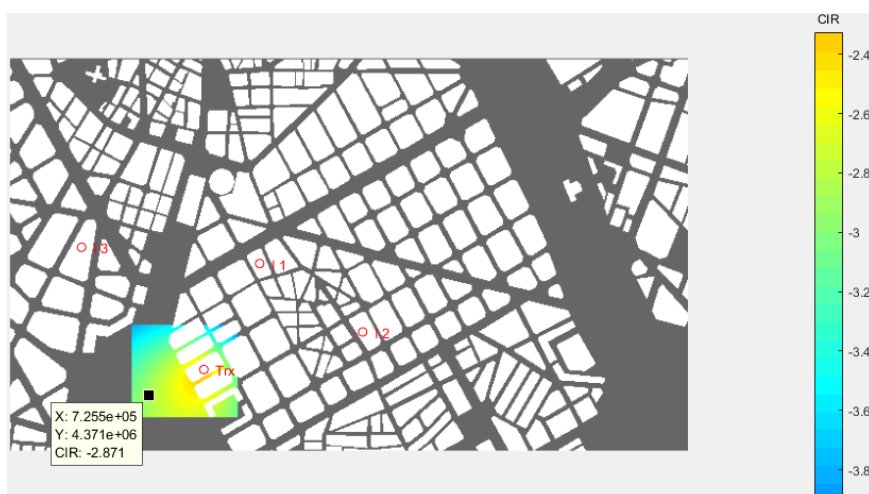


Figura 94. Visualización sobre el mapa principal.

El usuario finalizará la función de la misma manera que ocurría en “PTZ” y “Mejor Zona”

Recorrido

Esta función hace referencia a la potencia recibida a lo largo de un recorrido, el usuario debe introducir cuando se lo indique MatCover una serie de puntos que representarán el recorrido de un móvil.

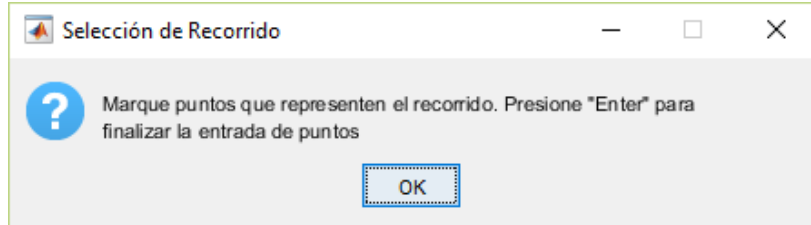
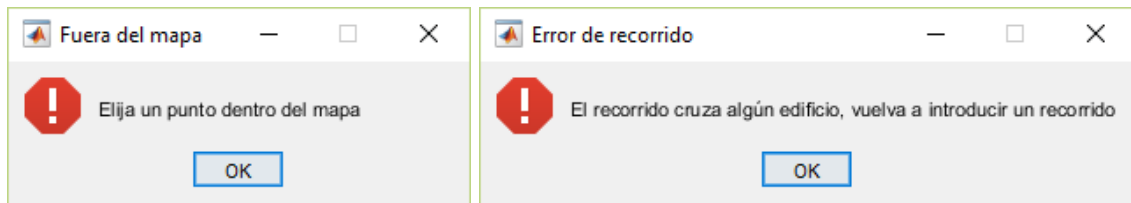


Figura 95. Selección de recorrido.

A la hora de seleccionar el recorrido hay que tener en cuenta que ningún punto puede estar fuera de la zona del mapa ni la línea que representa el recorrido del móvil puede atravesar edificios, es decir, el recorrido sólo puede transcurrir por la zona de la calle.



a)

b)

Figura 96. Advertencias de recorrido.

Una vez indicado el recorrido el usuario deberá completar la tabla de datos del transmisor y receptor que ya se ha mostrado en las funciones anteriores.

El resultado de esta función será una gráfica en cuyo eje de abscisas marcará la distancia recorrida por el móvil y el eje de ordenadas la potencia recibida.

