



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA

“MODELO DE PREDICCIÓN DE LEE”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN
COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTAN:

**Diana Cecilia Camacho Olvera
Gabriel Torres Alatraste**

Asesores:

M. en C. Jaime Pedro Abarca Reyna
M. en C. José Ernesto Rojas Lima



México, D.F. 2007

DEDICATORIA

*A ellos que estuvieron con
nosotros a lo largo de
todo este camino
en las buenas y en las malas...*

NUESTROS PADRES

AGRADECIMIENTOS

A mis papás: porque gracias a ellos logré llegar a la meta de mis estudios profesionales, porque gracias a ellos soy la mujer que soy, porque gracias a ellos aprendí los valores de la vida y sobretodo gracias por todo el apoyo y amor que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mis hermanas: porque gracias a todas esas palabras y acciones me han hecho crecer y madurar. A ellas que han estado conmigo siempre que he necesitado una palabra de apoyo. Vonis gracias por enseñarme a valerme por mí misma, siempre estaré contigo no lo olvides. Tantis gracias por aguantarme y tener siempre paciencia conmigo, sabes que cuentan conmigo. Kalis gracias por alentarme y sobretodo por confiar en mí. ...por cierto aquí está.

A mis amigos: porque gracias a esas palabras de ánimo cuando más lo necesité Lili y Karo que fueron las más involucradas en todas esas tardes de cubículos, por esas risas y regaños en común, pero sobre todo por ese apoyo incondicional verdad Adri? A ti Luz porque siempre creíste, me apoyaste y sobretodo confiaste en mí. Andhi nunca olvidaré tus palabras “tú siempre puedes” y gracias a todos aquellos que directa o indirectamente me dieron su apoyo Raúl, Héctor, Karla, Lulú, Marilyn, Oscar, Adrián GRACIAS.

A mis asesores: quienes estuvieron a nuestro lado siempre que necesitamos de su ayuda, de su guía y de sus llamadas de atención. A ti Pedro porque fuiste la persona que me enseñó a querer las comunicaciones, a reflexionar lo que digo y a poner los pies en la tierra siempre que hace falta. A ti Ernesto por tu apoyo y por compartirnos tus conocimientos.

Al grupo del tópico de telefonía móvil: de quienes siempre recibimos ese apoyo y esa fortaleza para que todos saliéramos adelante, gracias.

A ti Gabriel: que durante todo este trabajo has estado a mi lado apoyándome y levantándonos el uno al otro como desde hace tres años. Gracias por compartir todos estos momentos conmigo, por creer en mí, por ayudarme, por aguantar mis arranques de histeria, por comprenderme, por tener siempre esa paciencia y tranquilidad en los momentos más difíciles, por todas esas alegrías y tristezas y sobre todo gracias por ayudarme a hacer posible este sueño.

Diana Cecilia Camacho Olvera

Todo este tiempo estuvieron conmigo apoyándome, alentándome a seguir adelante para alcanzar mis metas, gracias por dar lo mejor de ustedes para que pudiera cumplir otra etapa de mi vida, gracias por su amor, comprensión, paciencia y apoyo, sin ustedes nunca hubiera podido llegar a cumplir este sueño, gracias papás por todo.

De ustedes tuve la mejor de las amistades, con los que jugué, reí y llore, de los que aprendí y a los que enseñe, por ellos puse mi mayor esfuerzo para demostrarles que cuando uno quiere se puede sin importar las adversidades que se presenten, gracias por ser como son Diana, Adriana, Daniel y Beatriz, y por dejarme ser como soy.

Gracias por permitirme entrar en sus vidas, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por festejar mis victorias y lamentar mis derrotas, gracias por todas esas palabras de apoyo, por sus consejos y por sus regaños, gracias a todos aquellos que directa o indirectamente me apoyaron a lo largo de mi vida, por escucharme y por soportarme. A todos mis amigos y conocidos les doy las gracias.

Ustedes me inspiraron para estudiar comunicaciones, cada regaño y cada consejo fue bien recibido porque sabia que era con la mejor intención para forjarme como un profesionista exitoso, no tengo palabras para expresarles todo el respeto y admiración que les tengo, gracias por todo Ernesto y Pedro.

No, gracias a ti por permitirme ser parte de tu sueño por enseñarme y aprender conmigo, por compartir tantos momentos inolvidables durante estos tres años, por soportarme durante la última etapa de este trabajo, por comprenderme y aceptarme como soy sin intentar cambiarme pero sobre todo por ser como eres, por ser *Dianita*.

Gabriel Torres Alatraste

OBJETIVOS

- Comprender los diferentes fenómenos que se presentan en las ondas electromagnéticas cuando se propagan en diferentes superficies, así como los mecanismos de propagación y los factores que afectan el comportamiento de la onda.
- Estudiar los diferentes modelos de predicción de pérdidas por trayectoria y su aplicación en distintos ambientes.
- Comprender la forma en que se obtiene un modelo de predicción punto-punto a partir de un modelo área-área y analizar los diferentes factores involucrados en dicho modelo.
- Evaluar el modelo punto-punto propuesto por William C. Y. Lee por medio de una simulación con una base de datos de un terreno real.
- Una vez programado el modelo punto-punto compararlo con un modelo área-área para demostrar que el modelo punto-punto es más preciso que un modelo área-área.

JUSTIFICACIÓN

Este trabajo mostrará la metodología a seguir para el desarrollo de un modelo área-área y el modelo de predicción de Lee, con esto se demostrará que el modelo punto-punto es más preciso que un modelo área-área por medio de una simulación en Matlab, la cual mostrará de forma gráfica la potencia recibida en un terreno. Esta simulación se realizará en un terreno real de una base de datos de la República Mexicana y esto servirá para contribuir al diseño de los sistemas de comunicación móvil.

INTRODUCCIÓN

La existencia de ondas electromagnéticas que se propagan a través de un medio, se pueden predecir como una consecuencia directa de las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones establecen las relaciones entre las variaciones de un campo eléctrico y un campo magnético tanto en el tiempo como en el espacio. A partir de este trabajo se pudo determinar que las ondas electromagnéticas también obedecen las leyes de la óptica como: reflexión, dispersión, refracción y difracción. Posteriormente Hertz demostró experimentalmente la teoría de Maxwell la cual sirvió para que Marconi desarrollara el primer sistema de comunicación inalámbrico, propiciando con esto el desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones.

En este trabajo se describen los modelos más utilizados de predicción de pérdidas por trayectoria, los cuales son empleados para calcular el número de celdas que un sistema de comunicaciones inalámbrico necesita para proveer cobertura en una zona. Estos modelos se clasifican en área-área y punto-punto. También se mencionarán las principales características del modelo de Lee (modelo punto-punto) y se realizará una simulación con ayuda de la herramienta Matlab, en donde se tendrá un ambiente real ya que se tomarán las bases de datos de la República Mexicana del INEGI. El trabajo está estructurado de la siguiente forma.

En el capítulo 1 se estudiarán los tipos de polarización que tienen las ondas electromagnéticas así como los diferentes fenómenos que se presentan cuando se propagan en un medio (el espacio), estos fenómenos son: reflexión, dispersión, refracción y difracción. Asimismo se mostrarán las bandas de frecuencia del espectro electromagnético y los modos de propagación en cada banda. En el caso de las bandas de UHF y VHF se estudiarán las diferentes formas de propagación debido a que estas bandas fueron designadas para el desarrollo de sistemas de telefonía móvil.

En el capítulo 2 veremos que los modelos de predicción de pérdidas por trayectoria se pueden clasificar en área-área y punto-punto. Los modelos área-área consideran diferentes parámetros como la ubicación de la antena transmisora, la altura y geometría de los edificios, la frecuencia de operación y la distancia entre la estación base y el móvil, así como el tipo de ambiente en el que se pueden emplear. Mientras que para el modelo punto-punto también se consideran las elevaciones que tiene el terreno

En el capítulo 3 se estudiará a detalle el modelo de predicción de pérdidas por trayectoria de Lee el cual es un modelo punto-punto. Se mostrará la metodología para obtener este modelo a partir de un modelo área-área. Además se considerarán dos casos para obtener la potencia recibida en un punto, el primero por medio de la altura efectiva de la antena de la estación base cuando se tiene línea de vista, y en el segundo cuando no se tiene línea de vista.

En el capítulo 4 se presenta una simulación del modelo punto-punto con las bases de datos de los terrenos de diferentes estados de la República Mexicana y se mostrarán las diferencias entre un modelo área-área y un modelo punto-punto.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo.

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
OBJETIVOS	v
JUSTIFICACIÓN	vi
INTRODUCCIÓN	vii
CONTENIDO	ix

CAPÍTULO 1

PROPAGACIÓN	1
1.1. Ondas electromagnéticas.	2
1.2. Espectro electromagnético y modos de propagación.	10
1.3. Propagación en VHF y UHF.	15
1.3.1. Propagación en el espacio libre.	16
1.3.2. Propagación sobre una superficie reflectora plana.	17
1.3.3. Propagación sobre una superficie reflectora curva.	18
1.3.4. Propagación en superficies rugosas.	19
1.4. Tipos de desvanecimientos.	22
Referencias.	24

CAPÍTULO 2

MODELOS DE PROPAGACIÓN	25
2.1. Introducción.	26
2.2. Modelo Okumura-Hata.	26
2.3. Modelo Walfisch-Ikegami.	32

2.4. Modelo Walfisch-Bertoni.	36
2.5. Modelo IMT-2000.	37
2.5.1. Ambiente interior.	38
2.5.2. Ambiente exterior-interior y peatonal.	39
2.5.3. Ambiente vehicular.	39
2.6. Modelo de dos pendientes.	40
2.7. Modelo de Lee.	42
Referencias.	43

CAPÍTULO 3

MODELO DE LEE	44
3.1. Introducción.	45
3.2. Obtención del modelo punto-punto.	48
3.2.1. Condición estándar.	48
3.2.2. Pérdidas por trayectoria para el modelo área-área.	49
3.2.3. Modelo punto-punto.	53
3.3. Pérdidas por trayectoria para el modelo punto-punto.	53
3.3.1. En condiciones con línea de vista.	53
3.3.2. En condiciones sin línea de vista.	59
3.3.2.1. Modelo de borde sencillo (<i>single knife-edge</i>).	59
3.3.2.2. Modelo de borde doble (<i>double knife-edge</i>).	61
3.4. El mérito del modelo punto-punto.	62
Referencias.	64

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DEL MODELO DE LEE	65
4.1. Modelo de Lee en Matlab.	66
4.1.1. Mapas de elevación.	66

4.1.2. Mapa de atenuaciones.	72
4.2. Interfaz GUI de Matlab.	74
4.2.1. Modelo de Lee en interfaz GUI.	75
4.3. Resultados.	76
Referencias.	89
 CONCLUSIONES	 90
 SIGLAS Y ACRÓNIMOS	 93
 ABREVIATURAS	 94

CAPÍTULO 1

PROPAGACIÓN

La existencia de ondas electromagnéticas que se propagan a través de un medio se puede predecir como una consecuencia directa de las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones establecen las relaciones entre las variaciones de un campo eléctrico y un campo magnético tanto en el tiempo como en el espacio. A partir de este trabajo se pudo determinar que las ondas electromagnéticas también obedecen las leyes de la óptica como: reflexión, dispersión, refracción y difracción. Después del trabajo realizado por Maxwell, Hertz demostró experimentalmente esta teoría, la cual sirvió para que Marconi desarrollara el primer sistema de comunicación inalámbrico, dando origen al desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones. Debido a esto el espectro electromagnético se dividió en bandas de frecuencias dependiendo de las características de propagación que presenta cada banda. Dentro de las bandas que conforman este espectro se encuentran las bandas UHF y VHF, las cuales fueron asignadas para el desarrollo de sistemas de comunicaciones móviles. En este capítulo se describen los fenómenos mencionados anteriormente, así como los modos de propagación para las bandas de frecuencias.

1.1. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.

En 1864 James Clerk Maxwell demostró que no se necesitaban conductores para generar campos magnéticos \vec{B} ó campos eléctricos \vec{E} , predijo que un campo magnético que se mueve en el espacio genera un campo eléctrico que también se mueve en el espacio, y viceversa. Estos campos viajan a la velocidad de la luz en forma de una onda. Maxwell predijo que las componentes magnéticas y eléctricas de una onda plana forman siempre un ángulo recto entre sí (perpendicular) y con respecto a la dirección de propagación de la onda, como se muestra en la figura 1.1 [1].

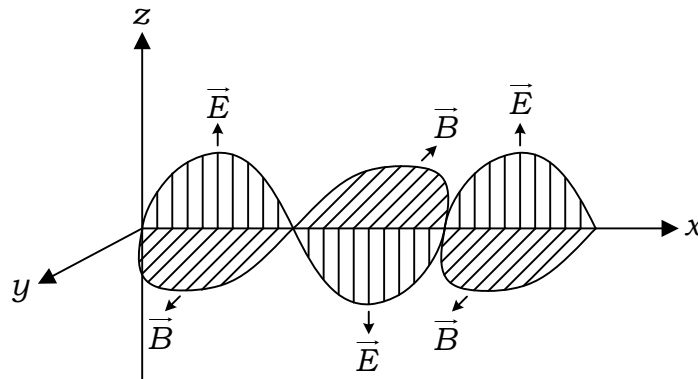


Figura 1.1. Modelo de onda electromagnética.

La teoría de Maxwell fue aceptada hasta 1887 cuando Heinrich Hertz detectó y generó la primera onda electromagnética en su laboratorio con ayuda de un aparato experimental el cual se muestra en la figura 1.2. Este sistema estaba formado por una bobina de Ruhmkorff¹ conectada a dos varillas de cobre, en los extremos de cada varilla se le añadió una esfera grande y una esfera pequeña, las esferas grandes servían como condensadores para almacenar cargas eléctricas y las esferas pequeñas producían chispas entre ellas debido a la carga almacenada [2].

¹ La bobina o carrete de Ruhmkorff producía descargas de miles de voltios a partir de una batería de menos de diez voltios.

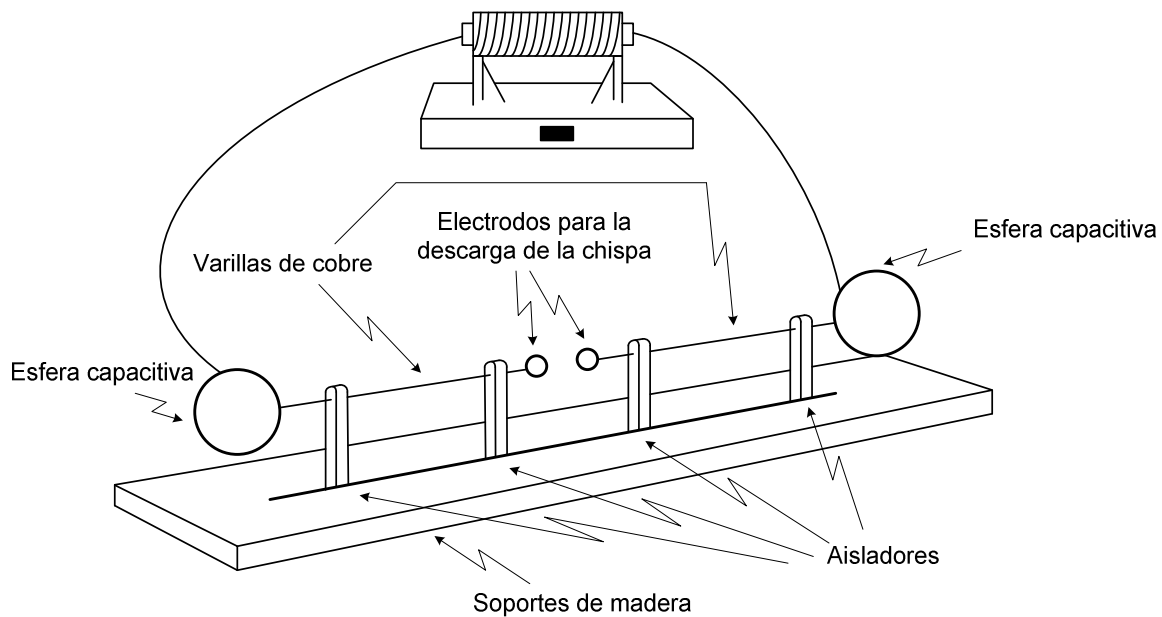


Figura 1.2. Generador de ondas electromagnéticas desarrollado por Hertz.

El invento de Hertz sirvió para que el joven italiano Guglielmo Marconi estableciera la primera transmisión de información por medio de una onda electromagnética a una distancia aproximada de 2.4 Km convirtiéndose en el inventor del primer sistema de telegrafía sin utilizar un medio guiado [3].

Con base a los trabajos realizados por Hertz y Marconi fue posible desarrollar sistemas de comunicaciones inalámbricos capaces de transmitir de un continente a otro. Cuando las ondas electromagnéticas son radiadas se pueden polarizar dependiendo del comportamiento de su campo eléctrico. Debido a este comportamiento la polarización de la onda se puede clasificar como lineal, circular y elíptica.

El primer caso es la polarización lineal en la cual, el vector del campo eléctrico producido por la onda en un punto en el espacio esta orientado a lo largo de una línea recta en cada instante de tiempo. En la figura 1.3 se observa una onda electromagnética con polarización lineal [4].

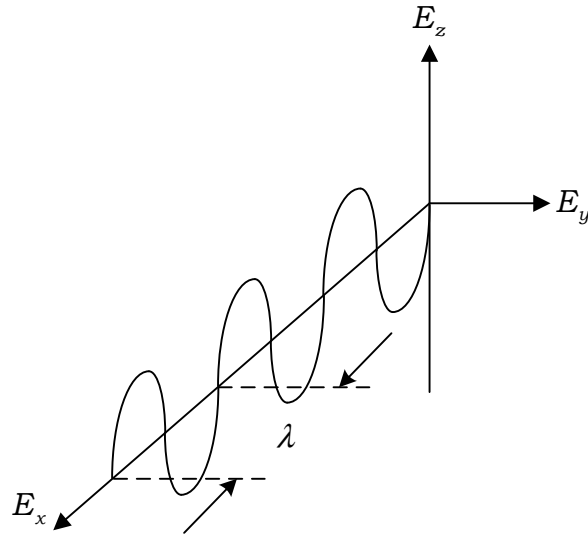


Figura 1.3. Onda electromagnética con polarización lineal.

Tomando como referencia la figura 1.3 la polarización lineal puede ser vertical u horizontal dependiendo de la dirección de propagación. Se considera que es vertical cuando el campo viaja en función de las componentes E_x y E_z , por otra parte es horizontal cuando esta en función de las componentes en E_x y E_y . Esta clasificación de la polarización lineal se representa en la figura 1.4.

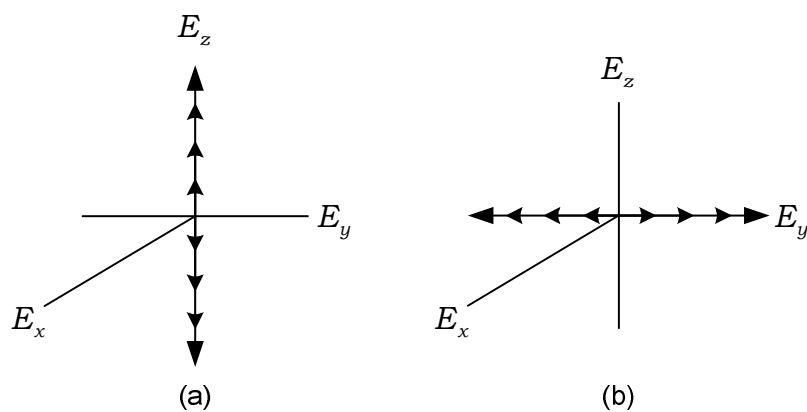


Figura 1.4. (a) Polarización vertical, (b) polarización horizontal.

Por otra parte la polarización circular se presenta cuando el vector del campo eléctrico en un punto en el espacio traza un círculo en función del tiempo, esto puede ser apreciado en la figura 1.5 [4].

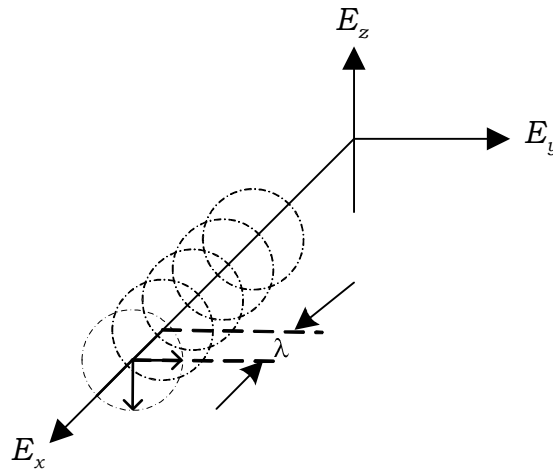


Figura 1.5. Onda electromagnética con polarización circular.

La polarización circular depende del sentido de rotación del campo electromagnético. Este sentido puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda, en la figura 1.6 se muestra este fenómeno.

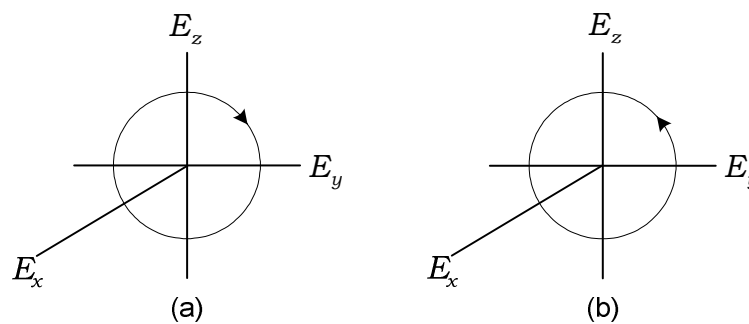


Figura 1.6. (a) Polarización circular derecha, (b) polarización circular izquierda.

Por último la polarización elíptica se representa en la figura 1.7 en la cual el vector del campo electromagnético en un punto en el espacio traza una elipse y varía constantemente en el tiempo.

La polarización elíptica también depende del sentido de rotación del campo de igual manera que la polarización circular [4].

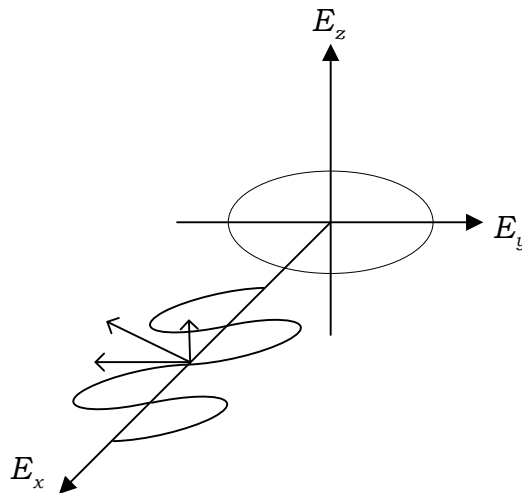


Figura 1.7. Onda electromagnética con polarización elíptica.

Cuando la señal viaja del transmisor al receptor las ondas experimentan diferentes fenómenos como [1, 4]:

- Reflexión.
- Dispersión.
- Refracción.
- Difracción.

A continuación se describen cada uno de estos fenómenos.

Reflexión. La reflexión se presenta cuando una onda incide sobre una superficie plana con un determinado ángulo, de acuerdo a las leyes de reflexión el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado provocando que parte de la energía que tiene la onda se refleje y otra parte sea absorbida ó se disperse en la superficie. En la figura 1.8 se muestra un frente de onda que incide en una superficie plana, la dirección del frente de onda se indica por medio de una línea en ángulo recto con respecto al frente de onda el cual se produce cuando un grupo de ondas se propagan en el espacio y se visualizan de forma lineal a lo largo del tiempo alejándose de la fuente, a esta línea se le conoce como rayo.

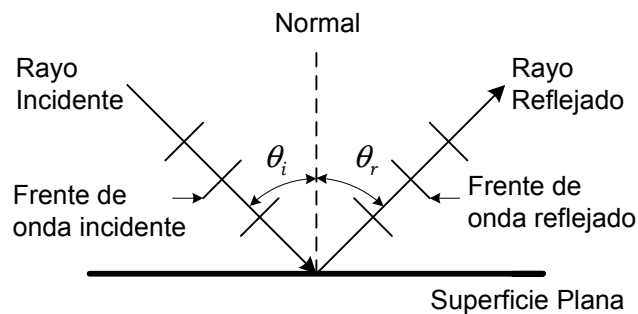


Figura 1.8. Reflexión sobre una superficie plana.

donde θ_i es el ángulo incidente y θ_r es el ángulo reflejado. Para mostrar el comportamiento de las ondas se emplean diagramas de rayos, los cuales muestran las direcciones de las ondas y no las ondas reales.

Dispersión. La dispersión también conocida como reflexión difusa, se presenta cuando un frente de onda incide sobre una superficie rugosa teniendo con esto que gran parte de la energía que tiene la onda sea reflejada en diferentes direcciones y otra parte se refleje con el mismo ángulo incidente.

Refracción. La refracción se presenta cuando la onda electromagnética sufre un cambio en su rapidez y dirección debido a que pasa de un medio a otro; esto solo es posible si los índices de refracción de los dos medios son diferentes como se observa en la figura 1.9.

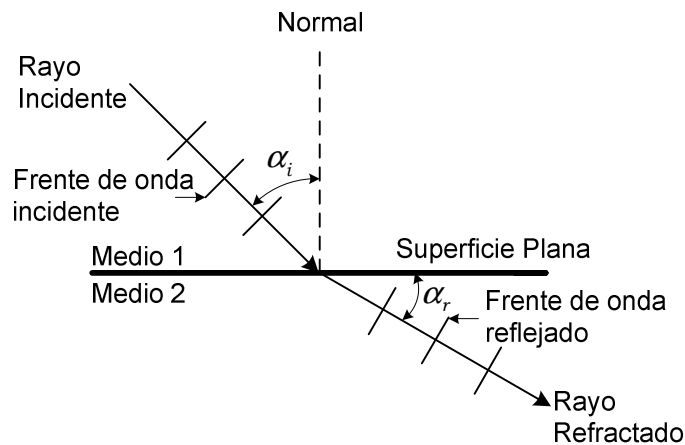


Figura 1.9. Refracción de una onda electromagnética.

donde α_i es el ángulo incidente y α_r es el ángulo refractado.