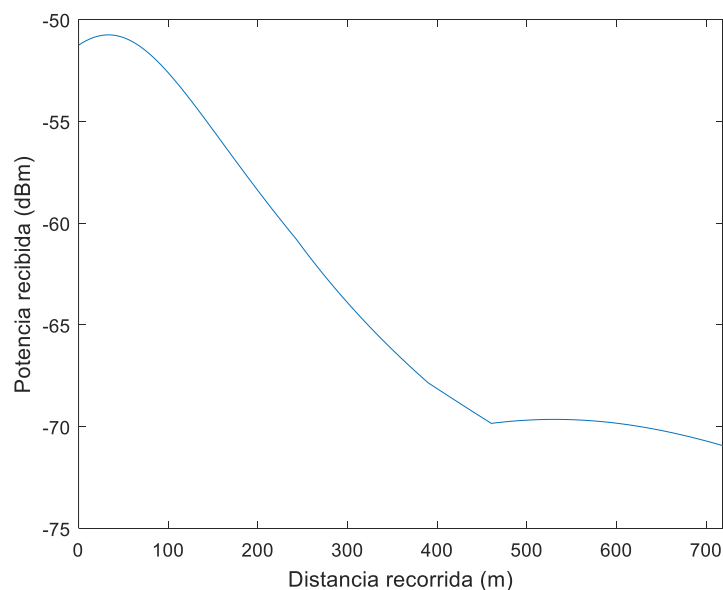


Figura 97. Potencia a lo largo del recorrido.

Para finalizar la función bastará con cerrar la figura y con esto finalizaremos la última función de MatCover destinada al cálculo de coberturas.

Google Earth

Además de las funciones que hemos detallado hasta ahora, existe una última función destinada a la visualización de los resultados en Google Earth.

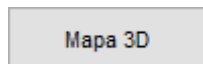


Figura 98. Botón de la función “Google Earth”.

Para utilizar esta función necesitaremos haber guardado previamente algún resultado de los cálculos de cobertura en zona.

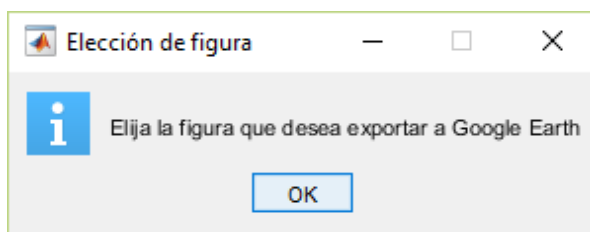


Figura 99. Mensaje de información de elección de figura.

Se abrirá el explorador de Windows en la carpeta destinada a guardar las figuras de los resultados de las funciones de cálculo en zona.

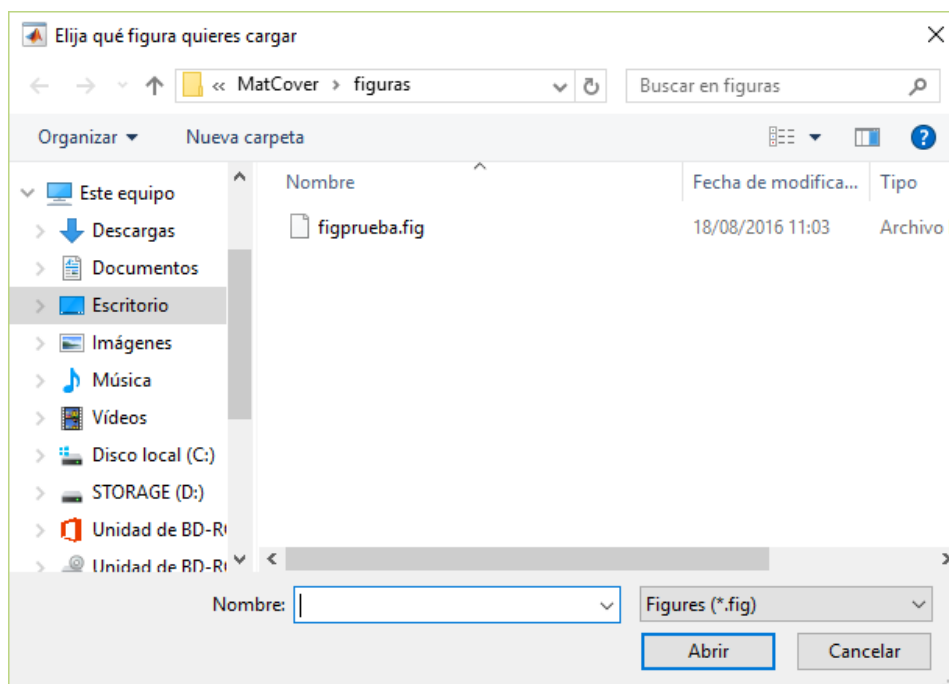


Figura 100. Ventana de elección de figura.