El índice de refracción es la relación que existe entre la velocidad de la luz en el vacío (300,000 Km/s) y la velocidad de la luz en el medio en el que incide la onda transmitida. En la tabla 1.1 se muestran algunos de los índices de refracción para diferentes medios [5].

Medio	Índice
Vacío	1.00000
Aire	1.00029
Agua (20 °C)	1.33
Vidrio típico crown	1.52

Tabla 1.1. Índices de refracción.

Difracción. La difracción es la flexión de una onda alrededor de un obstáculo en su trayectoria de propagación, este fenómeno se puede apreciar en la figura 1.10 donde AA' es el frente de onda principal, BB' es el frente de onda AA' desplazada el cual choca con un obstáculo provocando que se genere una nueva fuente al borde del obstáculo. Por último CC' es el nuevo frente de onda generado por la combinación del frente de onda BB' y de la nueva fuente que fue generada en el borde. Este fenómeno puede explicarse a partir del principio de Huygens el cual se describe a continuación.

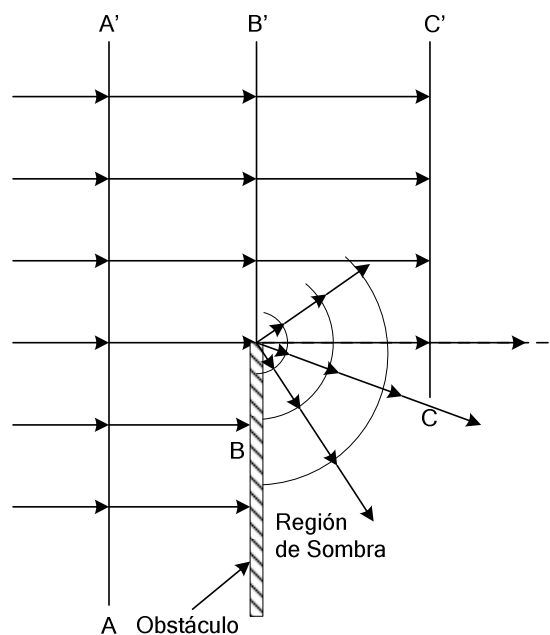


Figura 1.10. Difracción en el borde de un obstáculo.

Principio de Huygen. El principio de Huygen establece que cada punto que conforma un frente de onda produce una pequeña onda, que al combinarse con otras ondas generadas producen un nuevo frente de onda el cual se considera como una fuente puntual y va dirigida en la dirección de propagación del frente de onda original, representado en la figura 1.11, donde AA' es el frente de onda original conformado por las ondas 1, 2 y 3. Estas ondas al combinarse constructiva o destructivamente producen el frente de onda BB' siguiendo este principio.

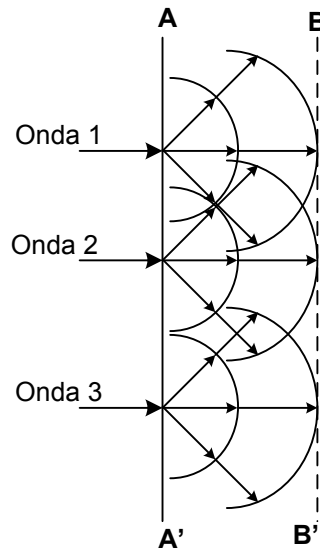


Figura 1.11. Principio de Huygen en un frente de onda plano.

1.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y MODOS DE PROPAGACIÓN.

Por norma internacional el espectro electromagnético esta dividido en bandas de frecuencias, las cuales se utilizan dependiendo de la aplicación que se requiera. Dependiendo de la banda que utilice el sistema de comunicaciones existen diferentes modos de propagación los cuales se muestran en la figura 1.12 [6, 7].

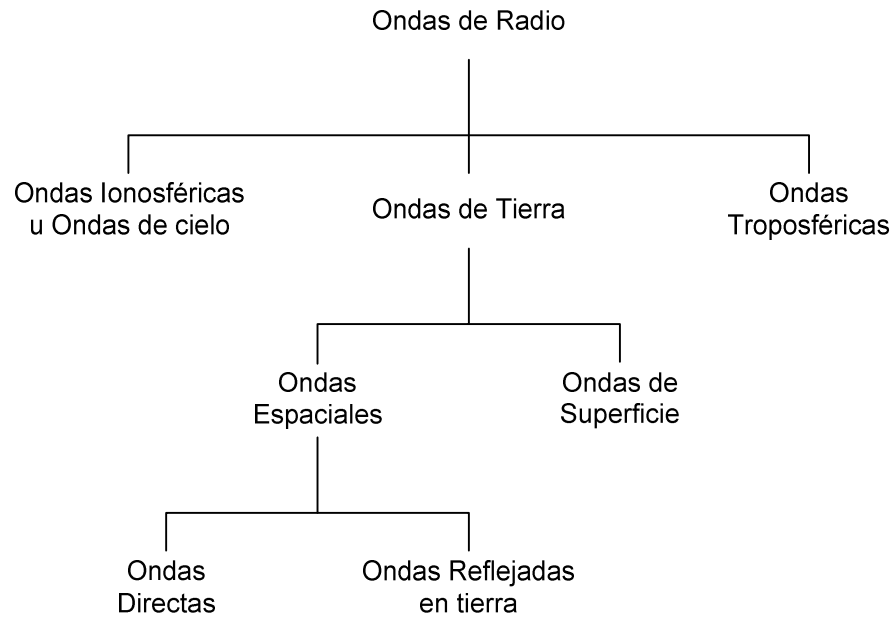


Figura 1.12. Clasificación de los modos de propagación.

El primer modo de propagación son las ondas que viajan por la capa de la ionosfera a estas ondas se les conocen como ondas ionosféricas u ondas de cielo; sin embargo en esta capa se presentan variaciones en la propagación de la señal debido a la posición del sol (v. figura 1.13).

Por otra parte las ondas que se propagan en la parte baja de la atmósfera son conocidas como ondas troposféricas, en estas zonas es donde se forman las nubes y las ondas pueden sufrir variaciones debido a la temperatura y humedad de las capas de aire (v. figura 1.13).

Otra forma en que las ondas se propagan es por medio de las ondas de tierra estas ondas viajan de manera adyacente a la curvatura de la tierra por lo que presentan polarización vertical debido a que cualquier componente del campo eléctrico horizontal sería absorbido por la tierra, es por eso que se emplean antenas de polarización vertical. Las ondas de tierra se clasifican en dos tipos: onda espacial y onda de superficie (v. figura 1.13).

La onda espacial está compuesta por dos ondas, la onda directa entre la antena transmisora y la receptora; y la onda reflejada en tierra que también tiene su origen en la antena transmisora. La diferencia de la distancia recorrida por las dos ondas determinará la intensidad de la señal recibida (v. figura 1.13).

La onda de superficie se guía con respecto a la curvatura de la Tierra. Sin embargo, como la tierra no es un conductor perfecto la energía de la onda puede sufrir pérdidas debido a la atenuación provocada por la constante de conductividad y la constante dieléctrica de la tierra (v. figura 1.13).

La figura 1.13 muestra cada uno de los modos de propagación descritos anteriormente.

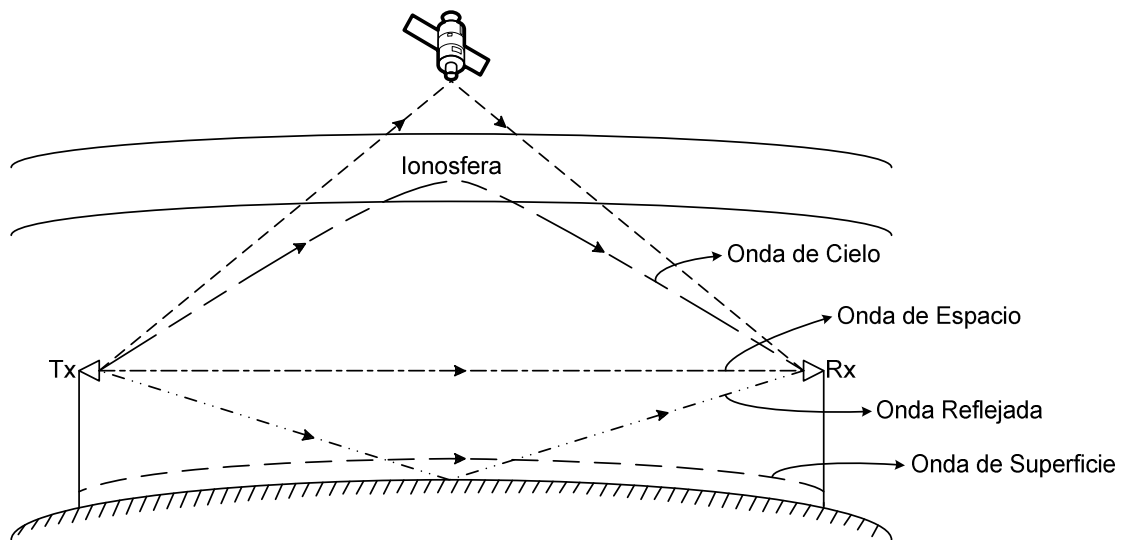


Figura 1.13. Modos de propagación.

Retomando el tema del espectro electromagnético las bandas de frecuencias van desde los 3 KHz a los 300 GHz. Cada una de estas bandas se puede apreciar en la tabla 1.2 [7].

BANDA DE FRECUENCIA	RANGO DE FRECUENCIA
Extremadamente baja frecuencia (ELF)	< 3 KHz
Muy baja frecuencia (VLF)	3 - 30 KHz
Baja frecuencia (LF)	30 - 300 KHz
Frecuencia media (MF)	300 KHz – 3 MHz
Alta frecuencia (HF)	3 - 30 MHz
Muy alta frecuencia (VHF)	30 - 300 MHz
Ultra alta frecuencia (UHF)	300 MHz - 3 GHz
Súper alta frecuencia (SHF)	3 - 30 GHz
Extra alta frecuencia (EHF)	30 - 300 GHz

Tabla 1.2. Bandas de frecuencias de radio.

En VLF la longitud de onda es muy grande, aproximadamente 10^5 m, por consiguiente las antenas son muy grandes provocado que las antenas estén ubicadas muy cerca de la tierra. Las ondas son reflejadas en la ionosfera por lo que emplea las ondas ionosféricas como modo de propagación.

Algunos de los sistemas que maneja esta banda son los sistemas de navegación, el telégrafo y comunicaciones en submarinos. Se pueden realizar transmisiones digitales en esta banda, sin embargo el espectro disponible es muy pequeño generando una tasa de datos extremadamente baja.

En LF el modo de propagación es por ondas de tierra, esta banda es utilizada principalmente en comunicaciones a larga distancia y en sistemas de navegación, las antenas que emplean son muy grandes y la transmisión se realiza con alta potencias.

Por otro lado, MF también emplea ondas de tierra pero con la diferencia de que el ancho de banda disponible en MF es mayor. En MF es posible transmitir a varios cientos de kilómetros especialmente durante el día, mientras que por la noche la propagación se realiza en la capa D (v. figura 1.14) de la Tierra por medio de ondas de cielo. Es posible que se presenten interferencias, debido a que la señal puede llegar de la onda de tierra y de la onda de cielo al mismo tiempo.

En HF se puede presentar la propagación por ondas de tierra, pero por lo general la propagación se realiza por medio de ondas ionosféricas o de cielo. La característica principal de esta banda es que no puede ser utilizada para sistemas civiles de radio, debido a que las capas D, E y F (v. figura 1.14) de la ionosfera varían constantemente dependiendo de la hora del día, la estación del año y la zona geográfica.

Para las bandas VHF y UHF es muy difícil que exista propagación por onda de cielo, por lo que la comunicación se efectúa por medio de las ondas de espacio de tal manera que la transmisión se realiza por la onda directa y la onda reflejada. En este caso las antenas son pequeñas y pueden ser montadas sobre mástiles; debido al ancho de banda disponible se han desarrollado en esta banda la mayoría de los sistemas de comunicaciones móviles.

A la banda SHF se le conoce con el nombre de microondas, la cual puede ser empleada para describir la fracción de la banda UHF que se encuentra por arriba de los 1.5 GHz. Es importante que en la trayectoria de propagación se tenga línea de vista entre las antenas transmisora y receptora, de otra manera las pérdidas generadas serían extremadamente altas. A estas frecuencias es posible diseñar pequeñas antenas con ganancias grandes, las cuales concentran la radiación en la dirección requerida. Las microondas son usadas para las comunicaciones vía satélite, enlaces terrestres punto a punto, radares y sistemas de comunicación de corto alcance.

En la banda EHF la propagación se realiza por medio de ondas milimétricas, en comparación con las bajas frecuencias, esta banda dispone de un ancho de banda enorme. Es necesario que exista línea de vista durante la propagación, aunque en algunas ocasiones se presentan interferencias de las ondas reflejadas de tierra, la mayoría de las veces esas interferencias son insignificantes porque la rugosidad del terreno es mucho mayor en comparación con la longitud de onda.

En caso de que la propagación se realice en un terreno muy liso o sobre agua, es necesario considerar el efecto de la onda reflejada en la superficie.

En la figura 1.14 se muestran las capas de la atmósfera la cual se divide en troposfera, estratosfera e ionosfera. Esta última se divide en cuatro capas, las capas D, E, F1 y F2 varían dependiendo de la posición del sol.

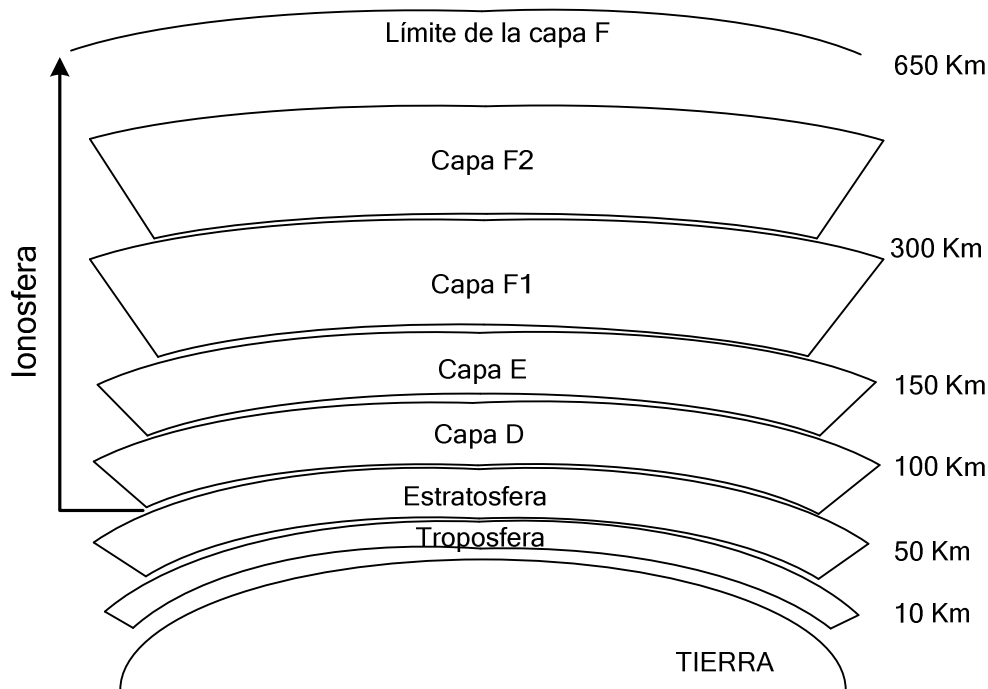


Figura 1.14. Capas de la atmósfera.

1.3. PROPAGACIÓN EN VHF y UHF.

Como caso especial para los sistemas de comunicaciones inalámbricos es necesario elegir una banda de frecuencia que permita una comunicación entre el transmisor y el receptor. Las bandas VHF y UHF fueron designadas debido a varios factores, uno de ellos es el uso de ondas de espacio como modo de propagación ya que los sistemas inalámbricos están diseñados para operar en un ambiente donde por lo regular no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor lo cual provoca que la señal sufra múltiples reflexiones o difracciones a lo largo de la trayectoria.

Otro punto a considerar es el hecho de que en esta banda las antenas son pequeñas lo cual facilita la movilidad del receptor en una zona, además de que en esta banda la señal no se ve afectada por los cambios provocados por la posición del sol de la misma forma que en HF.

Al utilizar las bandas VHF y UHF en los sistemas de comunicaciones se presentan varios tipos de propagación, en las siguientes secciones se tratarán algunos de ellos.

1.3.1. Propagación en el espacio libre.

Como ya se mencionó al utilizar el espacio libre como medio de transmisión, la señal experimenta distintos fenómenos. Fenómenos que se traducen en pérdidas de potencia en la señal. En esta sección se analiza el caso cuando la trayectoria de la señal se encuentra libre de obstáculos, es decir, propagación en el espacio libre [7].

Para obtener las pérdidas por trayectoria para la propagación en el espacio libre es necesario tener en cuenta que la potencia recibida esta en función de la separación que exista entre el transmisor y el receptor. Por lo que la potencia recibida esta representada por [8]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (1.1)$$

donde P_t es la potencia transmitida, G_t es la ganancia de la antena transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora, d es la distancia en metros entre el transmisor y el receptor y λ es la longitud de onda.

Sabiendo que $\lambda = \frac{c}{f}$, donde c es la velocidad de la luz y f es la frecuencia; entonces al sustituir en (1.1) tenemos que la potencia recibida queda

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{c}{(4\pi)df} \right)^2 \quad (1.2)$$

Las pérdidas por trayectoria se pueden representar de forma logarítmica debido a que se expresan en decibels por década o decibels por octava. Por lo que las pérdidas por trayectoria para el espacio libre (L_f) están dadas por

$$L_f = -10 \log P_t - 10 \log_{10} G_t - 10 \log_{10} G_r + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d - 148 \quad (1.3)$$

La expresión de las pérdidas por trayectoria en el espacio libre sirve de base para el desarrollo de nuevos modelos de predicción de pérdidas por trayectoria los cuales son más precisos y fácil de implementar en los sistemas de comunicaciones inalámbricos (v. capítulo 2).

1.3.2. Propagación sobre una superficie reflectora plana.

Otro caso que se puede presentar en la propagación en VHF y UHF es la propagación sobre una superficie plana la cual se realiza a distancias alrededor de los 40 Km, por lo que es posible despreciar la curvatura de la tierra considerando de esta forma que la propagación se realiza sobre una superficie plana [7]. En la figura 1.15 se muestra la forma en que se realiza la propagación sobre una superficie plana.

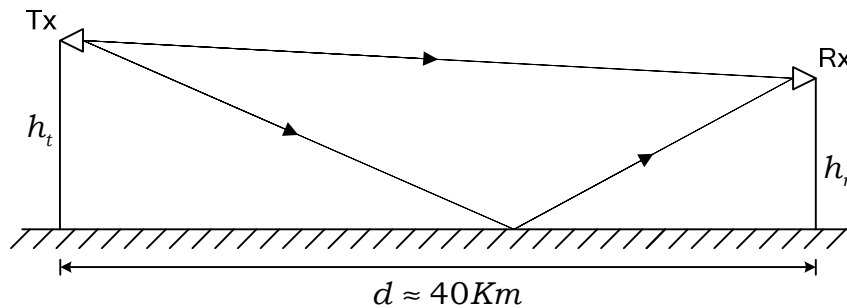


Figura 1.15. Propagación sobre tierra plana.

En este caso la propagación se lleva a cabo por medio de dos trayectorias la directa y la reflejada. La expresión que representa la potencia recibida en la propagación sobre una superficie reflectora plana esta dada por

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 \quad (1.4)$$

donde h_t es la altura de la antena transmisora y h_r es la altura de la antena receptora. La ecuación (1.4) se puede expresar de forma logarítmica por lo que se obtiene

$$L_p = -10 \log P_t - 10 \log G_t - 10 \log G_r - 20 \log h_t - 20 \log h_r + 40 \log d \quad (1.5)$$

donde L_p son las pérdidas por trayectoria en una superficie plana.

1.3.3. Propagación sobre una superficie reflectora curva.

Para este caso se considera una superficie curva con un radio (r_e), en la cual están ubicadas la antena transmisora (h_t) y la antena receptora (h_r); estas antenas deben estar orientadas de tal forma que tengan línea de vista.

Para conocer el punto sobre la superficie en donde el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales, es necesario conocer la distancia de separación que existe de la antena transmisora al punto (d_1) y de la antena receptora al punto (d_2) como se muestra en la figura 1.16.

De acuerdo a [7], d_1 y d_2 están dadas por

$$d_1^2 = [r_e + (h_t - h'_t)]^2 - r_e^2 \cong 2r_e (h_t - h'_t) \quad (1.6)$$

$$d_2^2 \cong 2r_e (h_r - h'_r) \quad (1.7)$$

donde h'_t y h'_r son las alturas con respecto al plano tangente al punto de reflexión, en donde el ángulo de reflexión ψ esta representado por

$$\psi = \frac{h'_t}{d_1} = \frac{h'_r}{d_2} \quad (1.8)$$

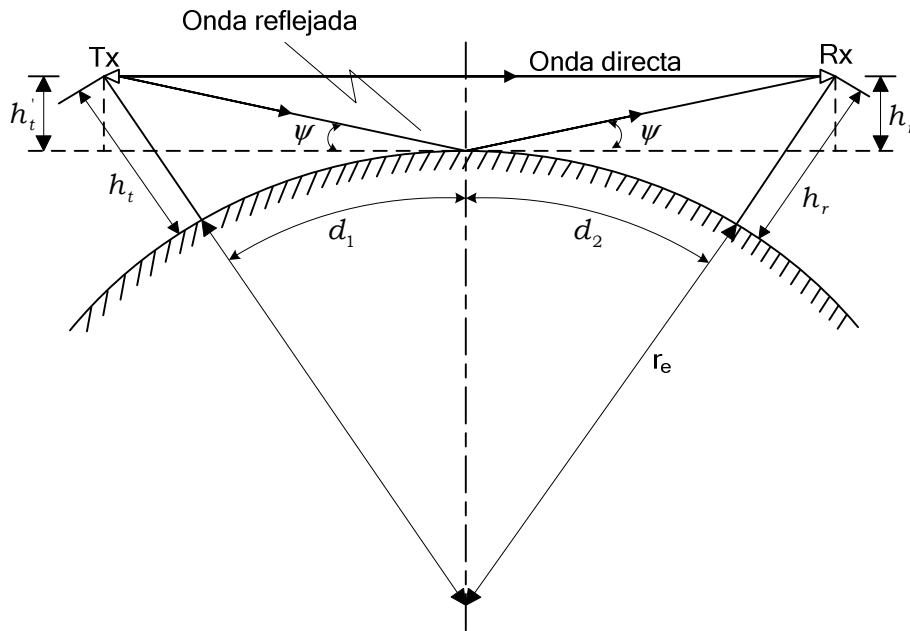


Figura 1.11. Superficie reflectora curva.

1.3.4. Propagación en superficies rugosas.

El análisis de la propagación sobre superficies lisas se basa en la reflexión que ocurre al momento que la onda transmitida incide en la superficie de la tierra. Cuando la propagación ocurre en superficies rugosas la reflexión se vuelve difusa provocando que la onda se disperse y solo una parte de la energía que incide en el punto pueda ser reflejada en dirección a la antena receptora; por lo que la onda reflejada no tendrá una contribución significativa sobre la señal recibida [7].

En la figura 1.17 se muestra el fenómeno de la reflexión parcial provocada por la reflexión difusa que es causada por la rugosidad del terreno.

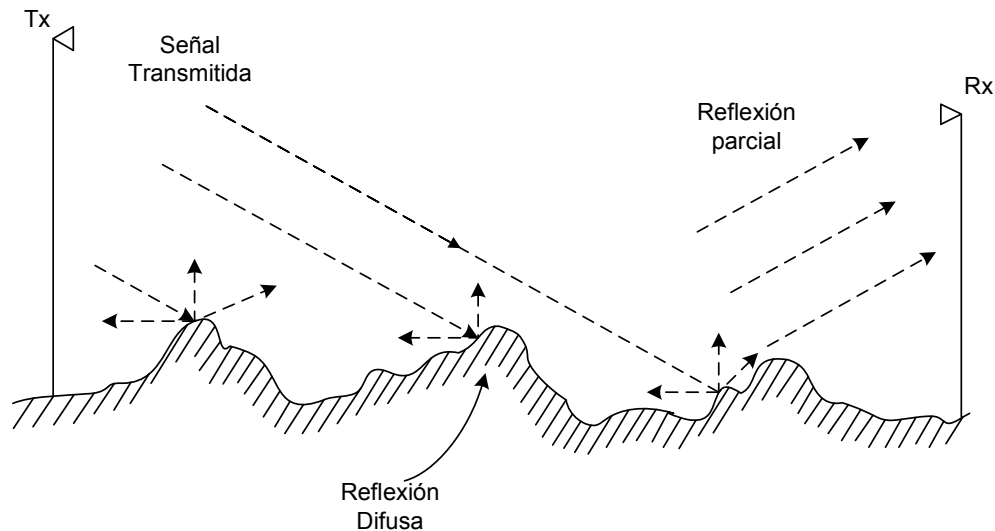


Figura 1.17. Superficie reflectora rugosa.

Para comprender de mejor forma el fenómeno de la reflexión parcial es necesario tomar como base una superficie rugosa ideal. En la figura 1.18 se presenta una superficie rugosa ideal donde el rayo A y el rayo B forman el frente de onda AA'. El rayo A incide en el punto B mientras que el rayo B incide en el punto B' en ambos casos el ángulo incidente es el mismo al ángulo reflejado. Debido a que los rayos chocan en diferentes puntos con diferentes elevaciones, el frente de onda CC' formado por la reflexión de los rayos A y B, es más angosto que el frente AA'. De esta forma se demuestra que las elevaciones de la superficie afectan de manera drástica a la potencia recibida.

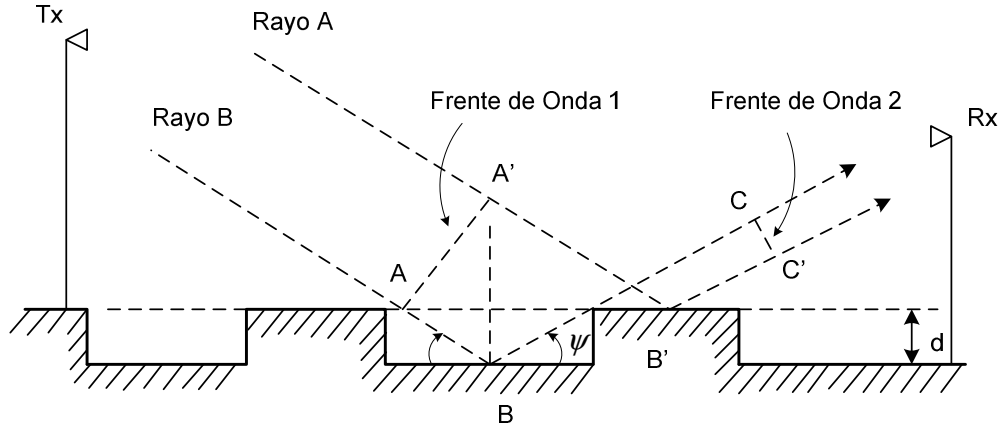


Figura 1.18. Superficie rugosa ideal.

Considerando las diferencias que existen entre las figuras 1.17 y 1.18, es necesario identificar cuando una superficie es rugosa. En algunas ocasiones se puede considerar una superficie rugosa cuando se toman en cuenta ciertas frecuencias de operación y los ángulos de incidencia que se tengan en el terreno. Sin embargo cuando estos parámetros cambian hay que definir el tipo de terreno en el cual se realizará la reflexión por medio del criterio de Rayleigh [7] el cual está dado en base a la figura 1.18 y se representa por medio de la expresión (1.9).

$$C = \frac{4\pi d \psi}{\lambda} \quad (1.9)$$

donde d es la altura de la ondulación del terreno, Ψ es el ángulo incidente y C es el índice de rugosidad del terreno el cual puede tomar los siguientes valores. Para $C < 0.1$ se considera que es una superficie lisa y para $C > 10$ la superficie será considerada rugosa.

En los sistemas de comunicaciones inalámbricos es necesario tomar en consideración la rugosidad del terreno para poder predecir las pérdidas por trayectoria en una zona con una mayor precisión sin embargo la mayoría de los modelos siempre consideran el terreno como plano.

1.4 TIPOS DE DESVANECIMIENTOS.

En la mayoría de los sistemas inalámbricos se presenta una propagación sin línea de vista entre el transmisor y el receptor; un ejemplo claro de estos sistemas son los sistemas de telefonía móvil en donde la señal entre la estación base y el móvil puede ser obstruida por edificios, vehículos o cualquier otra estructura, debido a esto la propagación se realiza por medio de trayectorias múltiples causadas por la reflexión de la señal en las estructuras ubicadas en los alrededores del receptor debido a esto surgen los desvanecimientos [8, 9].

Los desvanecimientos describen las fluctuaciones que se presentan en la amplitud, fase o retardos de la señal en un pequeño intervalo de tiempo. Existen dos tipos de desvanecimientos, lentos y rápidos. En la figura 1.19 se pueden apreciar los desvanecimientos rápidos y lentos en conjunto con las pérdidas por trayectoria a lo largo de una distancia de 300 m.

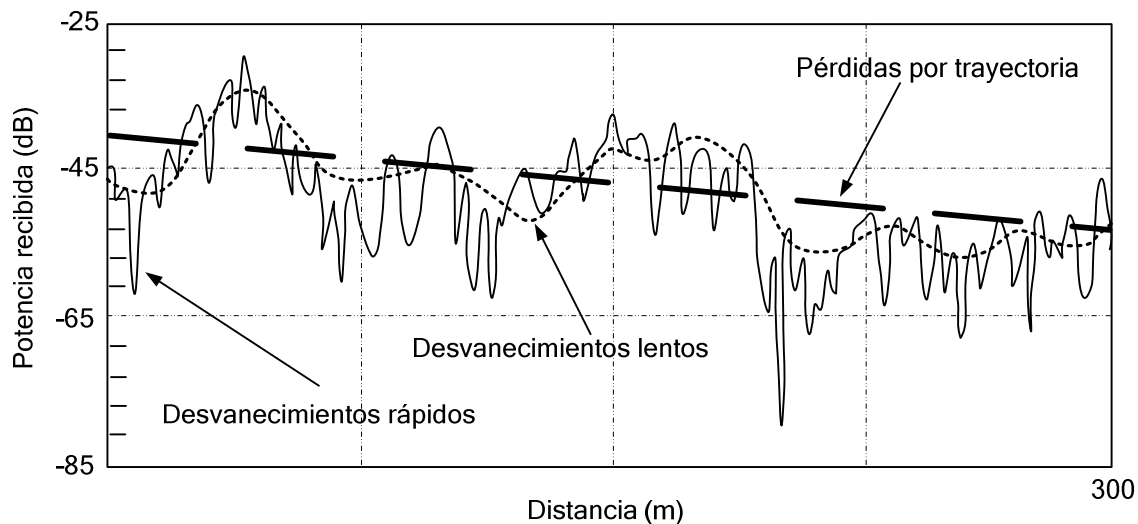


Figura 1.19. Tipos de desvanecimientos.

Los desvanecimientos lentos son causados por el movimiento del móvil a largas distancias o en zonas de sombra (en las zonas detrás de los edificios, colinas o montañas), las cuales producen variaciones en las trayectorias entre el transmisor y el receptor.

También son conocidos como oscurecimientos log-normal, ya que las pérdidas por trayectoria se acercan a la forma de una distribución log-normal con una desviación estándar que depende de la frecuencia y del ambiente [7, 8].

Por otra parte, los desvanecimientos rápidos son provocados por las trayectorias múltiples de la señal transmitida; por ejemplo, si una señal llega al móvil por medio dos trayectorias, la primera llega directamente de la onda transmitida en una trayectoria con línea de vista, mientras que la otra es reflejada por los edificios que se encuentran en el camino al móvil, lo cual provoca que la señal reflejada recorra una mayor distancia que la onda directa ocasionando una diferencia de fase al momento de la recepción, estas diferencias de fase provocan que las ondas se sumen constructivamente o destructivamente y de esta forma ocurren los desvanecimientos [7].

REFERENCIAS

- [1] J.T. Murphy y R.C. Smoot, *Física: Principios y Problemas*, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 1997.
- [2] E. Braun, *Electromagnetismo: de la Ciencia a la Tecnología*, Fondo de Cultura Económica-ILCE, 2000.
- [3] K. Chang, *RF and Microwave Wireless Systems*, John Wiley & Sons, 2000.
- [4] E.C. Jordan y K.G. Balmain, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, Prentice Hall, 1968.
- [5] R. Resnick, D. Halliday y K.S. Krane, *Física Volumen 2*, John Wiley & Sons, 2002.
- [6] R.C. Dorf, *The Electrical Engineering Handbook*, CRC Press LLC, 1997.
- [7] J.D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, John Wiley & Sons, 2000.
- [8] T.S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, Prentice Hall PTR, 2002.
- [9] D.M. Pozar, *Microwave and RF Design of Wireless Systems*, John Wiley & Sons, 2001.

CAPÍTULO 2

MODELOS DE PROPAGACIÓN

En los sistemas de comunicaciones inalámbricos se presentan diferentes fenómenos que afectan la señal transmitida por lo que se han desarrollado modelos de predicción de pérdidas por trayectoria los cuales están diseñados para predecir la potencia recibida en una zona. Estos modelos están clasificados en área-área y punto-punto. Dentro de los primeros se encuentran los modelos Okumura-Hata, Walfisch-Ikegami, Walfisch-Bertoni, IMT-2000 y el modelo de dos pendientes los cuales consideran diferentes parámetros dependiendo del tipo de ambiente, estos parámetros pueden ser la ubicación de la antena transmisora, la altura y geometría de los edificios, la frecuencia de operación y la distancia entre la estación base y el móvil. Para el caso de un modelo de interiores se toma en cuenta la absorción de las paredes, el número de pisos que tenga el edificio y los retardos de propagación. En cuanto al modelo punto-punto, éste se obtienen a partir de un modelo área-área y considera las elevaciones del terreno, este modelo se describe con mayor detalle en el capítulo 3.

2.1. INTRODUCCIÓN.

Los modelos de propagación son utilizados para determinar el número de celdas que un sistema de comunicación necesita para proveer cobertura en una zona. Los primeros sistemas de comunicación móvil se enfocaban principalmente en la cobertura que podrían proporcionar y no en la capacidad del sistema. Los modelos de propagación se clasifican dependiendo el método por el cual se desarrollo en empíricos, determinísticos y semi-empíricos. Otra clasificación de estos modelos puede ser dependiendo del tamaño de la celda en el que opere el sistema, esto es en macroceldas, microceldas y picoceldas [1, 2].

Sin embargo en este trabajo se utilizará la clasificación área-área y punto-punto. Estos modelos se obtienen por medio de mediciones realizadas en una zona no obstante la diferencia de estos modelos radica en que los modelos área-área promedian la potencia recibida a una misma distancia sin considerar la superficie del terreno esto es consideran la superficie en la que se encuentra el móvil como plana, mientras que el modelo punto-punto obtiene la potencia recibida en cada uno de los puntos del terreno. Esto provoca que el modelo punto-punto sea más preciso en su predicción que un modelo área-área [2].

A continuación se describen algunos modelos área-área y se mostraran los diferentes parámetros que toman en cuenta cada uno de ellos para poder realizar la predicción de la potencia recibida.

2.2. MODELO OKUMURA-HATA.

La técnica de Okumura.

Después de haber realizado una serie de mediciones alrededor de Tokio a frecuencias superiores a los 1920 MHz, Yoshihisa Okumura propuso un método empírico para predecir la potencia promedio de la señal dentro de un sistema de comunicaciones.

Este modelo se basa en las pérdidas por trayectoria en el espacio libre (L_f) y la atenuación de la señal (A_{mu}) la cual considera una zona urbana y una superficie casi suave, los valores utilizados para A_{mu} dependen de la distancia (1 a 100 Km) y de la frecuencia (100 a 3000 MHz). Esto se puede ver en la figura 2.1 donde se utiliza una antena de 200 m para la estación base (h_t) y una antena de 3 m para el móvil (h_r) [3].

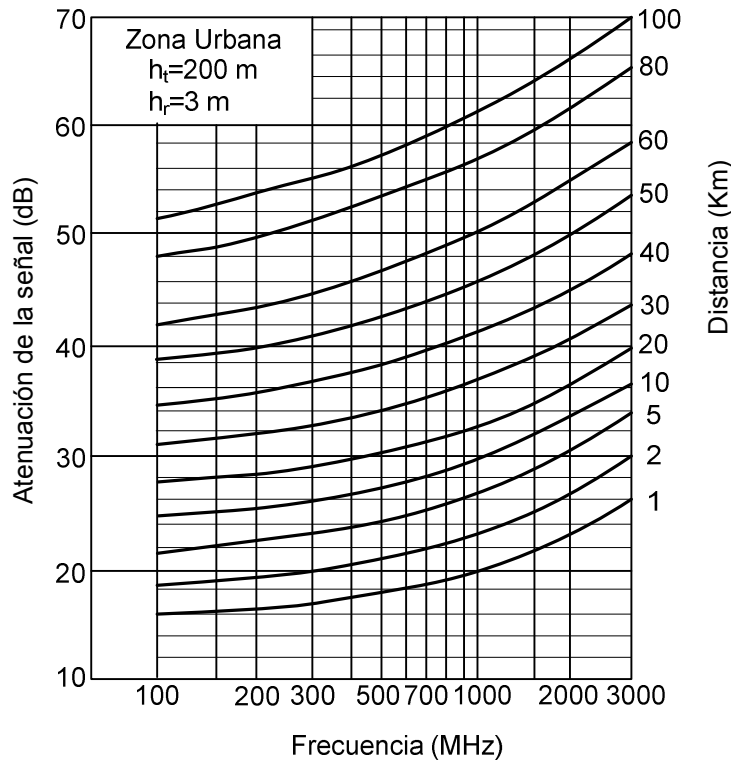


Figura 2.1. Pérdidas por trayectoria en el espacio libre, áreas urbanas y terrenos casi suaves.

En general las pérdidas por trayectoria para este modelo están expresadas por

$$L_p = L_f + A_{mu} + G_t + G_r \quad (2.1)$$

donde G_t es la ganancia de la antena de la estación base, la cual se muestra en la figura 2.2 y está en función de la altura de la estación base y la distancia entre el receptor y el transmisor.

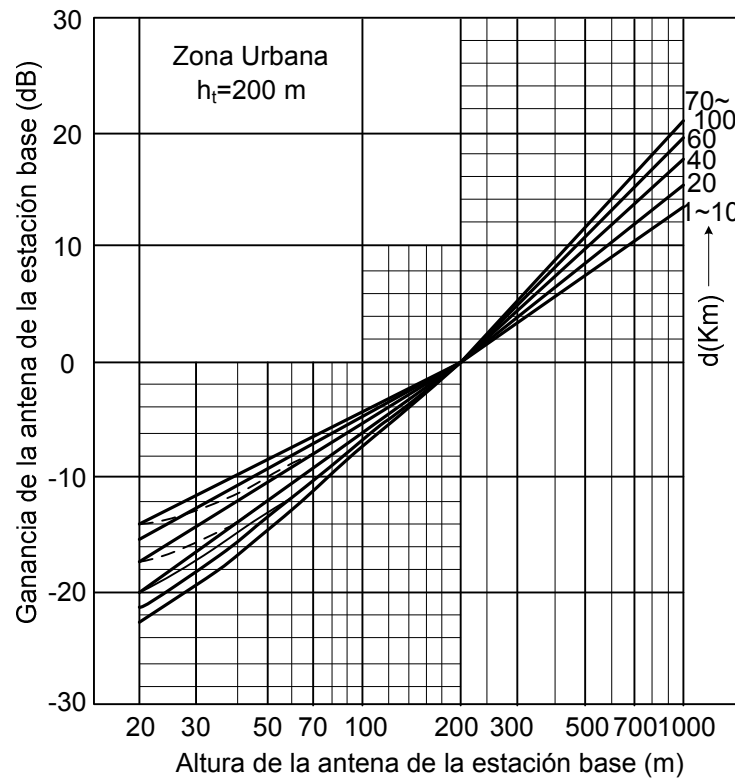


Figura 2.2. Ganancia de la antena de la estación base en áreas urbanas.

G_r es la ganancia de la antena del móvil la cual depende de la altura de esta antena, de la frecuencia y del tamaño de la ciudad en el que se aplica esto se observa en la figura 2.3.

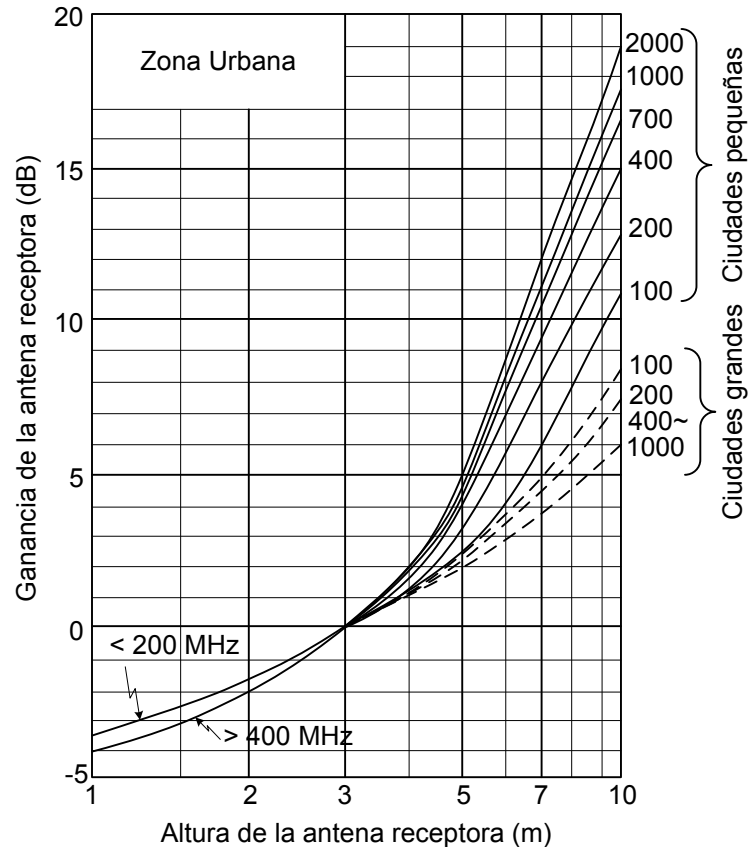


Figura 2.3. Ganancia de la antena del móvil en áreas urbanas en función de la frecuencia y la urbanización.

El método propuesto por Okumura es de gran utilidad en la práctica debido a que los datos que proporciona se relacionan con las mediciones realizadas en una determinada zona. Sin embargo, este método responde de forma lenta a los cambios en el patrón de radiación y en condiciones extremas (superficies rugosas, zonas rurales o espacios abiertos) es necesario promediar los datos para implementarlos en el método.

La formulación de Hata.

En un intento por hacer que el modelo de Okumura fuese fácil de aplicar, Masaharu Hata estableció una relación matemática para interpretar la información gráfica obtenida por Okumura [4].

Esta expresión está limitada a un número de parámetros de entrada y solo se puede utilizar en superficies casi suaves, la cual está representada por

$$L_p = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) \quad (2.2)$$

donde L_p son las pérdidas por trayectoria, f es la frecuencia de operación en MHz, d es la distancia entre la estación base y el móvil en un rango de 1 a 20 Km, h_t es la altura de la estación base en un rango de 30 a 200 m, h_r es la altura de la antena receptora de 1 a 10 m, C_1 y C_2 son constantes que dependen de la frecuencia que esté utilizando el sistema como se muestra a continuación.

- Para $150 \text{ MHz} \leq f \leq 1000 \text{ MHz}$ se utiliza

$$C_1 = 69.55 \text{ dB}$$

$$C_2 = 26.16 \text{ dB}$$

- Para $1500 \text{ MHz} \leq f \leq 2000 \text{ MHz}$

$$C_1 = 46.3 \text{ dB}$$

$$C_2 = 33.9 \text{ dB}$$

$a(h_r)$ es un factor de corrección para la altura de la antena móvil y puede tomar los siguientes valores:

- Para ciudades pequeñas y medianas

$$a(h_r) = [1.1 \log(f) - 0.7] h_r - [1.56 \log(f) - 0.8] \quad (2.3)$$

- Para ciudades grandes

$$a(h_r) = 8.29[\log(1.54h_r)]^2 - 1.1, \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (2.4)$$

$$a(h_r) = 3.2[\log(11.75h_r)]^2 - 4.97, \quad f \geq 400 \text{ MHz} \quad (2.5)$$

Las pérdidas por trayectoria descritas en (2.2) se aplican cuando se trata de una zona urbana sin embargo cuando este modelo se aplica a otras zonas estas pérdidas se modifican dando como resultado:

- Para zonas suburbanas

$$L_p = L_p(\text{zona urbana}) - 2[\log(f / 28)]^2 - 5.4 \quad (2.6)$$

- Para zonas rurales y espacios abiertos

$$L_p = L_p(\text{zona urbana}) - 4.782[\log(f)]^2 - 18.33\log(f) - 40.94 \quad (2.7)$$

La ecuación (2.1), representa las características lineales de las pérdidas por trayectoria, por lo que se puede expresar en forma logarítmica como [4]

$$L_p = L_0 + 10\gamma\log(d) \quad (2.8)$$

donde

$$L_0 = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82\log(h_t) - a(h_r) \quad (2.9)$$

$$\gamma = [44.9 - 6.55\log(h_t)] / 10 \quad (2.10)$$

Debido a lo expuesto anteriormente el modelo de Okumura-Hata ofrece una mejor respuesta en zonas urbanas y suburbanas, ya que la antena de la estación base esta situada en el edificio más alto de la zona como se ilustra en la figura 2.4 [3, 4].

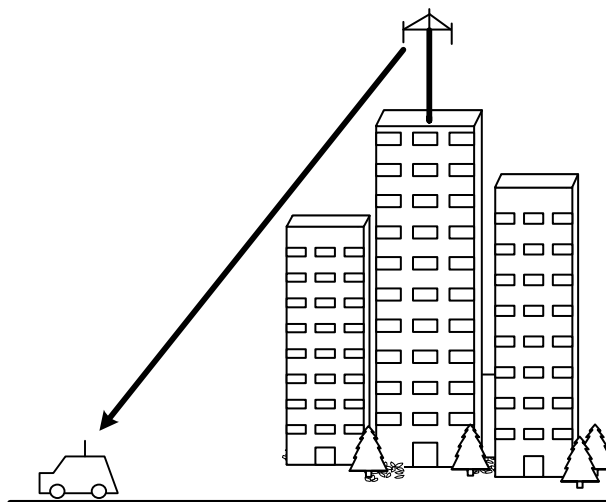


Figura 2.4. Modelo de Okumura-Hata.

Se puede concluir que en la práctica la técnica de Okumura genera predicciones que se aproximan a los valores medidos, sin embargo por ser un modelo área-área tiende a promediar los resultados cuando se encuentra en situaciones extremas y no responde rápidamente a cambios repentinos en la trayectoria de la señal. Por otra parte gracias a las formulaciones desarrolladas por Hata se obtuvo una mejor respuesta del modelo a los cambios repentinos en el patrón de radiación, ya que estas expresiones pueden ser analizadas por medio de una computadora.

2.3. MODELO WALFISCH-IKEGAMI.

Este modelo se basa en los métodos propuestos por Walfisch e Ikegami, también es conocido como COST 231 (Modelo 231 del Comité Europeo de Ciencia y Tecnología), es utilizado para determinar las pérdidas por trayectoria en un sistema de comunicación móvil en un ambiente urbano.

El modelo estima las pérdidas por trayectoria en un ambiente urbano en un rango de frecuencias de 800 a 2000 MHz y fue utilizado inicialmente en Europa por sistemas GSM y en algunos modelos de propagación en Estados Unidos [5].

A diferencia del modelo Okumura-Hata, en el modelo Walfisch-Ikegami la antena transmisora debe estar ubicada de tal forma que no sobrepase el edificio más alto de la zona, esto se puede observar en la figura 2.5. Por esta razón se consideraron varios parámetros tales como la cantidad de edificios alrededor de la antena, la altura de los edificios y el ancho de las calles. Debido a esto el modelo Walfisch-Ikegami establece dos condiciones para la predicción de la potencia recibida [4].

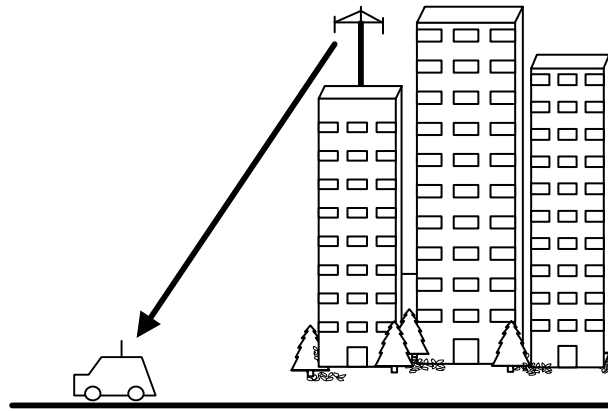


Figura 2.5. Modelo de Walfisch-Ikegami.

La primera es cuando se tiene propagación con línea de vista entre la estación base y el móvil, por lo tanto las pérdidas por trayectoria son [6]

$$L_p = 42.6 + 20\log(f) + 26\log(d) \quad (2.11)$$

donde L_p son las pérdidas por trayectoria, f es la frecuencia de operación y d es la distancia entre la estación base y el móvil (200 m a 5 Km). De igual manera que en el modelo de Okumura-Hata, la expresión (2.11) se puede representar como

$$L_p = L_0 + 26\log(d) \quad (2.12)$$

donde

$$L_0 = 42.6 + 20 \log(f) \quad (2.13)$$

El otro caso es cuando se presenta propagación sin línea de vista, en este caso las pérdidas por trayectoria se expresan por [5]

$$L_p = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) + L(dif) + L(mul) \quad (2.14)$$

donde $L(dif)$ son las pérdidas por difracción y están representadas por la siguiente expresión

$$L(dif) = -16.9 - 10 \log(d) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_r) + L(0) \quad (2.15)$$

donde h_r es la altura de la antena receptora (1 a 3 m), h_t es la altura de la antena transmisora (4 a 50 m), h_m es la altura promedio de los edificios pequeños ($h_m < h_t$) y $\Delta h_r = h_m - h_r$.