Para sobreponer correctamente la figura en las coordenadas correctas es necesario que el usuario introduzca la zona UTM en la que se encuentra la figura que ha elegido. Por defecto está la zona 30 S perteneciente a Valencia.

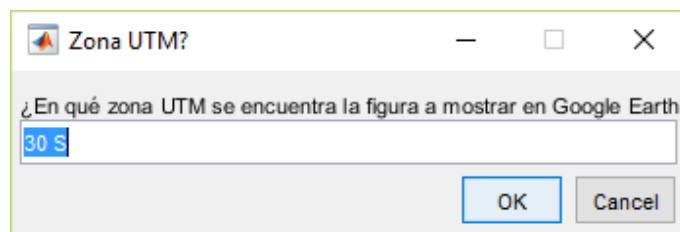


Figura 101. Zona UTM de la figura.

A continuación deberemos introducir el nombre con el que se guardará el fichero .kmz que será ejecutable por Google Earth para mostrarnos los resultados.

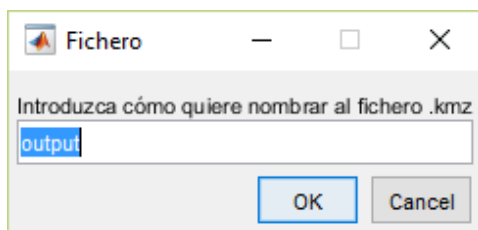


Figura 102. Nombre de fichero.

Si no existe ningún archivo con el mismo nombre, MatCover usará el nombre introducido para crear el archivo. En caso contrario, MatCover lanzará un aviso advirtiéndonos de una posible sobrescritura y preguntándonos qué hacer al respecto.

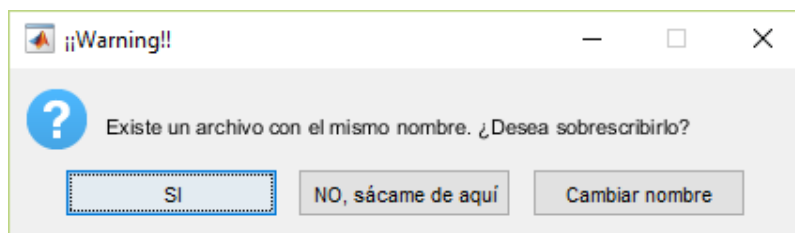


Figura 103. Advertencia de posible sobrescritura.

Podemos elegir sobrescribir el nombre, abandonar la ejecución de la función o cambiar el nombre del archivo tal y como se muestra en la imagen superior.

Si hemos sobrescrito o cambiado el nombre, la ejecución de la función continuará y nos creará el archivo ejecutable por Google Earth y como último paso podemos elegir si ejecutarlo en ese mismo momento.