$L(0)$ son las pérdidas causadas por el ángulo incidente (ϕ) y puede tomar los siguientes valores

$$L(0) = -9.646, \quad 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \quad (2.16)$$

$$L(0) = 2.5 + 0.075(\phi - 35), \quad 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \quad (2.17)$$

$$L(0) = 4 - 0.114(\phi - 55), \quad 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad (2.18)$$

$L(mul)$ son las pérdidas causadas por difracciones múltiples y están dadas por

$$L(mul) = k_0 + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9 \log(a) \quad (2.19)$$

donde a es el ancho de la calle en metros, k_0 , k_a y k_d dependen de la expresión $\Delta h_t = h_t - h_m$ y de la distancia entre la estación base y el móvil; y k_f depende de la frecuencia y del tipo de zona en que se aplique el modelo como se muestra a continuación

$$k_0 = -18 \log(1 + \Delta h_t) \quad (2.20)$$

$$k_a = 54 - 0.8 \Delta h_t, d \geq 0.5 \text{ Km} \quad (2.21)$$

$$k_a = 54 - 1.3 \Delta h_t, d < 0.5 \text{ Km} \quad (2.22)$$

$$k_d = 18 - 15(\Delta h_t / h_m) \quad (2.23)$$

$$k_f = 4 + 0.7[(f / 925) - 1], \text{ zona suburbana} \quad (2.24)$$

$$k_f = 4 + 1.5[(f / 925) - 1], \text{ zona urbana} \quad (2.25)$$

Combinando las ecuaciones (2.14), (2.15) y (2.19) tenemos

$$L_p = L_0 + 10\gamma \log(d) \quad (2.26)$$

donde

$$L_0 = 32.4 + (30 + k_f) \log(f) - 16.9 - 10 \log(d) + 20 \log(\Delta h_t) + L(0) + k_0 + k_a - 9 \log(a) \quad (2.27)$$

$$\gamma = (20 + k_d) / 10 \quad (2.28)$$

Debido a todo esto, el modelo Walfisch-Ikegami presenta una mejor predicción en la potencia recibida que el modelo Okumura-Hata puesto que considera las pérdidas que se presentan cuando no hay línea de vista entre la estación base y móvil, aún cuando ambos modelos son aplicados en zonas urbanas y suburbanas.

2.4. MODELO WALFISCH-BERTONI.

Este modelo también es conocido como modelo de pantallas de difracción (*diffracting screens model*). Las expresiones de propagación son derivadas de un modelo ideal, en el cual se considera una ciudad donde los edificios son agrupados en una hilera uniforme dependiendo de su altura y ancho [2].

El modelo es válido cuando no existe línea de vista entre la estación base y el móvil. En algunos casos, la señal propagada de la antena transmisora a la antena receptora sufre múltiples difracciones después de pasar la hilera de edificios.

Para el estudio de la señal recibida, las hileras de edificios son modeladas como un conjunto de pantallas de difracción y absorción, las cuales son responsables de las pérdidas de propagación debido a la cercanía de los edificios.

Una parte de la señal transmitida que pasa por el techo del edificio que se encuentra antes de la ubicación del receptor (R_x) es difractada hacia él, mientras que la otra parte de esta señal se refleja en el edificio siguiente hasta llegar a la ubicación del receptor esto se aprecia en la figura 2.6.

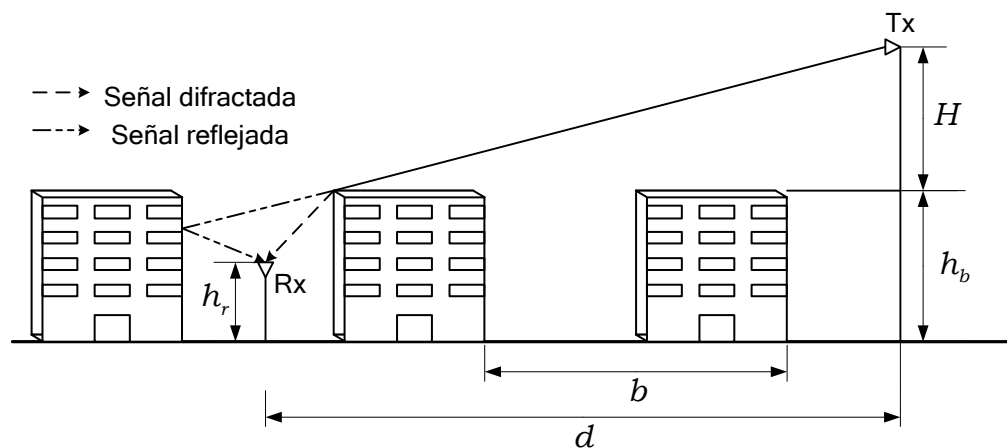


Figura 2.6. Parámetros considerados en el modelo Walfisch-Bertoni.

Considerando el mecanismo antes descrito, las pérdidas por trayectoria se estiman por medio de la expresión (2.29).

$$L_p = 89.55 + 21 \log f + 38 \log d - 18 \log H + A - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17H} \right) \quad (2.29)$$

donde f es la frecuencia en MHz, d es la distancia entre la estación base y el móvil en Km, H es la altura promedio de la antena transmisora con respecto a la altura de los edificios aledaños y A es el término utilizado para expresar la influencia de los edificios en la señal el cual se representa por [2]

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{b}{2} \right)^2 + (h_b - h_r)^2 \right] - 9 \log b + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h_b - h_r)}{b} \right] \right\} \quad (2.30)$$

donde h_b es la altura del edificio en metros, h_r es la altura del receptor en metros y b es el espaciamiento entre edificios (v. figura 2.6). Este modelo requiere que la antena transmisora esté por arriba del techo más alto.

El problema de emplear este modelo en una zona urbana o suburbana es que en un ambiente real la geometría de los edificios no es la misma, ocasionando que este modelo no tenga la misma certeza en la predicción de la potencia recibida como en los modelos anteriores.

2.5. MODELO IMT-2000.

Los esfuerzos que la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) realizó para establecer los parámetros para el desarrollo de los sistemas de telecomunicaciones en todo el mundo, llevó a que en 1985 se desarrollara el modelo FPLMTS (Sistemas de Telecomunicaciones Móviles para Futuras Bases Públicas), conocido actualmente como IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales para el año 2000) [7].

Los modelos del IMT-2000 están divididos en ambiente interior, ambiente exterior-interior y peatonal; y ambiente vehicular.

Algunos de los parámetros que toman en consideración estos ambientes de operación son

1. El retardo de propagación (su estructura y su variación estadística).
2. La regla geométrica de las pérdidas por trayectoria ($d^{-\gamma}$, $2 \leq \gamma \leq 5$).
3. Oscurecimientos.
4. Características de los desvanecimientos causados por trayectorias múltiples en los canales.
5. La frecuencia de operación.

En las siguientes secciones se describen cada uno de los ambientes de operación de este modelo.

2.5.1. Ambiente interior.

Este ambiente se caracteriza por el uso de celdas pequeñas y bajas potencias de transmisión; la estación base y el usuario están ubicados en el interior de un recinto. Tiene un retardo de propagación que varía entre los 35 y 460 ns, este retardo es provocado por las diferentes trayectorias que puede seguir la señal debido a las reflexiones que se originen durante su recorrido [7].

Las pérdidas por trayectoria dependen de los factores de atenuación, dispersión y de oscurecimientos provocados por paredes, pisos y estructuras metálicas. Las pérdidas por trayectoria están dadas por

$$L_p = 37 + 30 \log(d) + 18.3n^{[(n+2)/(n+1) - 0.46]} \quad (2.31)$$

donde d es la separación entre el transmisor y el receptor en metros y n es el número de pisos en la trayectoria.

2.5.2. Ambiente exterior-interior y peatonal.

Se caracteriza porque utiliza celdas pequeñas y bajas potencias de transmisión similar al ambiente interior; sin embargo la principal diferencia que existe entre estos dos es que la antena de la estación base está ubicada en el exterior, y los usuarios pueden estar localizados en las calles y/o dentro de edificios. El retardo de propagación varía entre los 100 y los 1800 ns.

En este ambiente de operación se puede aplicar la regla geométrica de las pérdidas por trayectoria (d^{-4}) si existe línea de vista entre la estación base y el usuario. En caso de que no exista línea de vista, este ambiente tiene las peores condiciones de propagación, esto quiere decir, que las pérdidas ocasionadas por oscurecimientos para los usuarios que se encuentran dentro de un recinto son de 12 dB, mientras que las pérdidas para los usuarios fuera del recinto son de 10 dB [7].

Las pérdidas por trayectoria pueden ser obtenidas por

$$L_p = 40 \log(d) + 30 \log(f) + 49 \quad (2.32)$$

donde f es la frecuencia de operación en MHz y d es la distancia entre la estación base y el móvil en metros.

2.5.3. Ambiente vehicular.

Este ambiente se caracteriza por utilizar celdas grandes y altas potencias de transmisión; el retardo de propagación va desde los 4 a los 12 μ s, estos tiempos en el retardo de propagación ocurren cuando el usuario se encuentra en caminos elevados y terrenos montañosos.

Para las zonas urbanas y suburbanas, se puede emplear la regla geométrica de las pérdidas por trayectoria (d^{-4}) y oscurecimientos log-normal con un valor de 10 dB. En zonas rurales, las pérdidas por trayectoria son menores que en las zonas urbanas y suburbanas [7]. Las pérdidas por trayectoria para este ambiente pueden ser obtenidas por

$$L_p = 40(1 - 4 \times 10^{-3} h_t) \log(d) - 18 \log(h_t) + 21 \log(f) + 80 \quad (2.33)$$

donde f es la frecuencia de operación, d es la distancia entre la estación base y el móvil en metros y h_t es la altura de la antena de la estación base en metros.

2.6. MODELO DE DOS PENDIENTES.

El modelo de dos pendientes es un modelo utilizado para microceldas el cual está basado en la óptica geométrica, la cual considera una trayectoria directa (d_1) y una trayectoria reflejada ($d_2 + d_3$) entre el transmisor y el receptor como se observa en la figura 2.7 [1, 8].

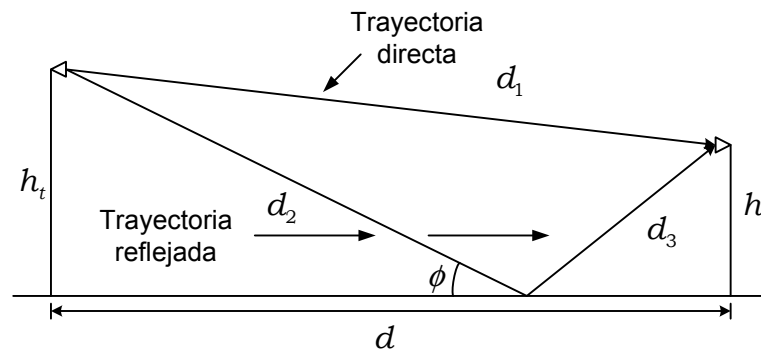


Figura 2.7. Modelo de dos pendientes.

En los sistemas de comunicaciones móviles la distancia máxima de separación entre el transmisor y el receptor está limitada por el horizonte óptico, por esta razón este modelo es preciso debido a que la superficie de la tierra se considera plana y porque emplea antenas para la transmisión de aproximadamente 50 m.

Sin embargo se presentan pérdidas por propagación la cuales son representadas por medio de una línea recta la cual va a tener un punto de ruptura en el que dicha línea cambie de inclinación como se muestra en la figura 2.8.

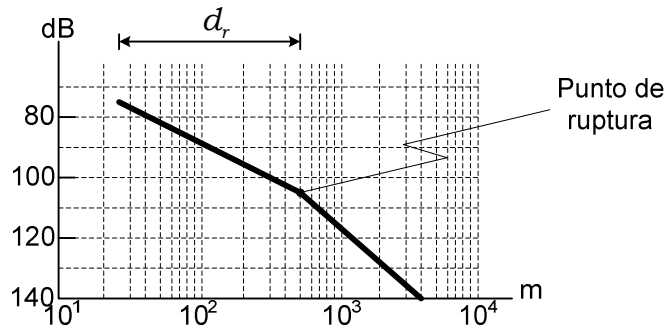


Figura 2.8. Pérdidas por propagación para el modelo de dos pendientes.

Este fenómeno se presenta debido a que las pérdidas varían dependiendo de la distancia d . La distancia (d_r) en donde se encuentra el punto de ruptura esta dada por la siguiente expresión

$$d_r \approx \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (2.34)$$

donde h_t es la altura de la antena transmisora, h_r es la altura de la antena receptora y λ es la longitud de onda.

Las pérdidas que presentan en el punto de ruptura se pueden obtener por

$$L_{d_r} = 10 \log \left[\left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_t h_r} \right)^2 \right] \quad (2.35)$$

Como d_r es la distancia a la que se presenta el punto de ruptura, las pérdidas por trayectoria que describen este modelo están expresadas por:

$$L_p = L_{d_r} + \begin{cases} 20 \log \left(\frac{d}{d_r} \right), & d \leq d_r \\ 40 \log \left(\frac{d}{d_r} \right), & d > d_r \end{cases} \quad (2.36)$$

2.7. MODELO DE LEE.

En un sistema de comunicaciones inalámbrico existen varios factores que afectan la transmisión de la señal como interferencia, ruido y atenuación. Por lo que se han desarrollado modelos con los cuales es posible predecir la potencia recibida en un determinado punto como los descritos anteriormente; los cuales son considerados modelos área-área.

El modelo de predicción de pérdidas por trayectoria de Lee, es un modelo empírico diseñado por William C. Lee para macroceldas urbanas y suburbanas para obtener las características de propagación en la banda UHF, este modelo es más preciso ya que toma en cuenta parámetros como la densidad de árboles que existen en la zona, si se presenta propagación sobre el agua, la elevación del móvil respecto a la estación base y, sobretodo, considera la difracción y reflexión de la señal que se presenta cuando existe un obstáculo en la trayectoria entre la estación base y el móvil [9]. A este modelo se le conoce como modelo punto-punto y se explicará con mayor detalle en el capítulo 3.

REFERENCIAS.

- [1] T.S. Rappaport, *Wireless Communications principles and practice*, Prentice Hall, 2002.
- [2] M.F. Cátedra y J. Pérez-Arriaga, *Cell Planning for Wireless Communications*, Artech House.
- [3] J.D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, John Wiley & Sons, 2000.
- [4] S. Faruque, *Cellular Mobile Systems Engineering*, Artech House, 1996.
- [5] V.K. Garg y J.E. Wilkes, *Principles and Applications of GSM*, Prentice Hall, 1999.
- [6] N. Blaunstein, *Radio Propagation in Cellular Networks*, Artech House, 2000.
- [7] ETSI TR 101 112 v3.2.0, "Universal Mobile Telecommunications Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS", 2004.
- [8] L.B. Milstein, "On the Feasibility of a CDMA Overlay for Personal Communications Networks", en *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 10, núm. 4, 1992.
- [9] W.C.Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGraw Hill, 1989.

CAPÍTULO 3

MODELO DE LEE

El modelo de predicción de pérdidas por trayectoria de Lee es un modelo punto-punto el cual es más preciso que los modelos área-área ya que considera ciertos parámetros que afectan a la señal en la trayectoria de propagación, tales como la densidad de árboles que existen en la zona, las difracciones que se originan debido a la presencia de uno o varios obstáculos entre la estación base y el móvil; y sobre todo considera la ubicación del móvil de acuerdo a las elevaciones que presenta el terreno. Además se consideran dos casos para obtener la potencia recibida, el primero se presenta cuando se tienen línea de vista por medio de la altura efectiva de la estación base, por otra parte cuando no se tiene línea de vista se obtienen las pérdidas por difracción utilizando el modelo de borde simple y el modelo de borde doble.

3.1. INTRODUCCIÓN.

La cobertura de una celda para un sistema de telefonía móvil está basada en la cobertura de la señal. La cobertura de la señal se puede obtener por modelos de predicción y es aplicado para el diseño de sistemas de comunicaciones móviles. El objetivo de estos modelos es predecir la potencia recibida en una determinada zona para poder calcular el número de celdas necesarias para proveer cobertura en esa zona. Sin embargo no es posible asegurar el 100 por ciento de la cobertura debido a que existen factores que afectan las predicciones. Estos factores son los desvanecimientos que sufre la señal en su trayectoria de propagación [1].

En el capítulo anterior se clasificaron los modelos de predicción en dos tipos área-área y punto-punto. Cualquier modelo área-área puede ser la base para poder desarrollar el modelo punto-punto propuesto por William C. Y. Lee. Este modelo fue desarrollado en 1977, en los laboratorios Bell AT&T el cual establece una serie de pasos para predecir la potencia recibida en el móvil dependiendo de su ubicación en un terreno, esto quiere decir que considera las elevaciones del terreno que existen durante la trayectoria que realiza el móvil [2].

El modelo de Lee puede aplicarse en diferentes ambientes como los listados en la tabla 3.1 [1].

Estructuras hechas por el hombre	Terrenos Naturales
Áreas con edificios	Terrenos planos
Áreas abiertas	Terrenos montañosos
Áreas suburbanas	Sobre agua
Áreas urbanas	Áreas con mucho follaje

Tabla 3.1. Ambientes en donde se puede aplicar el modelo punto-punto.

El inconveniente de utilizar un modelo área-área para el diseño de sistemas celulares es que el 68 por ciento de los valores obtenidos en las predicciones tienen una desviación estándar entre 6 y 8 dB. Por otra parte un modelo punto-punto tiene una desviación estándar por debajo de los 3 dB [1, 3].

En un enlace de comunicaciones es posible que la señal transmitida se propague por diferentes trayectorias. En la figura 3.1 se consideran dos trayectorias la directa y la reflejada sobre una superficie plana, donde el ángulo incidente (θ) es el ángulo con el que la onda incide sobre la tierra. Mientras que el ángulo de elevación (ϕ) es el ángulo con el que la onda llega de forma directa al móvil [2].

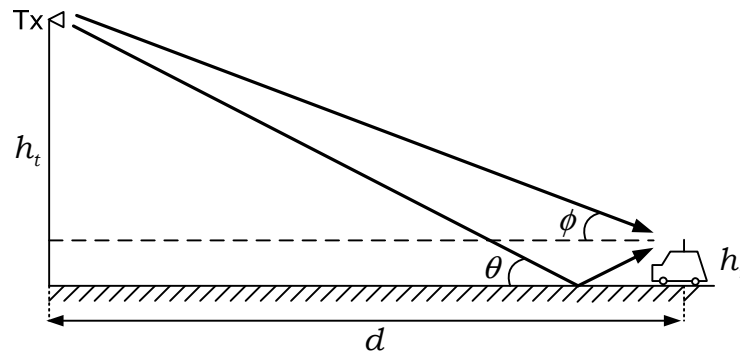


Figura 3.1. Ángulo incidente y ángulo de elevación.

De la figura, es posible obtener el ángulo incidente por medio de la siguiente expresión

$$\theta = \tan^{-1} \frac{h_t + h_r}{d} \quad (3.1)$$

donde h_t es la altura de la antena de la estación base, h_r es la altura de la antena del móvil y d es la distancia de separación entre la estación base y el móvil.

También, de la figura es posible obtener el ángulo de elevación

$$\phi = \tan^{-1} \frac{h_t - h_r}{d} \quad (3.2)$$

Otro caso que se puede presentar en un enlace de comunicaciones es el mostrado en la figura 3.2 en donde la superficie por donde se desplaza el móvil está inclinada. Si el ángulo de inclinación de la pendiente (α) es menor a 10° el punto de reflexión sobre ésta puede obtenerse de la misma forma como si se tratara de una superficie plana [2].

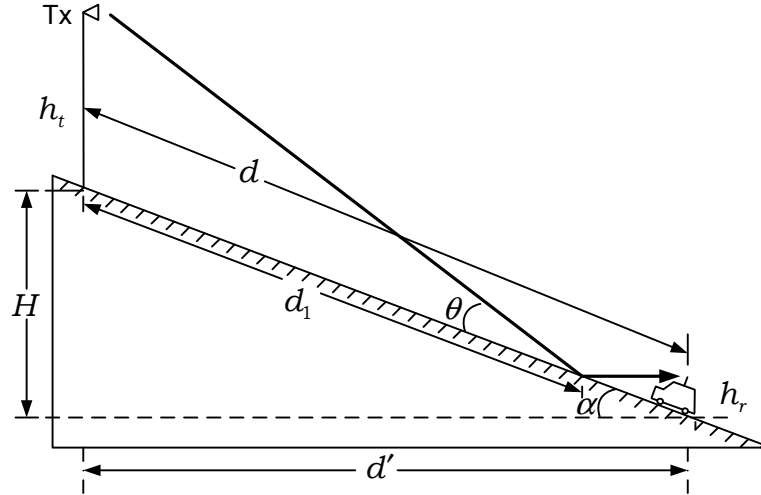


Figura 3.2. Representación de un terreno con pendiente.

Para encontrar el ángulo de inclinación de la pendiente se considera que $d = d'$ por lo que

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{H}{d'} \quad (3.3)$$

donde H es la altura de la pendiente y d' es la distancia entre el transmisor y el móvil.

Para este caso la distancia d_1 es la distancia en la que se encuentra el punto de reflexión la cual depende de la altura de la antena transmisora (h_t) y del ángulo incidente (θ). Por lo que d_1 se puede representar como

$$d_1 = \frac{h_t}{\tan \theta} \quad (3.4)$$

También podemos obtener α de forma exacta

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{H}{\sqrt{(d)^2 - (H)^2}} \quad (3.5)$$

Sin importar que las ecuaciones (3.3) y (3.5) calculen de forma distinta al ángulo α el valor obtenido es el mismo [2].

3.2. OBTENCIÓN DEL MODELO PUNTO-PUNTO.

El modelo punto-punto se obtiene por medio de tres pasos: generar una condición estándar, obtener un modelo área-área y obtener el modelo punto-punto tomando como base el modelo área-área. El propósito de este modelo es separar dos efectos que afectan la intensidad de la señal recibida, el primero es causado por el contorno del terreno y el otro por las estructuras hechas por el hombre [2].

3.2.1. Condición estándar.

Lee propuso algunos parámetros para ser empleados en este modelo de acuerdo a las características del ambiente en donde se desarrollo. Sin embargo es muy difícil que en un ambiente real los sistemas de comunicaciones inalámbricos tengan estas características, es por eso que este modelo establece algunos factores de corrección los cuales permitan emplear cualquier parámetro para poder ser implementados en este modelo.

Para obtener los factores de corrección se emplea la tabla 3.2 [1, 2].

Condición estándar	Factores de corrección
Potencia de transmisión $P_t = 10 \text{ W}$	$\alpha_1 = 10 \log \frac{P_t'}{10}$
Estación base	
Altura de la antena $h_t = 30 \text{ m}$	$\alpha_2 = 20 \log \frac{h_t'}{h_t}$
Ganancia de la antena $G_t = 6 \text{ dB}$	$\alpha_3 = G_t' - 6$
Móvil	
Altura de la antena $h_r = 3 \text{ m}$	$\alpha_4 = 10 \log \frac{h_r'}{h_r}$
Ganancia de la antena $G_r = 0 \text{ dB}$	$\alpha_5 = G_r'$

Tabla 3.2. Factores de corrección con nuevos parámetros.

En la columna de la izquierda se muestran los parámetros empleados por Lee los cuales se consideran como condiciones ideales para el modelo. Por otra parte en la columna de la derecha se listan los nuevos parámetros obtenidos. (α_1 , α_2 , α_3 , α_4 y α_5) los cuales se expresan en decibeles (dB) para poder emplearlos con mayor facilidad en el desarrollo del modelo.

3.2.2. Pérdidas por trayectoria para el modelo área-área.

Las pérdidas por trayectoria difieren dependiendo de la zona de estudio. En el modelo área-área todas las zonas se consideran superficies planas debido a esto se obtienen valores promedio para toda el área, la desviación estándar de estos valores indican el grado de rugosidad del terreno [4, 5, 6].

Las pérdidas por trayectoria obtenidas en cada zona representan las pérdidas de la señal causadas por las estructuras hechas por el hombre y por las elevaciones que presenta el terreno. En la figura 3.3 se muestra el contorno de un terreno así como los puntos altos (*A*) y bajos (*B*) que lo conforman los cuales son necesarios para poder encontrar la pendiente de pérdidas por trayectoria [2].

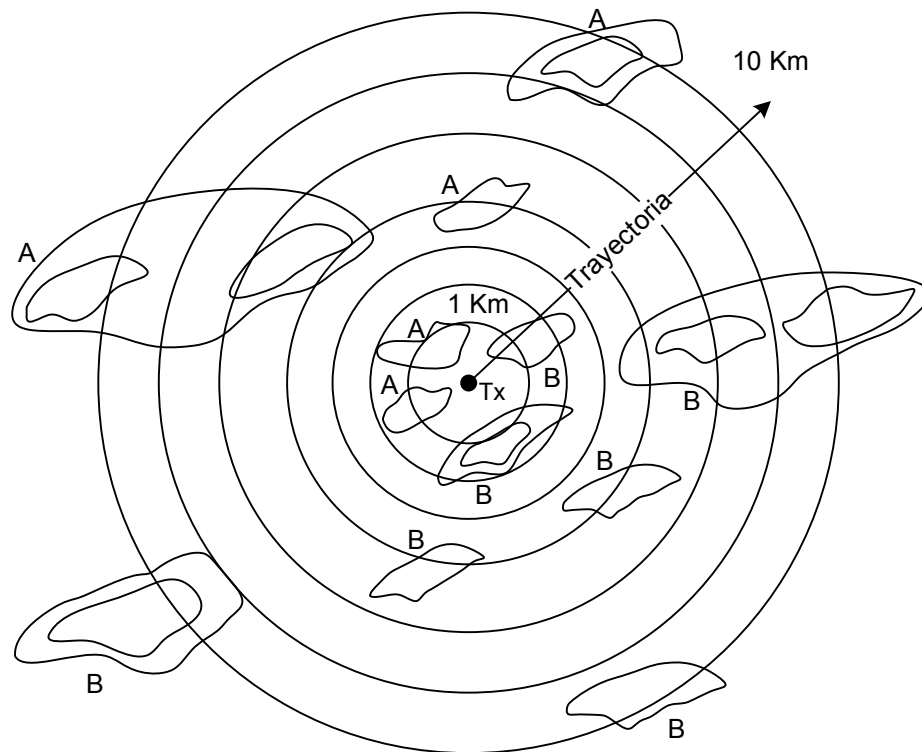


Figura 3.3. Puntos altos y bajos para obtener las pérdidas por trayectoria.

Para obtener las pérdidas es necesario medir la intensidad de la señal en los puntos altos y bajos ubicados en los alrededores de la antena transmisora. Una vez obtenida la intensidad de la señal en estos puntos se obtiene una pendiente de pérdidas por trayectoria la cual es un promedio de las mediciones realizadas en dichos puntos. En la figura 3.4 se observa la pendiente de pérdidas por trayectoria que se obtuvo con base a las mediciones a 1 y 10 Km realizadas en la figura 3.3 [2].

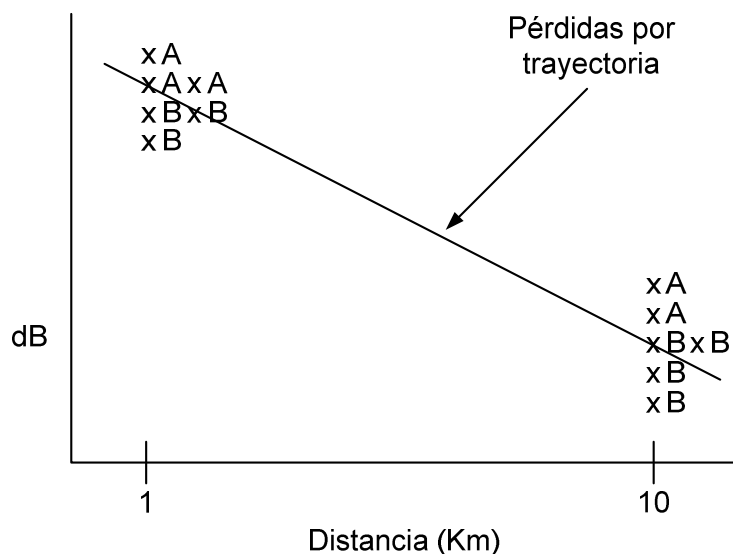


Figura 3.4. Pendiente de pérdidas por trayectoria.

Cualquier modelo área-área puede ser utilizado para la realización del modelo punto-punto, el modelo área-área se puede representar por medio de dos parámetros: la intercepción a un kilómetro (potencia recibida a una distancia de 1 Km del transmisor) y la pendiente de las pérdidas por trayectoria. Estos dos parámetros se obtienen experimentalmente por dos métodos [1, 2].

El primero, compara el área de interés con un área que presente características similares en su estructura, para la cual ya se ha obtenido una pendiente de pérdidas por trayectoria [2, 3]. En la figura 3.5 se muestran algunas pendientes de pérdidas por trayectoria las cuales nos ayudan a conocer la potencia recibida a una distancia, por ejemplo, si consideramos que el receptor se encuentra a 5 Km del transmisor en un área con características similares a una zona suburbana se utiliza la pendiente de esta zona por lo que la potencia en el receptor es de -80 dBm aproximadamente.

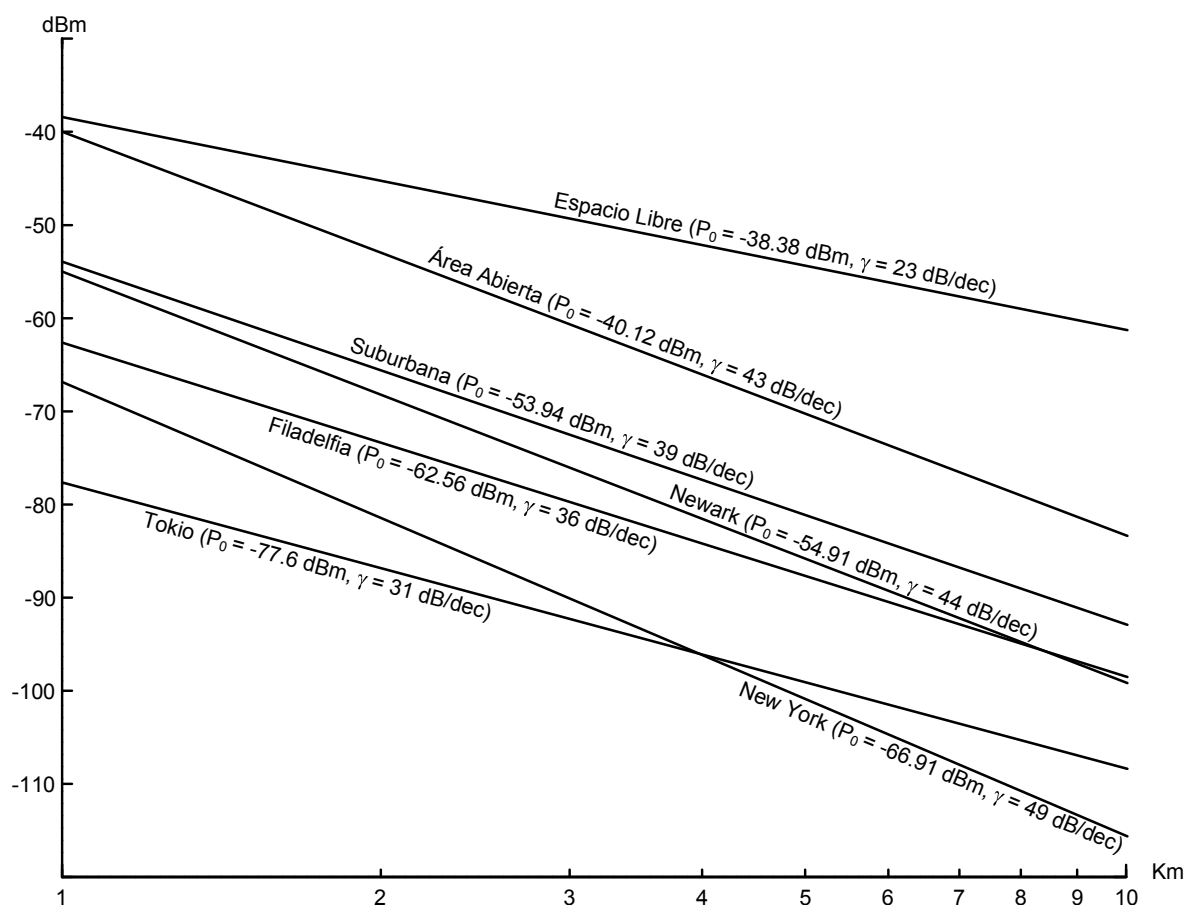


Figura 3.5. Pendientes de pérdidas por trayectoria en diferentes ciudades.

La razón por la cual se utiliza la distancia de 1 y 10 Km para encontrar las pérdidas por trayectoria es que a una distancia menor a 1 Km la recepción de la señal sería débil debido al efecto del campo cercano² y a que el móvil se podría encontrar ubicado en una región de sombra esto es fuera del lóbulo principal de radiación. Mientras que a una distancia mayor a 1 Km el efecto del campo cercano se considera despreciable [2, 3].

En el segundo método, si el área en estudio no es similar a los ambientes de la figura 3.5, se realiza lo siguiente.

² El campo cercano se define como el área dentro de una distancia (D/λ) de la antena, en donde λ es la longitud de onda y D es el diámetro de la antena. El efecto provocado por este campo ocurre cuando la potencia transmitida regresa a la antena después de un determinado tiempo.

Se posiciona una antena transmisora en el centro del área, se toman seis o siete mediciones a 1 y 10 Km en los puntos altos y bajos dentro de esta área (v. figura 3.3); una vez recolectados estos datos se promedian los datos a 1 y 10 Km para poder unir estos dos valores y obtener la pendiente de pérdidas por trayectoria (v. figura 3.4).

3.2.3. Modelo punto-punto.

Además de obtener los factores de corrección y determinar las pérdidas por trayectoria que sufre el móvil en una determinada zona a una determinada distancia, es necesario considerar las pérdidas por difracción y las pérdidas por follaje que se puedan presentar. Para el caso de las pérdidas por follaje el modelo considera el tamaño, la densidad y la distribución de las hojas, ramas y troncos, así como la altura de los árboles que se encuentran en la trayectoria de propagación. Con base a eso Lee pudo calcular las pérdidas que sufriría la señal en estas condiciones dando como resultado que las pérdidas por follaje serían de 20 dB/dec [2, 3]. Por otra parte las pérdidas por difracciones son originadas debido a la presencia de un obstáculo en la trayectoria de la señal.

3.3. PÉRDIDAS POR TRAYECTORIA PARA EL MODELO PUNTO-PUNTO.

Para obtener las pérdidas por trayectoria en el modelo punto-punto es necesario considerar dos condiciones, con línea de vista y sin línea de vista. A continuación se describirá cada una de estas condiciones.

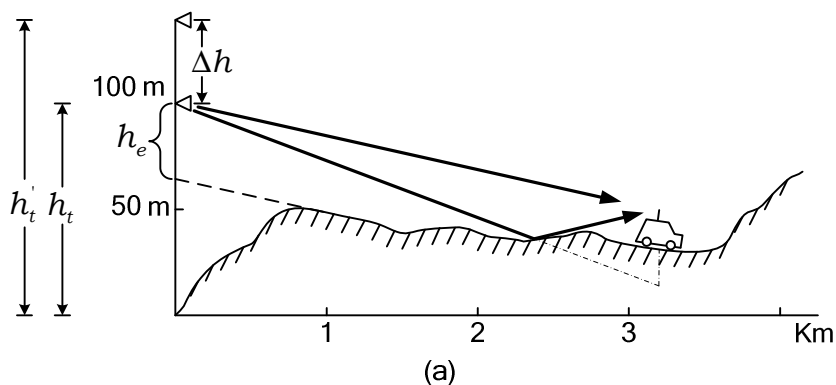
3.3.1. Con línea de vista (LOS).

Cuando se presenta propagación con LOS, la trayectoria directa no está obstruida por las condiciones del terreno ni por las estructuras hechas por el hombre, sin embargo en esta sección se considera un caso especial en donde la trayectoria directa es bloqueada por las estructuras hechas por el hombre.

Cuando se considera el caso especial se toman en cuenta factores como la altura efectiva y la ganancia de la altura de la antena de la estación base, las cuales se calculan en cada punto de la trayectoria por donde viaja el móvil y dependen de las condiciones del terreno [7].

Para el cálculo de estos dos factores se tiene que encontrar el punto de reflexión posible en la tierra el cual se puede encontrar por medio de dos métodos los cuales se muestran en la figura 3.6.

En el caso (a) el punto de reflexión se obtiene uniendo la imagen de la antena del móvil con la antena de la estación base, el punto sobre la superficie en donde se intercepte será el punto de reflexión, mientras que en el caso (b) se une la imagen de la antena de la estación base con la antena del móvil y de esta forma se obtiene el punto de reflexión sobre el terreno.



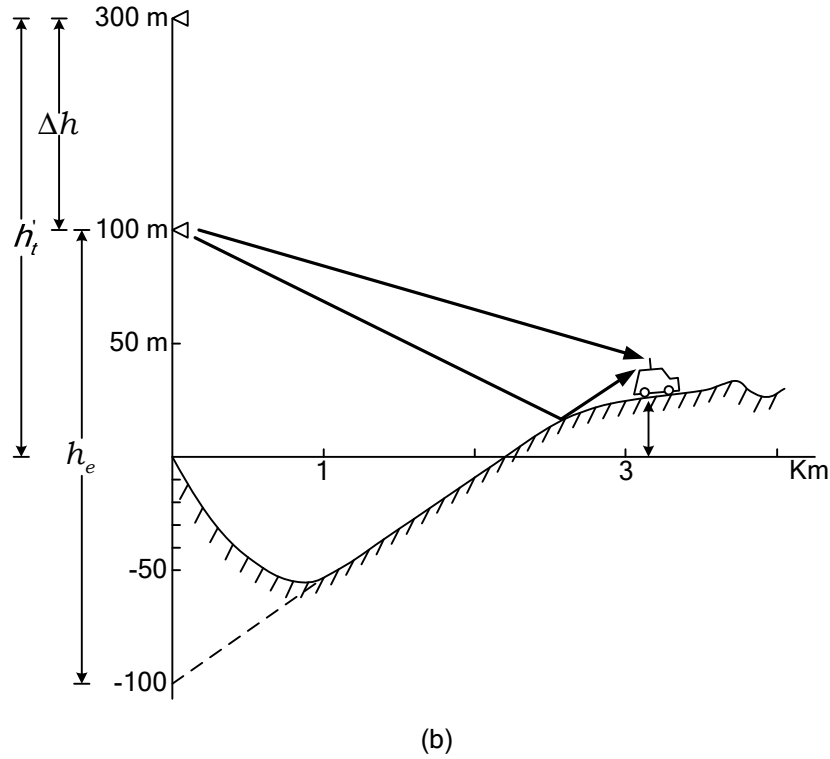


Figura 3.6. Cálculo de la altura de la antena efectiva.

En cada uno de los terrenos se extiende el plano de tierra por medio de una línea tangente a la curvatura del terreno para unirse a la imagen de la antena de la estación base. Este plano de tierra nos sirve como referencia para encontrar la altura efectiva de la antena (h_e) la cual se calcula midiendo a partir de la intercepción de la línea tangente y la imagen de la antena de la estación base hasta la altura real de la antena (h_t).

Ya que se conoce el valor de h_e se suma al valor de la antena transmisora para obtener el valor total de la antena (h_t'). Por último se calcula la ganancia de la antena transmisora por medio la siguiente expresión [1].

$$\Delta G = 20 \log \frac{h_e}{h_t} \quad (3.6)$$

donde h_e es la altura efectiva de la antena y h_t es la altura real de la antena transmisora, esta ganancia cambia dependiendo de la trayectoria que lleve el móvil puesto que la altura efectiva de la antena también cambia.

Otra forma de explicar la altura efectiva de la antena es la que se muestra en la figura 3.7 en donde se considera que la altura del terreno donde está ubicado el móvil (H) es mucho mayor que la altura del móvil (h_r), y la longitud de la superficie en donde se encuentra el móvil (l) es igual a la longitud del móvil por lo que solo existe una trayectoria directa, debido a esto es posible aplicar las pérdidas por trayectoria en el espacio libre teniendo como resultado que la intensidad de la señal en el receptor sea intensa [2].

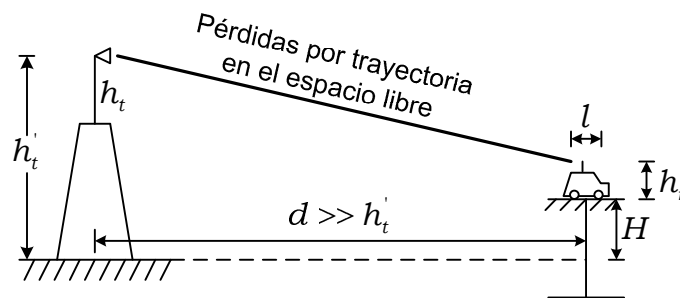


Figura 3.7. Propagación por onda directa.

En la figura 3.8 se puede apreciar que la situación es la misma que en el caso anterior a excepción que la longitud l es mayor a la superficie donde se encuentra el móvil lo cual ocasiona que exista un punto de reflexión sobre esta superficie.

En este caso existen dos trayectorias, la directa y la reflejada. Al presentarse estas dos ondas la intensidad de la señal de la trayectoria directa se debilita puesto que la señal de la trayectoria reflejada consume parte de la potencia de transmisión [2].

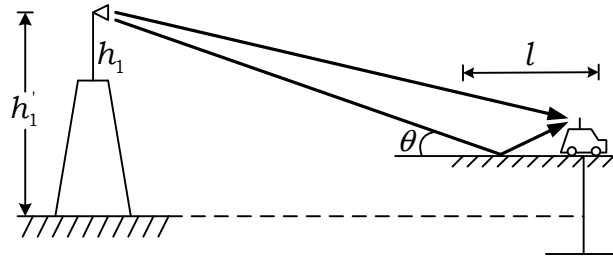


Figura 3.8. Propagación por dos ondas.

En la figura 3.9 se muestran dos casos: (a) cuando el ángulo incidente (θ) se aproxima a cero y el coeficiente de reflexión es grande provocando que la recepción de la señal tienda a ser muy débil y (b) cuando θ se incrementa surgen las pérdidas por oscurecimiento debido a que la trayectoria directa y la trayectoria reflejada se anulan [2].

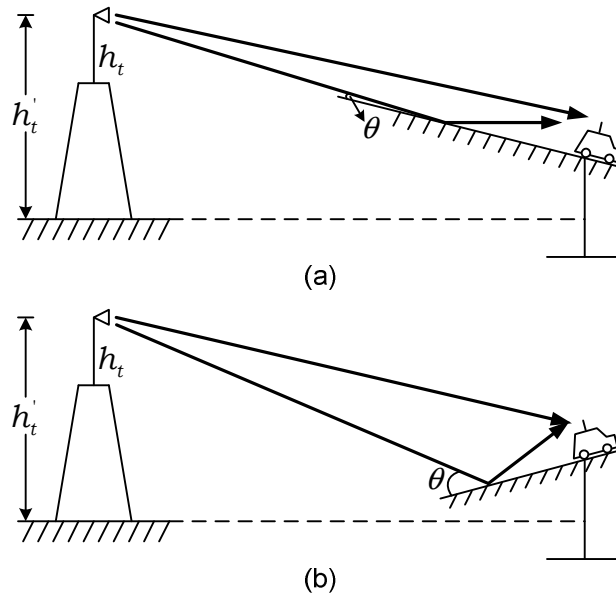


Figura 3.9. Propagación dependiendo del ángulo incidente.

Por otra parte cuando el ángulo incidente es muy pequeño se consideran las condiciones mostradas en la figura 3.10 [2, 3].

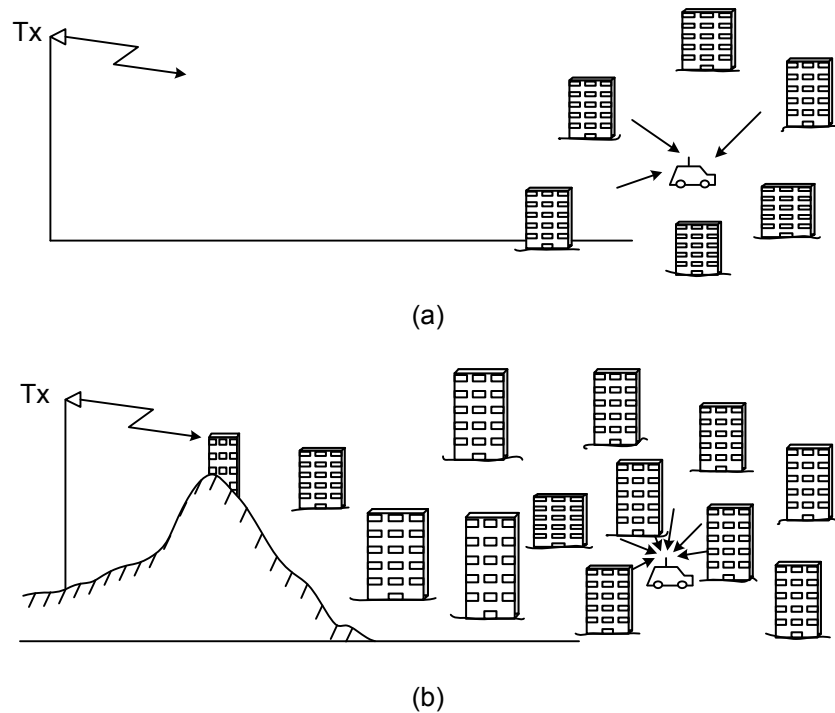


Figura 3.10. Ambientes con estructuras hechas por el hombre.

En el caso (a) se considera un ambiente donde existen algunas estructuras hechas por el hombre esparcidas a lo largo de la trayectoria de propagación por lo que la potencia recibida en esa zona es alta como consecuencia de esto la potencia recibida en un área abierta es mayor que en un área urbana o un área suburbana.

Por otra parte, en el caso (b) se tiene un ambiente donde existen varias estructuras hechas por el hombre a lo largo de la trayectoria de propagación. Para esta situación se deben considerar dos condiciones. La primera se presenta cuando existe línea de vista entre la estación base y el móvil sin embargo las ondas reflejadas por los edificios pueden generar desvanecimientos Rician. El segundo caso se presenta cuando el móvil está rodeado por los edificios lo que significa que la trayectoria sea obstruida y se presenten desvanecimientos Rayleigh.

En cualquiera de las dos condiciones se tiene una pendiente de pérdidas por trayectoria de 40 dB/dec ya que en ambas se considero un ambiente de comunicaciones móviles [8].

3.3.2. Sin línea de vista (NLOS).

En este caso la trayectoria directa entre la estación base y el móvil se encuentra obstruida por el terreno por lo que se consideran dos casos. El primero, es aplicar un modelo área-área suponiendo que no existiera la obstrucción, esto es, comparar el área de interés con alguna de las pendientes de pérdidas por trayectoria expuestas en la figura 3.5.

En el segundo caso se obtienen las pérdidas por difracción con la ayuda del modelo de borde simple o de borde doble, los cuales se desarrollarán a continuación.

3.3.2.1. Modelo de borde simple (*single knife-edge*).

En el modelo de borde simple se considera que la trayectoria directa entre la estación base y el móvil está obstruida por una elevación del terreno como consecuencia la señal llega al móvil por medio de difracciones. Sin embargo estas difracciones producen algunas pérdidas en la señal. En la figura 3.11 se observa el modelo de borde simple [1, 2, 3].

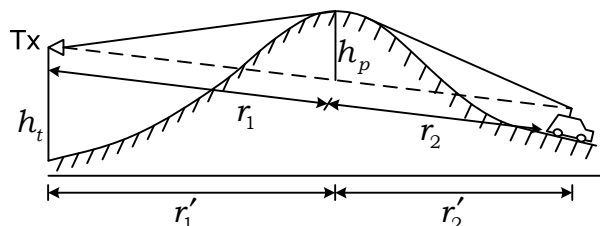


Figura 3.11. Representación del modelo de borde simple.

Para encontrar las pérdidas por difracciones se tienen que calcular los parámetros r_1 , r_2 y h_p .

Como se observa en la figura, r_1 es la distancia entre la estación base y el punto máximo de la elevación, r_2 es la distancia entre el punto máximo de la elevación y la ubicación del móvil, y h_p es la altura del punto máximo de elevación hasta el punto donde intercepta la trayectoria directa de la estación base al móvil la cual está representada por una línea punteada. Se debe de obtener un parámetro (v) el cual es un factor que depende de λ y de los parámetros mencionados el cual esta dado por

$$v = -h_p \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} \quad (3.7)$$

El valor para h_p de acuerdo a la figura 3.11 es positivo puesto que se obtiene por medio de la diferencia entre la altura máxima y la altura correspondiente a la intercepción entre la trayectoria directa y el punto máximo de elevación. Sin embargo se presenta un caso especial cuando la elevación del terreno está por debajo de la trayectoria directa por esta razón h_p tiende a ser negativo esto se puede apreciar en la figura 3.12.

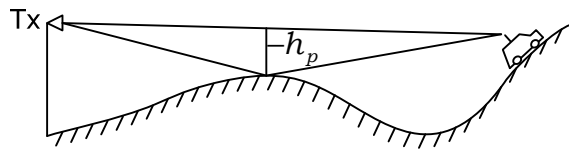


Figura 3.12. Modelo de borde simple (h_p negativo).

Ya que se obtuvieron todos los parámetros y se calculo v se emplea una de las siguientes expresiones (de acuerdo al valor de v) para encontrar las pérdidas por difracción (L).

$$1 \leq v \quad L = 0 \text{ dB} \quad (3.8a)$$

$$0 \leq v < 1 \quad L = 20 \log(0.5 + 0.62v) \text{ dB} \quad (3.8b)$$

$$-1 \leq v < 0 \quad L = 20 \log(0.5e^{0.95v}) \text{ dB} \quad (3.8c)$$

$$-2.4 \leq v < -1 \quad L = 20 \log\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.1v + .38)^2}\right) \text{ dB} \quad (3.8d)$$

$$v < -2.4 \quad L = 20 \log\left(-\frac{0.225}{v}\right) \text{ dB} \quad (3.8e)$$

Para encontrar las pérdidas totales que sufre la señal a lo largo de una trayectoria de propagación se deben de considerar las pérdidas por difracciones, las pérdidas ocasionadas por el ambiente (v. figura 3.5) y sobre todo se deben de considerar los factores de corrección (v. tabla 3.2).

3.3.2.2. Modelo de borde doble (*double knife-edge*).

En el modelo de borde doble se presentan dos o más obstáculos en la trayectoria de la señal del transmisor al móvil, esto se muestra en la figura 3.13.

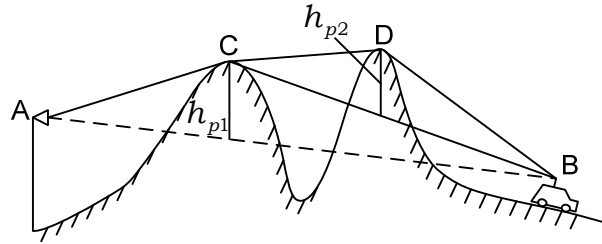


Figura 3.13. Modelo de borde doble.

De la figura, la trayectoria descrita por la señal para llegar al móvil esta representada por los triángulos ACB y CDB, para cada trayectoria se debe de encontrar las pérdidas por difracción.

En el caso del triángulo formado por ACB las pérdidas por difracción L_1 se obtienen de igual forma que en el modelo de borde simple. Sin embargo para el triángulo formado por CDB el calculo de estos parámetros se realiza tomando en cuenta que el punto más alto de la primera obstrucción se considera como una nueva antena transmisora debido a esto se toma la trayectoria CB como la trayectoria directa al móvil, después de esto se aplica la misma técnica del borde simple para encontrar L_2 . Si se considerara la existencia de otro obstáculo después de éste último, la nueva fuente sería el punto D y se tendría que realizar el proceso anterior [8].

Ya que se determinaron todas las pérdidas por difracción que existen en la trayectoria se suman para obtener las pérdidas totales por difracción. Se tienen que considerar las pérdidas por trayectoria y los factores de corrección para obtener la potencia recibida para el modelo punto-punto.

3.4. El merito del modelo punto-punto.

Con base a lo desarrollado en este capítulo quedo claro que el modelo punto-punto presenta una mayor precisión en la predicción de la potencia recibida que un modelo área-área. Una manera de demostrar que el modelo punto-punto es más preciso que un modelo área-área es trazando las pendientes de pérdidas por trayectoria de cada uno y compararlas. Cabe destacar que el fin de esta sección es solamente para ilustrar las diferencias expuestas anteriormente. Sin embargo en el siguiente capitulo se realizara la comparación de un modelo área-área y del modelo punto-punto con un terreno real y con parámetros verdaderos.