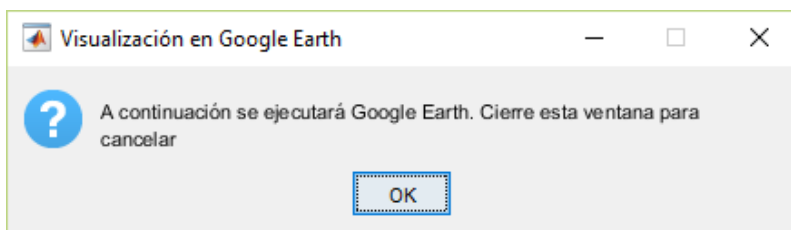
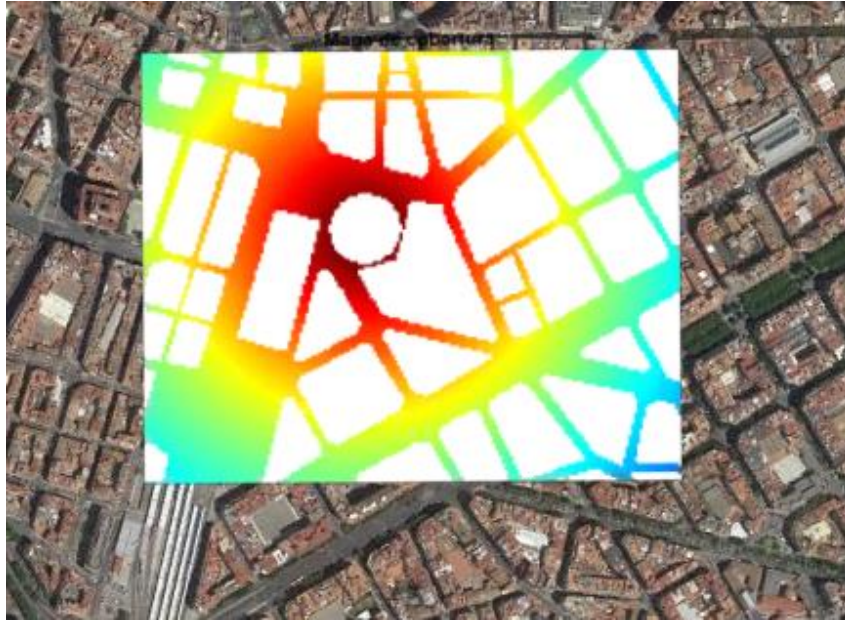
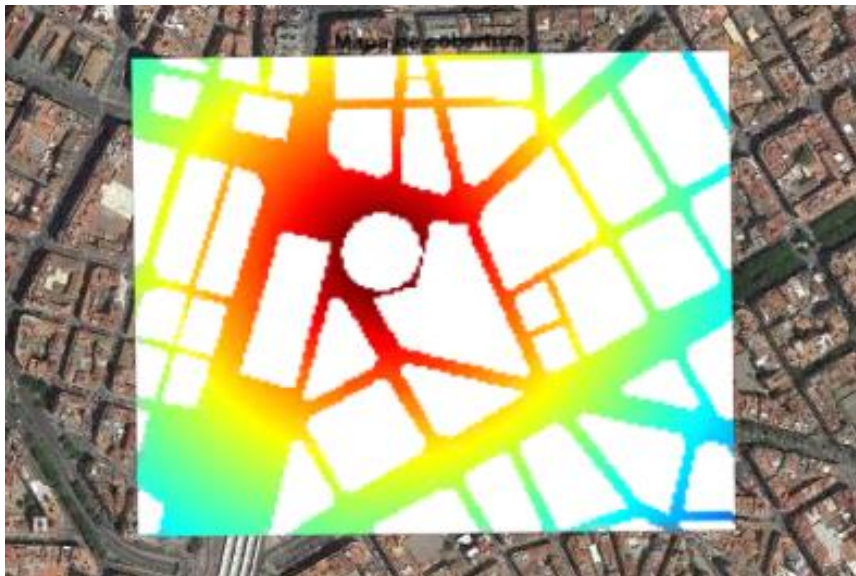


Figura 104. Visualización en Google Earth.

Si continuamos con la ejecución se abrirá Google Earth cargando los resultados que se han elegido al comienzo de la función.



a)



b)

Figura 105. Representación sobre Google Earth.

En la figura anterior se muestra la representación sobre Google Earth. En este caso en la figura a) existe una ligera desviación en las coordenadas que ha sido subsanada en b) mediante el fichero “deriva.m”.

Bibliografía

- [1] Lorenzo Rubio Arjona, “Transparencias asignatura Radiocomunicaciones”, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia. 2015.
- [2] Hernando Rábanos, Jose María, “Transmisión por radio”, Editorial Universitaria Ramón Areces, 5ª Edición, 2006.
- [3] Torlak, Murat, “Radio System Design transparencias”, Telecommunications Switching & Transmission, University of Texas at Dallas.
- [4] Recomendación ITU-R P.1411-8 (07/2015).
- [5] <https://www.xirio-online.com/help/es/okumurahata.html>
- [6] Molisch, Andreas F., “*Wireless Communications*”, John Wiley & Sons, Ltd. 2011.
- [7] <https://www.xirio-online.com/help/es/xia.htm>.