En la figura 3.14 se muestra la ubicación del móvil en diferentes puntos sobre el terreno, para poder encontrar la pendiente de pérdidas por trayectoria para el modelo punto-punto y para un modelo área-área.

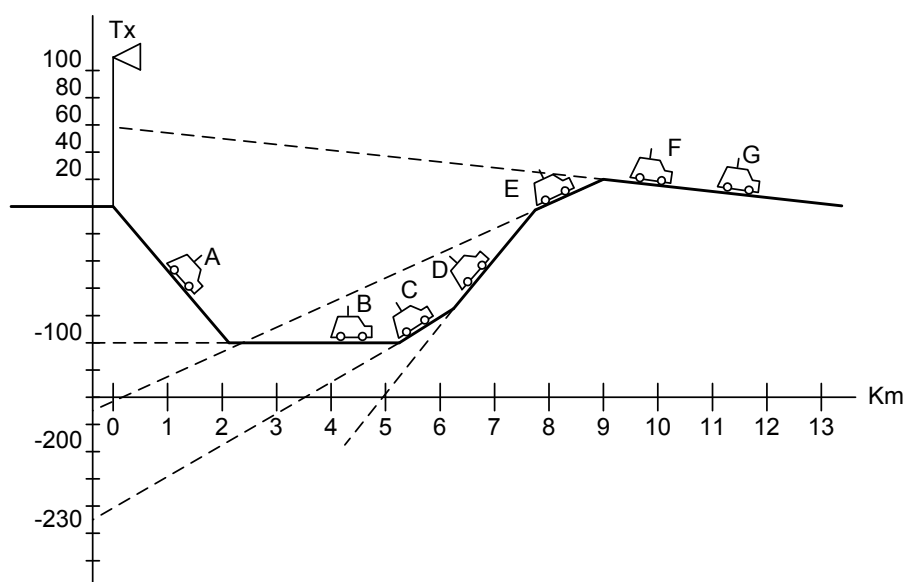


Figura 3.14. Distintas posiciones del móvil en un terreno.

Como se menciono anteriormente la diferencia principal entre estos dos modelos es que el modelo punto-punto considera la posición del móvil en cada punto sobre el terreno para realizar la predicción, mientras que en el modelo área-área se promedian los valores de las predicciones a lo largo del terreno. En la figura 3.15 se ilustran las pendientes de pérdidas por trayectoria para cada modelo.

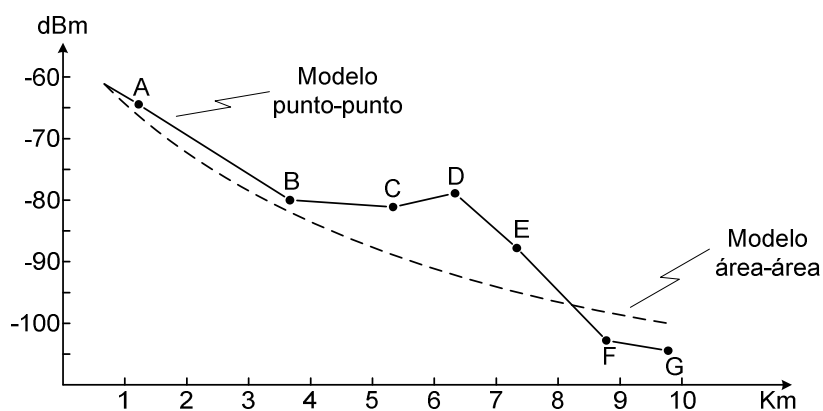


Figura 3.15. Efectos causados en la señal por el terreno.

REFERENCIAS.

- [1] W.C.Y. Lee, *Mobile Communications Engineering: Theory and Applications*, McGraw Hill, 1998.
- [2] W.C.Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGraw Hill, 1989.
- [3] W.C.Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*", Howard W. Sams, 1993.
- [4] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-29, núm. 3, 1980.
- [5] A.N. Akeyama y Y. Ebine, "Mobile Radio Propagation Characteristics and Radio Zone Design Method in Local Cities", en *Review of the Electrical communication Laboratories*, vol. 30, núm. 2, 1982.
- [6] K. Allsebrook, J.D. Parsons, "Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in the VHF and UHF Bands", en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-26, núm. 4, 1977.
- [7] W.C.Y. Lee, "Studies of Base Station Antenna Height Effect on Mobile Radio", en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-29, 1980.
- [8] W.C.Y. Lee, "A New Propagation Path-Loss Prediction Model for Military Mobile Access", en *IEEE Military Communications Conference*, vol. 2.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DEL MODELO DE LEE

Como se menciona en el capítulo anterior el modelo de predicción de Lee es más preciso que un modelo área-área ya que toma en cuenta las elevaciones del terreno, para demostrarlo se realizará una simulación en Matlab de este modelo en un terreno real, el cual se obtuvo de una base de datos de la República Mexicana del INEGI. De esta base de datos se escogieron cinco terrenos con características diferentes con la finalidad de realizar una comparación entre ellos para observar el comportamiento del modelo. Asimismo se realizará una comparación entre el modelo punto-punto y un modelo área-área.

4.1. MODELO DE LEE EN MATLAB.

El modelo de Lee como se mencionó en el capítulo anterior, es un modelo que considera las elevaciones del terreno por donde se propaga la señal, por lo que se tiene mayor certeza en las predicciones de la potencia recibida que los modelos área-área. Sin embargo es necesario utilizar herramientas computacionales para observar el comportamiento de este modelo, por esta razón se realizó una simulación en Matlab para obtener la potencia recibida en un terreno real, tomando en cuenta las pérdidas por trayectoria dependiendo del tipo de ambiente (v. figura 3.5), los factores de corrección listados en la tabla 3.2 y las difracciones que afectan a la señal cuando no se tiene línea de vista entre la estación base y el móvil [1].

La simulación consiste en posicionar una antena transmisora en cualquier punto sobre el terreno para obtener un mapa de la potencia recibida en el terreno. Posteriormente ubicamos un móvil en el terreno para obtener el perfil del terreno que se presenta entre la estación base y éste.

4.1.1. Mapas de elevación.

Los mapas de elevación (terreno) que se utilizaron para el desarrollo de esta simulación fueron obtenidos de una base de datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática) de la República Mexicana la cual contiene todas las elevaciones digitalizadas del territorio nacional. Estos mapas están divididos en 255 archivos que representan las regiones de la república a una escala de 1:250,000 metros. Estos archivos están delimitados por los meridianos y los paralelos, y cada uno equivale a un grado de longitud por un grado de latitud como se observa en la figura 4.1 [2].

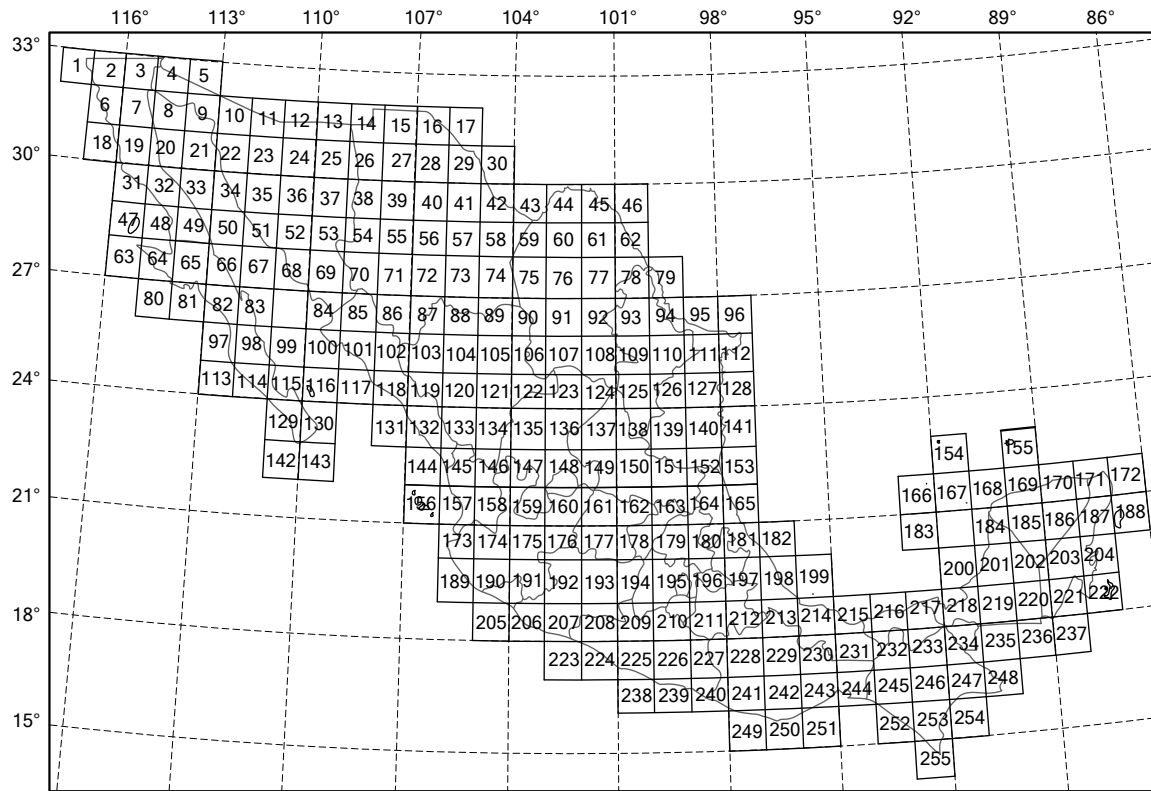


Figura 4.1. Base de datos del INEGI de la República Mexicana.

Cada archivo contiene 1,440,000 elevaciones ordenadas en forma matricial los cuales están separados cada 3 segundos de longitud por 3 segundos de latitud por lo que el archivo se puede representar en forma de una matriz de 1200 por 1200. En la figura 4.2 se muestra la forma en que se representa este archivo [2].

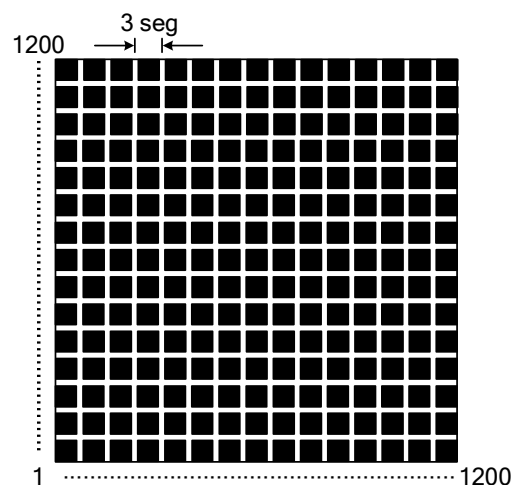


Figura 4.2. Representación matricial de un archivo.

Para conocer la equivalencia de los grados y los segundos en kilómetros empleamos la tabla 4.1, por lo que cada cuadro de la figura 4.2 equivale a 92.7 m.

1 grado terrestre	111.317 Km
1 minuto	1.855 Km
1 segundo	0.0309 Km

Tabla 4.1. Equivalencia de las coordenadas terrestres a kilómetros.

De la base de datos se escogieron cinco archivos por la variación que presentan cada uno de ellos, las regiones que representan estos archivos son el Distrito Federal, Monterrey, Guadalajara, Chichén Itzá y el Santuario de la Mariposa Monarca; cada una de estas regiones están limitadas por coordenadas terrestres, las cuales están listadas a continuación [3].

Región	Latitud		Longitud	
	Norte	Sur	Este	Oeste
Distrito Federal	19°36'	19°03'	98°57'	99°22'
Monterrey	25°48'	25°29'	100°10'	100°25'
Guadalajara	20°45'	20°36'40"	103°16'	103°24'
Chichén Itzá	20°53'	20°40'	88°33'	88°21'
Santuario de la Mariposa Monarca	19°59'42"	19°18'32"	100°06'39"	100°09'54"

Tabla 4.2. Coordenadas terrestres de los terrenos seleccionados.

Para seleccionar el archivo que contiene el mapa de elevaciones correspondiente a cada una de las regiones fue necesario ubicar cada una de estas coordenadas en la figura 4.1 para conocer el número del archivo a utilizar. Después de esto, cada uno de los archivos se tuvo que limitar con ayuda de la tabla 4.1 para obtener solo la región deseada. A continuación se muestran los terrenos ya limitados para cada una de las regiones.

La primera región es el Distrito Federal la cual se muestra en la figura 4.3, esta región se eligió por ser una zona urbana en la que predomina un terreno casi plano sin embargo presenta algunas elevaciones en sus alrededores.

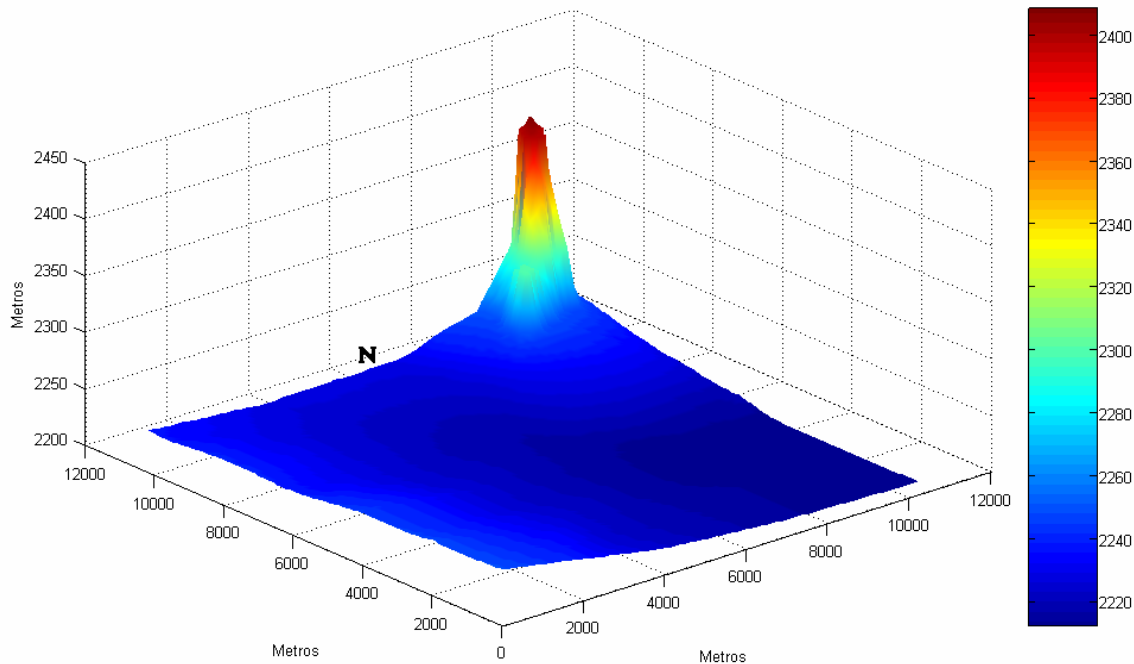


Figura 4.3. Mapa de elevaciones del Distrito Federal.

Por otra parte Monterrey presenta algunas similitudes que el Distrito Federal ya que se encuentra a las faldas del Cerro de la Silla sin embargo no presenta elevaciones mayores a 2500 metros sobre el nivel del mar, asimismo tiene algunas zonas en las que predomina el terreno casi plano. En la siguiente figura se observa el mapa de elevaciones de esta ciudad.

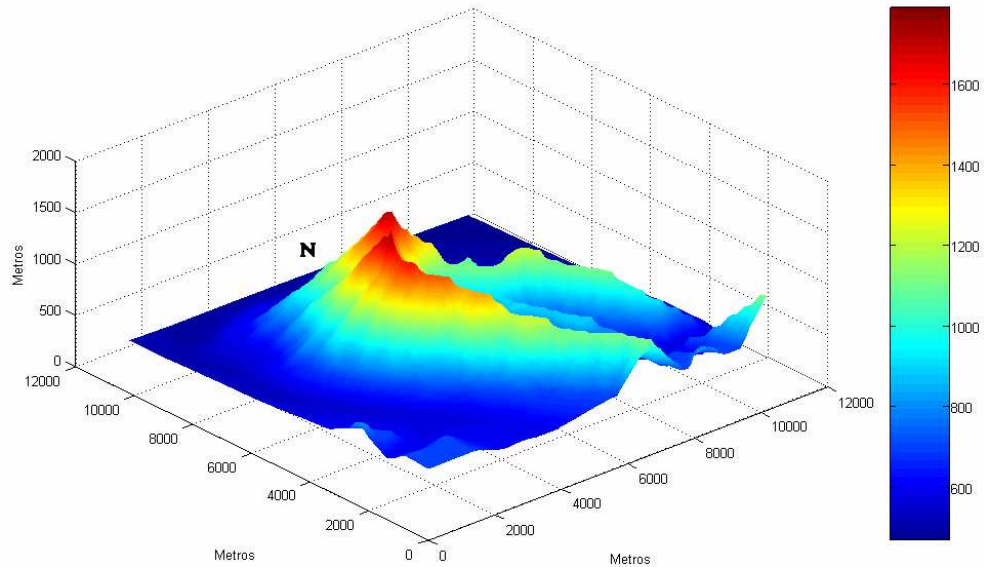


Figura 4.4. Mapa de elevaciones de Monterrey.

De igual forma la ciudad de Guadalajara es una zona en la cual las elevaciones en el centro de su territorio son muy altas con respecto al nivel del mar sin embargo no presenta variaciones abruptas por lo que se puede considerar como una superficie casi plana. No obstante este terreno al igual que el Distrito Federal y Monterrey tienen variaciones en sus alrededores como se muestra a continuación.

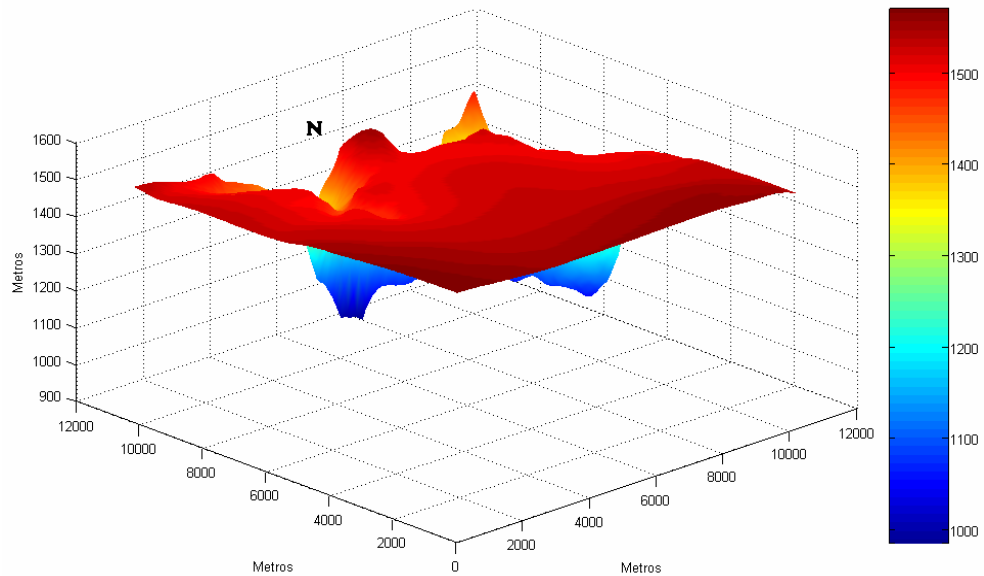


Figura 4.5. Mapa de elevaciones de Guadalajara.

En la siguiente figura se muestra la zona arquitectónica de Chichén Itzá la cual es una zona casi plana puesto que la diferencia entre sus elevaciones máxima y mínima es de aproximadamente 8 metros. Por esta razón fue que se escogió esta zona para poder visualizar el comportamiento del modelo sobre una superficie plana.

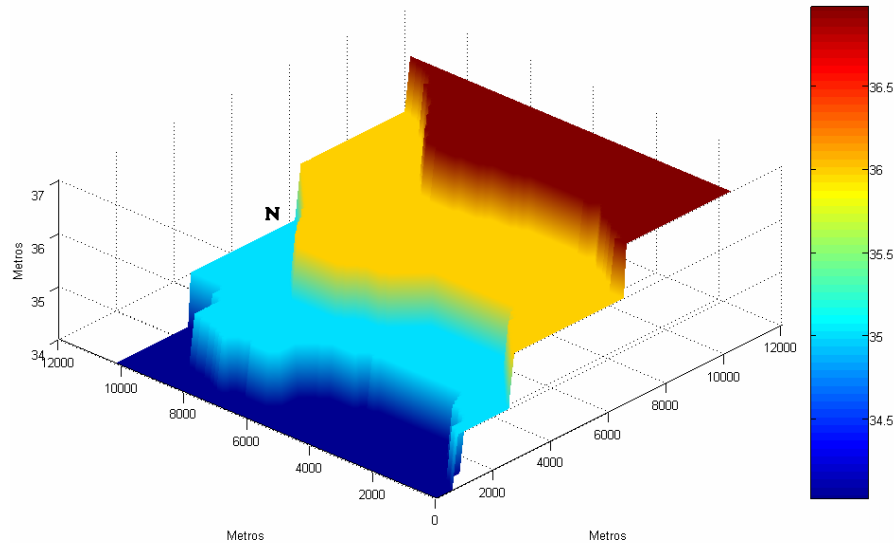


Figura 4.6. Mapa de elevaciones de Chichén Itzá.

Por último, en la siguiente figura se muestra la zona en la que se encuentra el Santuario de la Mariposa Monarca, como se puede observar es una zona muy montañosa por lo que es ideal para hacer una comparación con los terrenos descritos anteriormente.

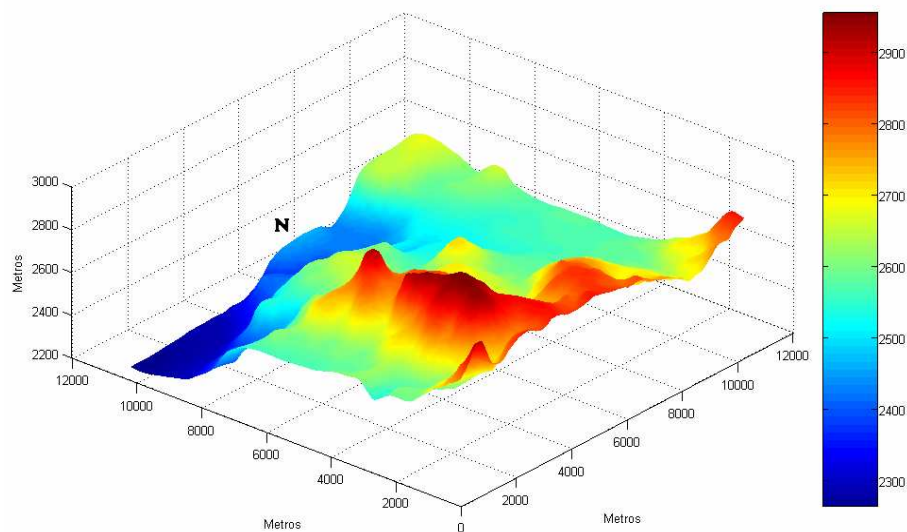


Figura 4.7. Mapa de elevaciones del Santuario de la Mariposa Monarca.

4.1.2. Mapa de la potencia recibida.

Una vez que los terrenos se delimitaron en archivos independientes, el siguiente paso para obtener la potencia recibida fue ubicar la antena transmisora por medio del mouse en un punto sobre el terreno como se muestra en la figura 4.8, donde Tx representa la posición de esta antena.

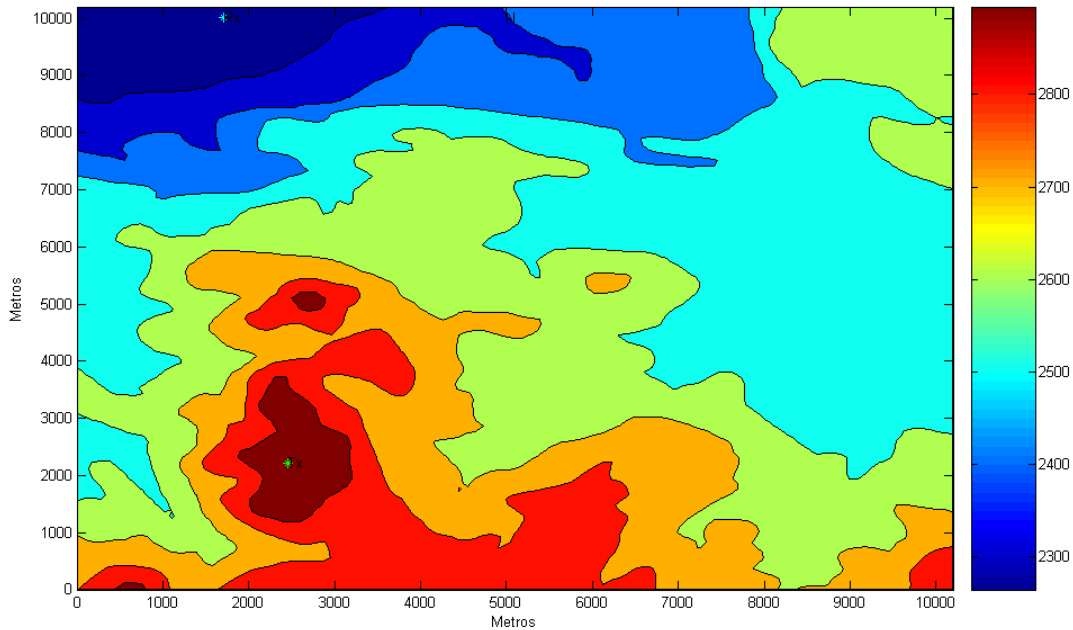


Figura 4.8. Ubicación de la antena transmisora en el terreno.

Después elegimos un ambiente (v. figura 3.5) para obtener las pérdidas por trayectoria para cada uno de los puntos dependiendo de su distancia. Por otra parte, los parámetros de las antenas transmisora y receptora (altura y ganancia) se ingresaron por medio del teclado así como la frecuencia de operación y la potencia de transmisión. En caso de que alguno de estos parámetros no coincidiera con las condiciones estándar mostradas en la tabla 3.2 se emplean los factores de corrección para conocer los nuevos parámetros a utilizar. Otro aspecto importante en el desarrollo de la simulación además de ingresar estos parámetros fue el conocer las elevaciones que existen en cada una de las trayectorias entre la estación base y cada uno de los puntos del terreno (figura 4.9), con esto es posible calcular las pérdidas por difracción en cada trayectoria [1].

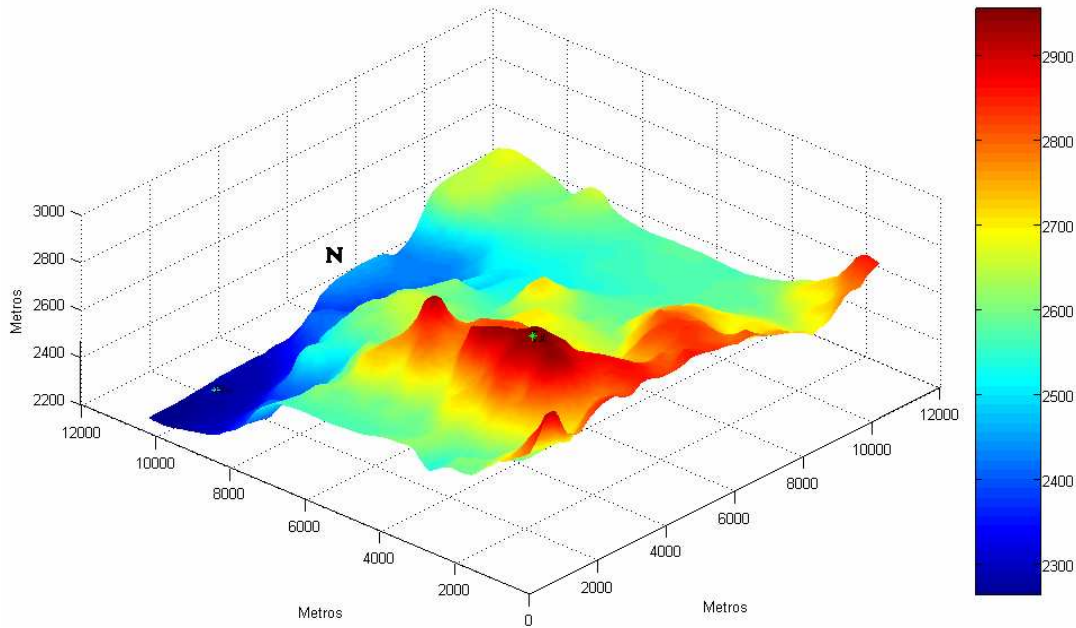


Figura 4.9. Mapa de elevaciones y la posición de la antena transmisora.

Ya que se tienen las pérdidas por trayectoria, las pérdidas por difracción y las variaciones causadas por los factores de corrección se obtiene la potencia recibida en cada punto obteniendo de esta forma el mapa de la potencia recibida en todo el terreno, esto se aprecia en la figura 4.10.

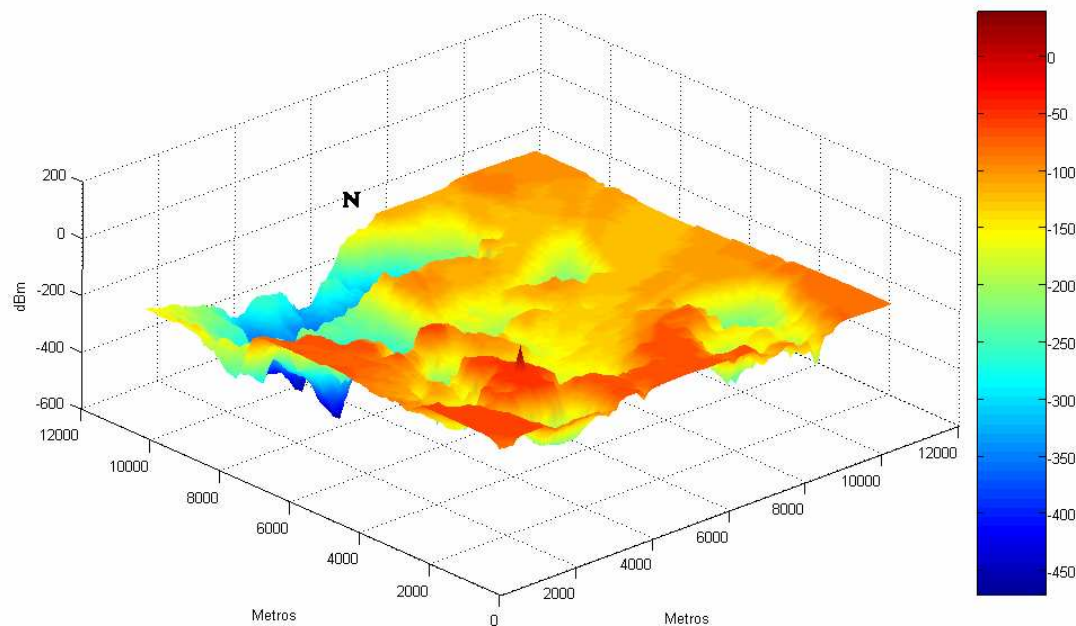


Figura 4.10. Mapa de la potencia recibida en cada punto del terreno.

La última etapa de la simulación consistió en ubicar el móvil sobre el terreno para obtener el perfil de la trayectoria entre la estación base y el móvil, de este modo se obtiene la potencia recibida en ese punto del terreno en específico (figura 4.11).

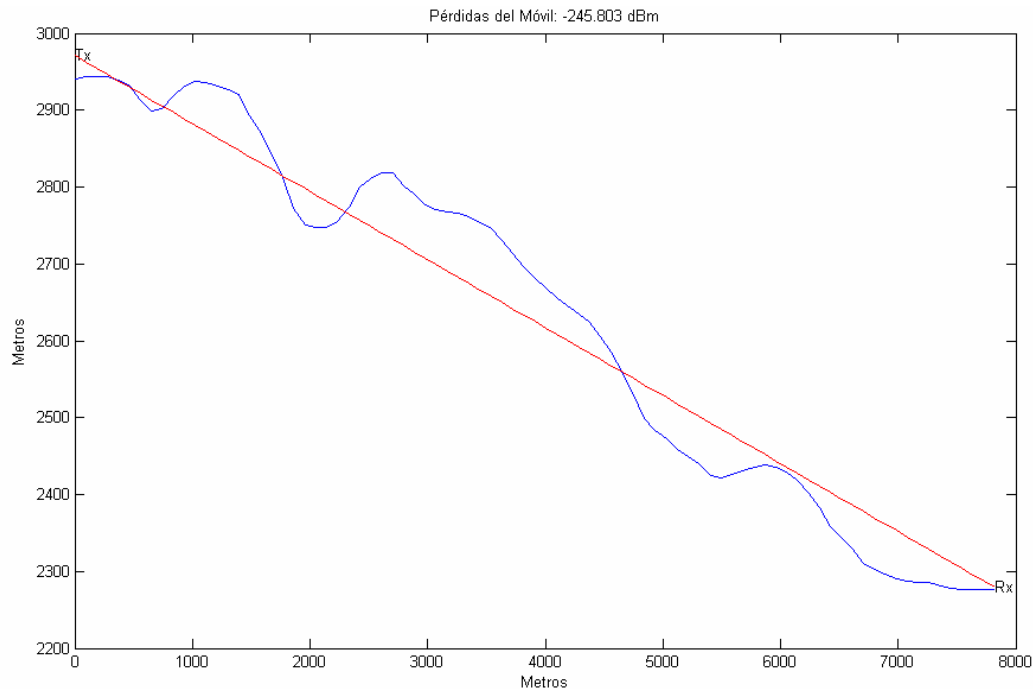


Figura 4.11. Perfil del terreno de la trayectoria entre la estación base y el móvil.

4.2. INTERFAZ GUI DE MATLAB.

La interfaz GUI (Interfaz de usuario gráfica) es el medio (ventana) por el cual un usuario puede interactuar con un programa realizado en Matlab sin necesidad de ejecutarlo varias veces, ya que esta ventana contiene una serie de elementos que permiten modificar los parámetros de forma independiente. Para poder hacer esta interfaz es necesario utilizar la herramienta GUIDE que contiene los componentes necesarios (menús, barras de herramientas, botones, deslizadores entre otros) dentro de una ventana en blanco los cuales se pueden acomodar dependiendo del diseño del programador. En la siguiente figura se muestra la ventana de GUIDE y sus elementos [4].

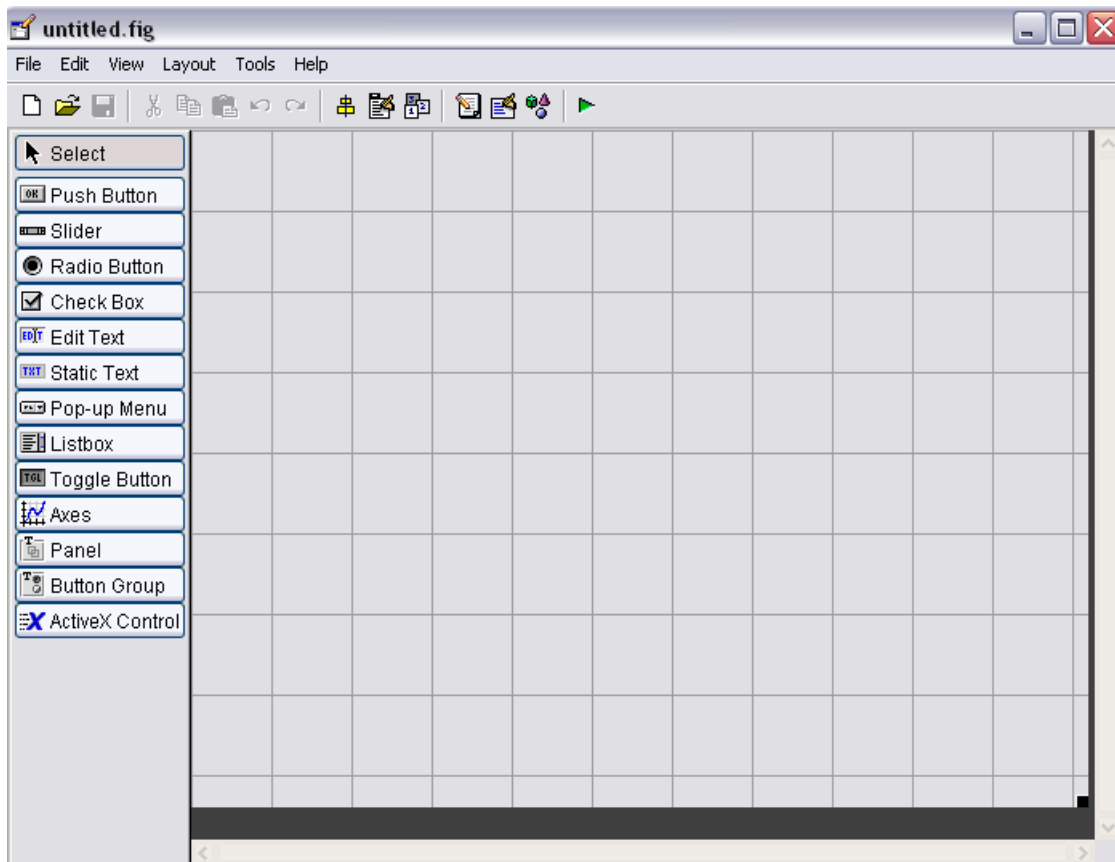


Figura 4.12. Ventana de GUIDE.

4.2.1. Modelo de Lee en interfaz GUI.

El objetivo de implementar el modelo de Lee en esta interfaz fue que el usuario tuviera la facilidad de cambiar cualquier parámetro (potencia de transmisión, frecuencia de operación, alturas y ganancias de la estación base y el móvil) sin la necesidad de ejecutar el programa en repetidas ocasiones para que de esta forma se pudiera hacer una comparación de los resultados obtenidos para cada terreno.

A continuación se muestra la ventana de la interfaz en la cual es posible ejecutar la simulación del modelo de Lee.

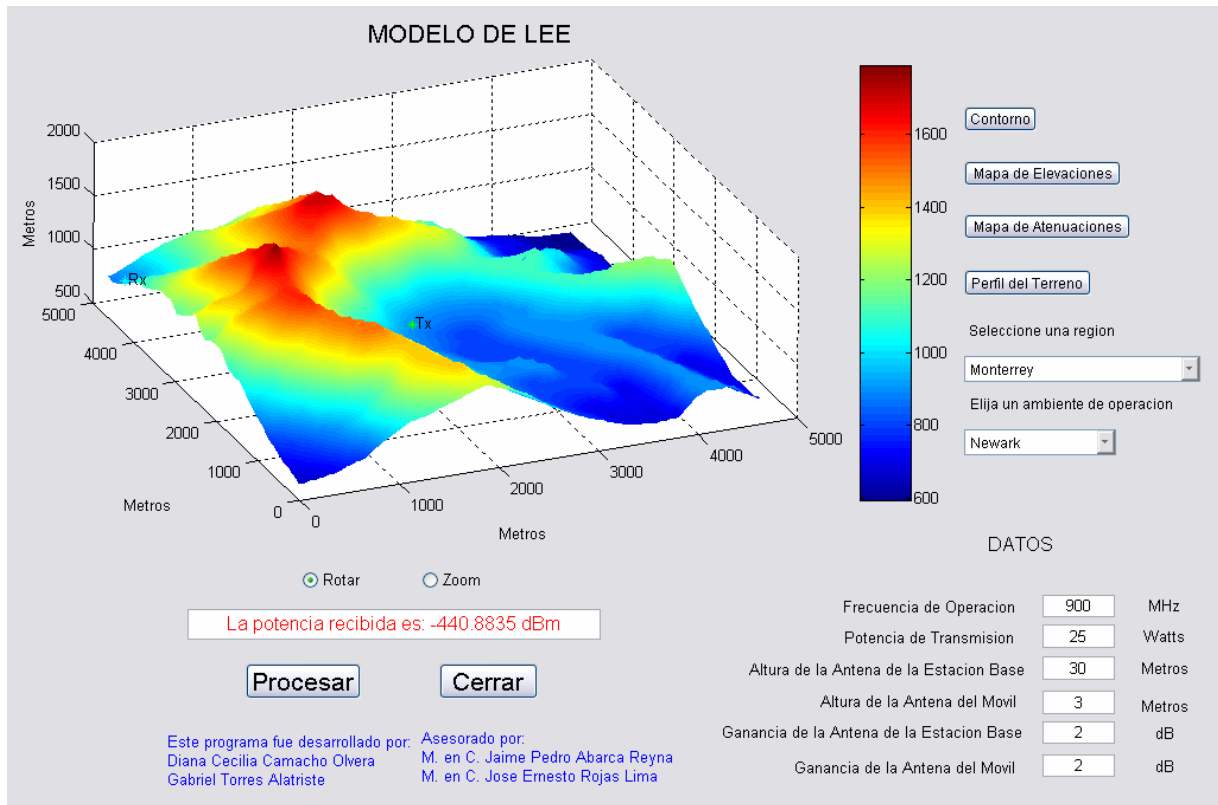


Figura 4.13. Interfaz GUI para la simulación del modelo de Lee.

4.3. RESULTADOS.

En esta sección se evalúa el modelo de predicción de Lee en los cinco terrenos antes descritos. Las zonas en las que se realiza esta evaluación son el Distrito Federal, la ciudad de Guadalajara, la ciudad de Monterrey, la zona arqueológica de Chichén-Itzá y el Santuario de la Mariposa Monarca debido a que presentan diferencias en sus elevaciones. Con base a esto se presentan los mapas de la potencia recibida en estos terrenos para hacer una comparación entre estos. El área de estos terrenos es de 100 Km².

Para obtener los mapas de atenuación se utilizaron las siguientes características: potencia de transmisión de 25 watts, frecuencia de operación de 900 MHz, altura de la antena de la estación base de 30.2 metros, altura de la antena del móvil de 3 metros, la ganancia de la antena transmisora es de 2 dB y se utilizó el ambiente de área abierta para obtener las pérdidas por trayectoria [5, 6].

A continuación se muestran los mapas de la potencia recibida para los diferentes terrenos, en donde la antena de la estación base se ubica en el centro del terreno.

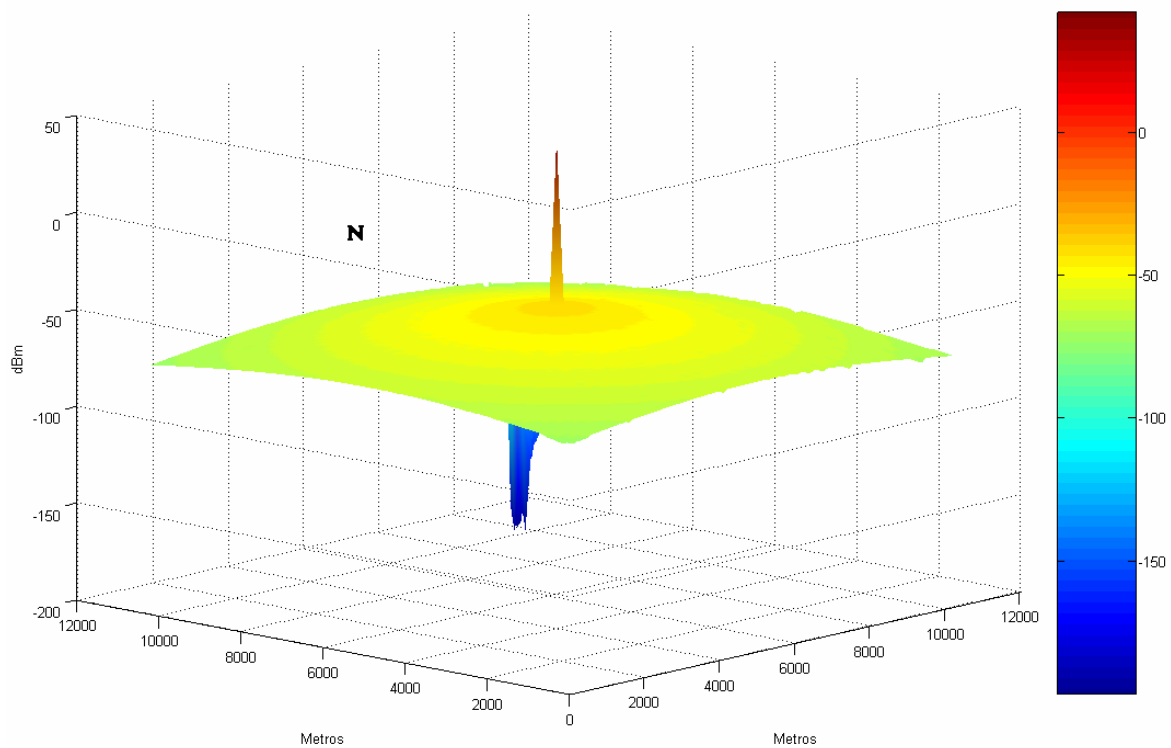


Figura 4.14. Mapa de atenuaciones del Distrito Federal.

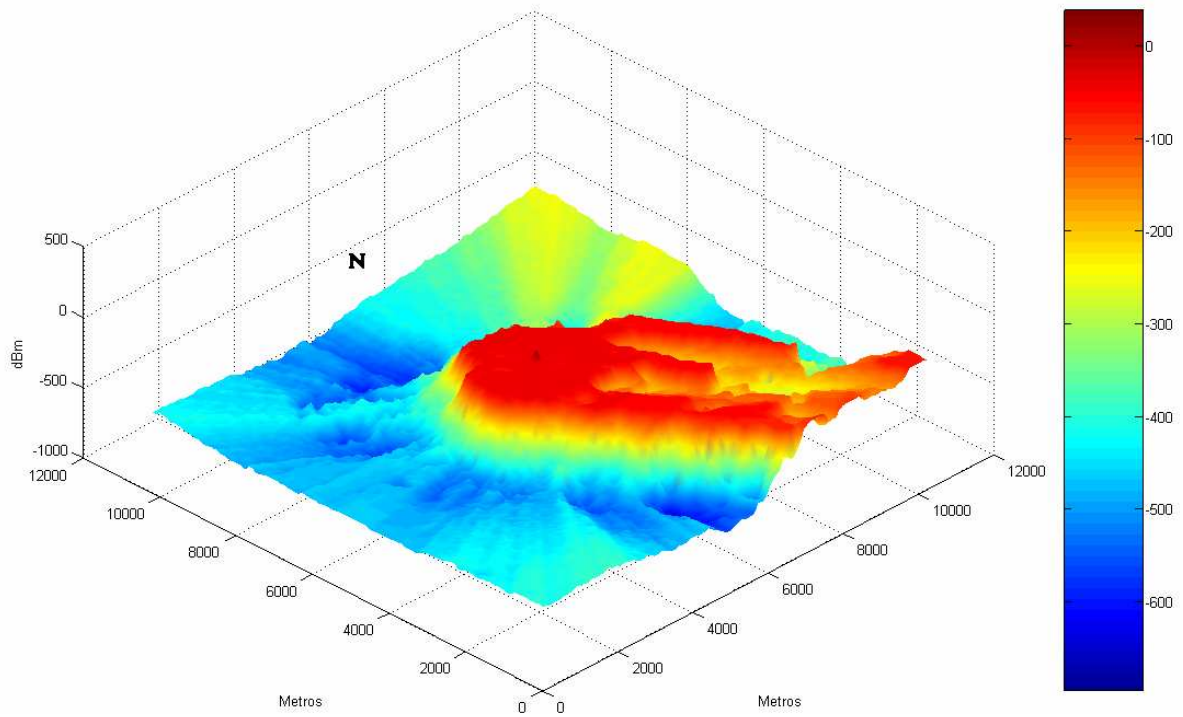


Figura 4.15. Mapa de atenuaciones de Monterrey.

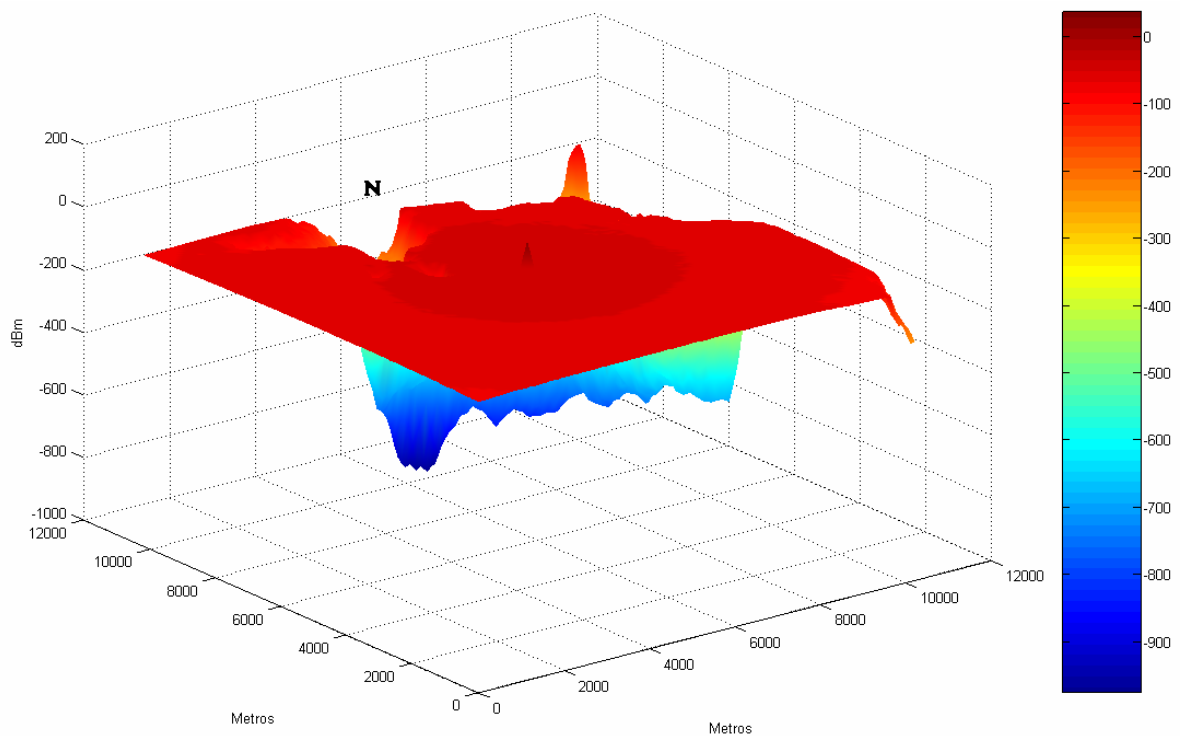


Figura 4.16. Mapa de atenuaciones de Guadalajara.

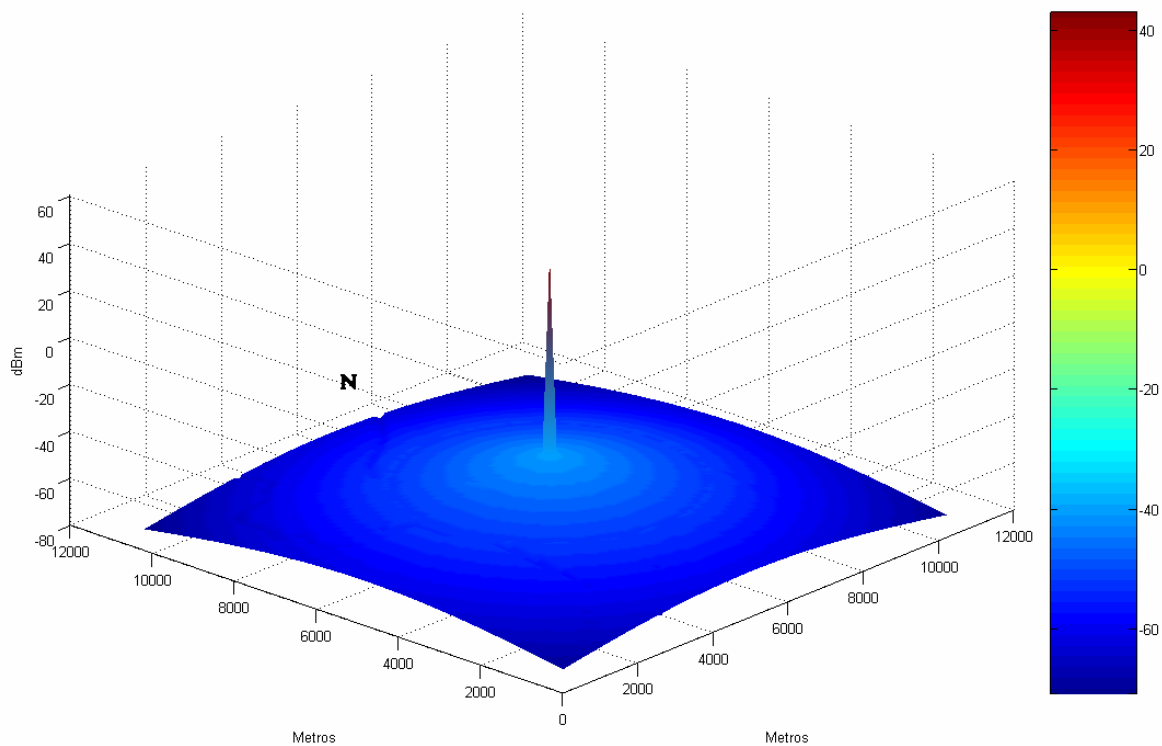


Figura 4.17. Mapa de atenuaciones de Chichén Itzá.

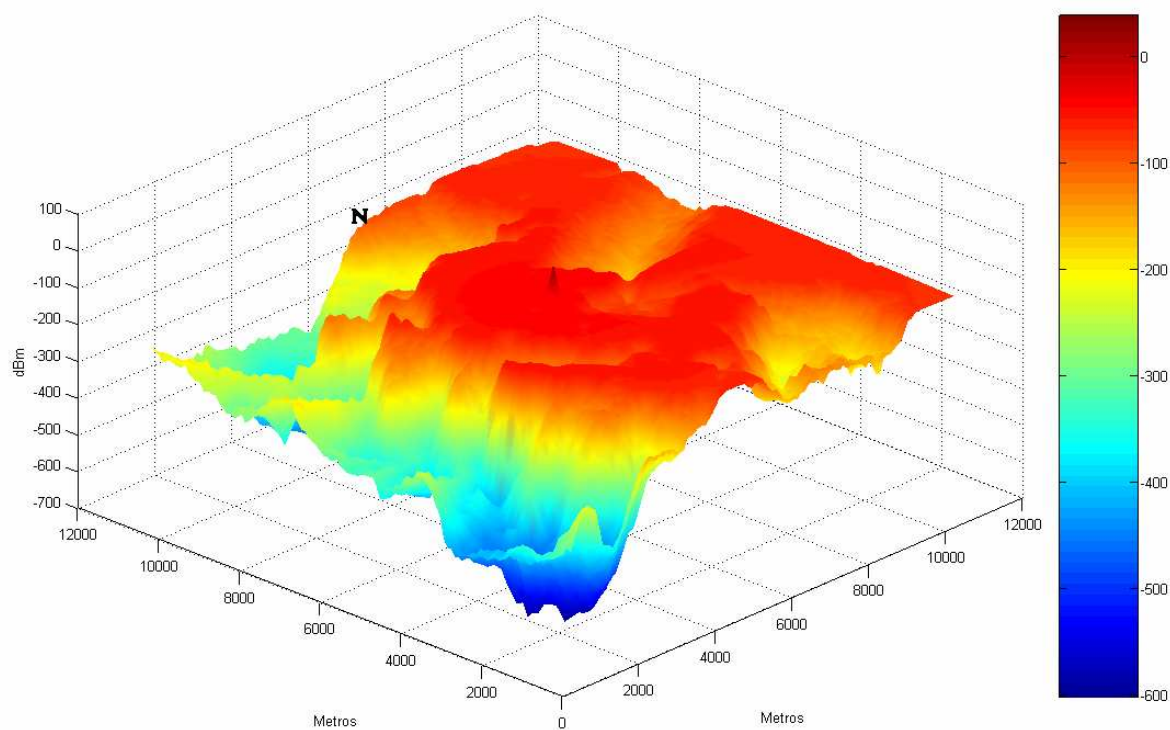


Figura 4.18. Mapa de atenuaciones del Santuario de la Mariposa Monarca.

En las figuras anteriores se puede ver el comportamiento del modelo punto-punto puesto que los terrenos tienen diferentes elevaciones (v. figuras 4.3-4.7) por lo tanto el mapa de atenuaciones de cada terreno es diferente aunque se coloque la estación base en el mismo punto (centro del terreno).

La interpretación de estas figuras es la siguiente, las zonas con el tono rojo oscuro representan aquellas zonas que tienen LOS en la trayectoria entre la estación base y el móvil, sin embargo conforme va aumentando la distancia de separación entre la estación base a un punto sobre el terreno este tono se degrada hasta la gama de azules los cuales indican que la potencia ha disminuido considerablemente, esta degradación también es ocasionada debido a la presencia de uno o varios obstáculos en la trayectoria de propagación.

Con base a esto es claro que la zona que presenta una mejor respuesta en la predicción de la potencia recibida es Chichén Itzá (v. figura 4.17) debido a que tiene un terreno muy plano por lo que la potencia mínima en ese terreno es de aproximadamente -60 dBm. Por otra parte para el Distrito Federal y Guadalajara (v. figuras 4.14 y 4.16) presentan un terreno similar ya que en el centro predomina una superficie plana, sin embargo en los alrededores presentan tanto montañas como peñascos por lo que en estas zonas la potencia disminuye debido a que no se tiene LOS en la trayectoria entre la estación base y el móvil. Sin embargo los mapas en donde se aprecia de mejor forma el comportamiento del modelo punto-punto son el de Monterrey y el Santuario de la Mariposa Monarca (v. figura 4.15 y 4.18). Para el caso de Monterrey la estación base se encuentra rodeada por una montaña (v. figura 4.4) provocando que no se tenga una buena cobertura de la señal en toda la zona, esto se puede corregir ubicando otra antena transmisora en las zonas de baja potencia del mapa. Por último el mapa del Santuario presenta una mejor cobertura que el obtenido para Monterrey, esto significa que presenta mayor número de trayectorias con LOS aunque sea un terreno muy montañoso.

Otra etapa de la simulación fue obtener la potencia recibida en un punto sobre el terreno por lo que fue necesario ubicar por medio del mouse la antena del móvil a una distancia aproximada de 5 Km de la estación base para obtener el perfil del terreno de la trayectoria entre la estación base y el móvil así como la potencia recibida en ese punto. En las siguientes figuras se muestra el perfil del terreno y la potencia recibida aproximadamente a 5 Km de distancia de la estación base para los diferentes terrenos.

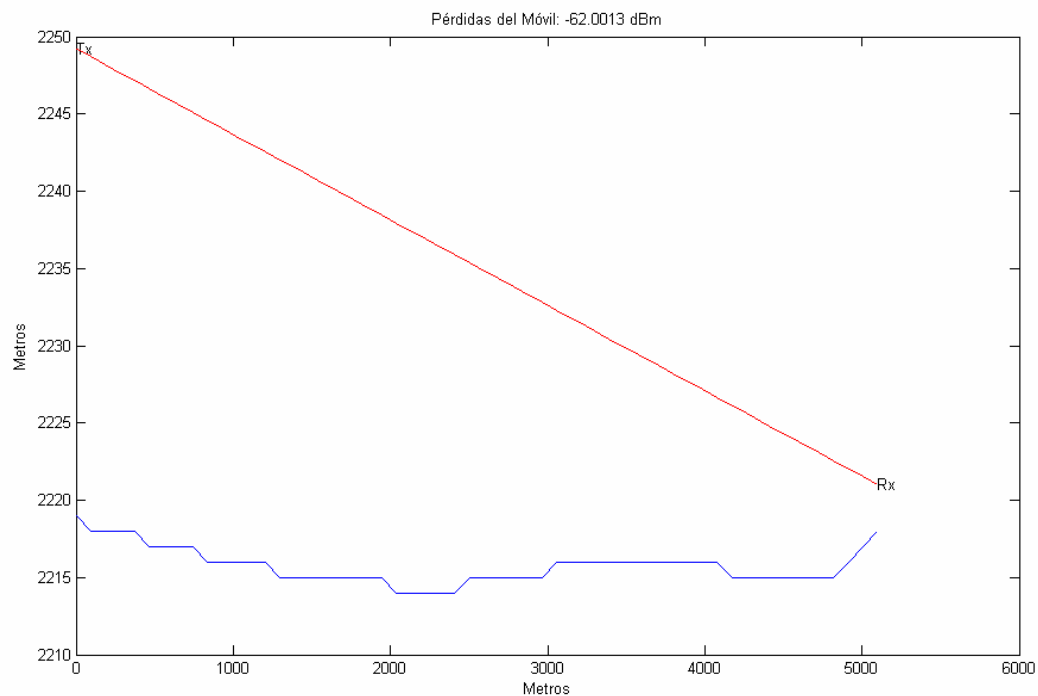


Figura 4.19. Perfil del terreno para el Distrito Federal.

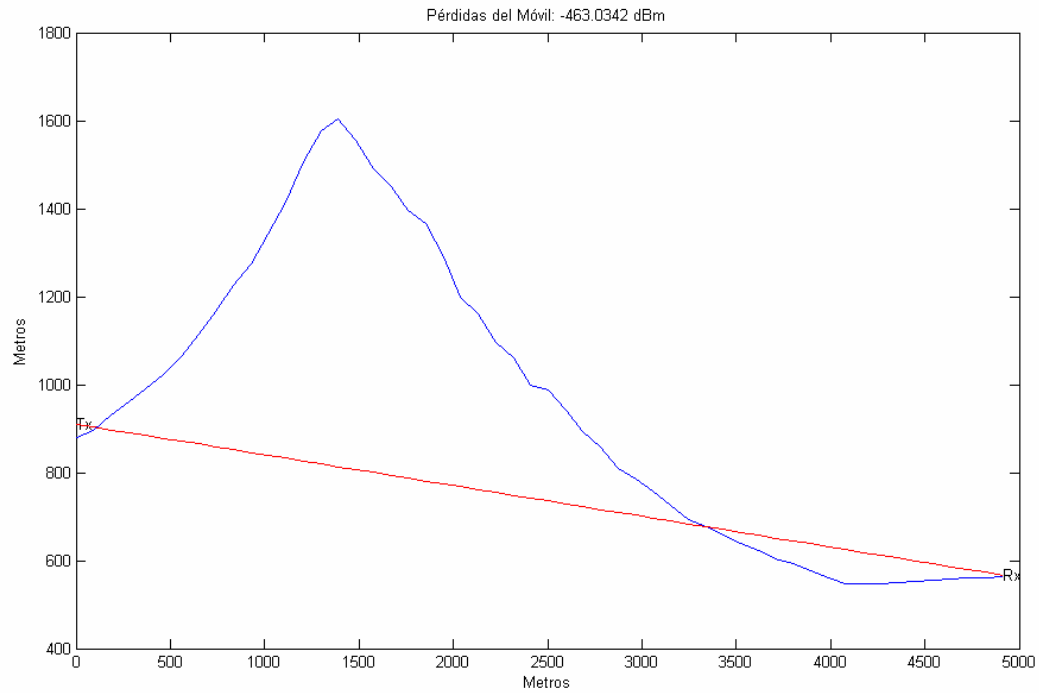


Figura 4.20. Perfil del terreno para Monterrey.

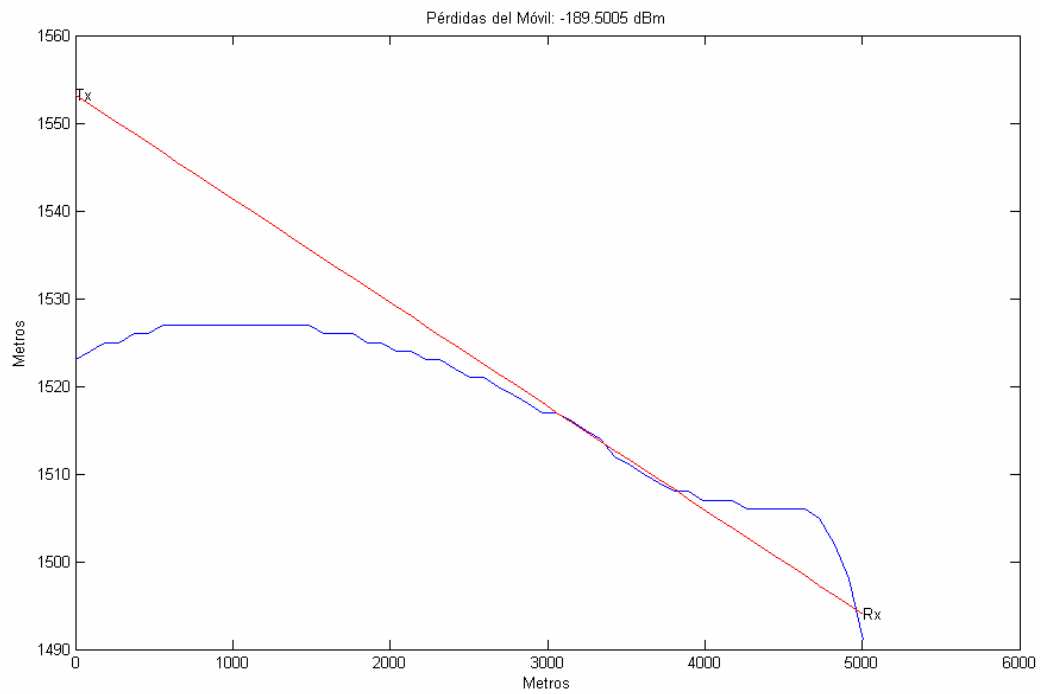
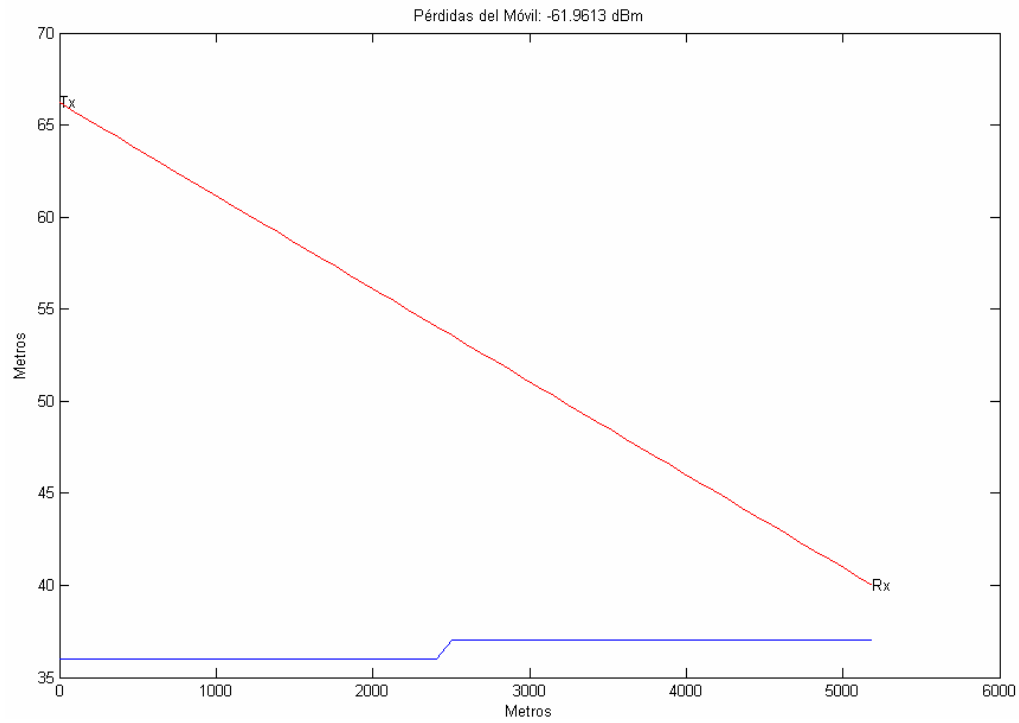
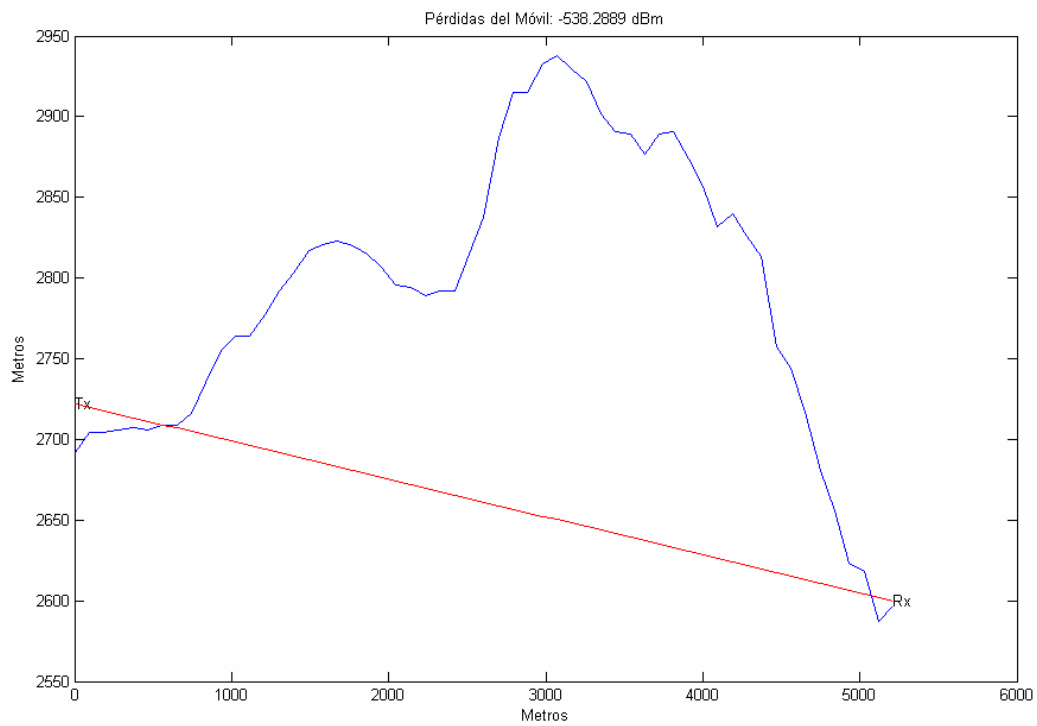


Figura 4.21. Perfil del terreno para Guadalajara.

**Figura 4.22.** Perfil del terreno para Chichén Itzá.**Figura 4.23.** Perfil del terreno para el Santuario de la Mariposa Monarca.

De las figuras anteriores se observa que la potencia recibida para los terrenos (v. figuras 4.3-4.7) a una misma distancia varia dependiendo de las condiciones de propagación, esto significa si existe LOS ó NLOS entre la estación base y el móvil, así como el tipo de ambiente (v. sección 3.2.2). Para el Distrito Federal y Chichén Itzá se presenta LOS en la trayectoria de propagación debido a que la mayoría de su territorio es una superficie plana, la potencia recibida a una distancia de 5 Km para estas dos zonas es de aproximadamente -62 dBm (v. figuras 4.19 y 4.22). Por otra parte los perfiles de Monterrey, Guadalajara y el Santuario no presentan línea de vista por lo que la potencia recibida es baja (v. figuras 4.20, 4.21 y 4.23), sin embargo de estos tres el que tiene la potencia más alta es el perfil de Guadalajara ya que no hay tantas elevaciones que obstruyan la trayectoria de propagación.

Como se mencionó anteriormente el modelo de Lee no considera solamente las pérdidas por difracción y los factores de corrección, también considera las pérdidas por trayectoria dependiendo del ambiente, por esta razón en este trabajo se obtuvo el mapa de la potencia recibida para un mismo terreno (Santuario de la Mariposa Monarca) utilizando diferentes ambientes para observar los efectos de las pérdidas por trayectoria en un sistema de comunicaciones. En la siguiente figura se muestra el mapa de atenuaciones del Santuario con el ambiente de New York.

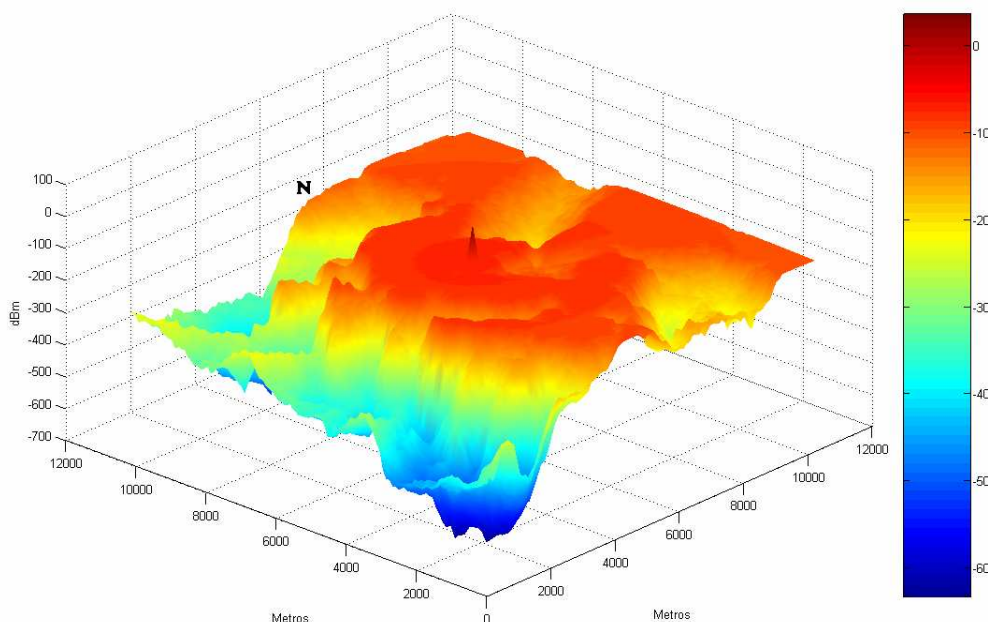


Figura 4.24. Mapa de la potencia recibida para el ambiente de New York.

Si comparamos el mapa obtenido en un área abierta (v. figura 4.18) con la figura anterior se puede ver que al utilizar el ambiente de New York (v. figura 3.5) existe una mayor atenuación en la potencia recibida debido a que este ambiente es uno de los que presenta mayores pérdidas por trayectoria.

Como nuestro objetivo principal es demostrar que el modelo punto-punto es más preciso que un modelo área-área se realizó una comparación entre el modelo de Lee y el modelo Okumura-Hata los cuales se evaluaron en el Santuario de la Mariposa Monarca. Los parámetros utilizados para el modelo Okumura-Hata fueron los mismos que se emplearon para obtener el mapa de atenuaciones con el modelo de Lee, sin embargo se realizaron algunas modificaciones con base a la teoría expuesta en el capítulo 2. Estas modificaciones se realizaron debido a que el modelo Okumura-Hata considera el terreno como si fuera una superficie plana. Con base a esto fue necesario emplear la expresión 2.2 para obtener las pérdidas por trayectoria para este modelo, donde C_1 y C_2 utilizan los valores de 69.55 dB y 26.16 dB respectivamente y para $a(h_r)$ se emplea la expresión 2.5 debido a que se utilizó una frecuencia de 900 MHz (v. sección 2.2) [7, 8]. En las figuras 4.25 y 4.26 se muestran los mapas de la potencia recibida en el Santuario de la Mariposa Monarca con el modelo Okumura-Hata y con el modelo de Lee respectivamente.

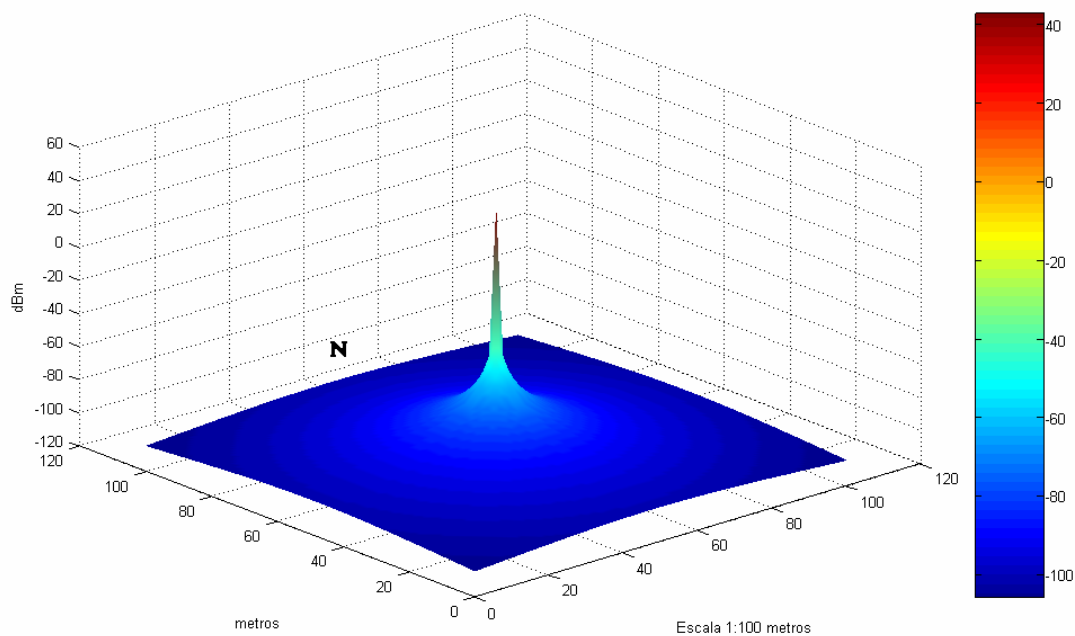


Figura 4.25. Mapa de atenuaciones con el modelo Okumura-Hata.

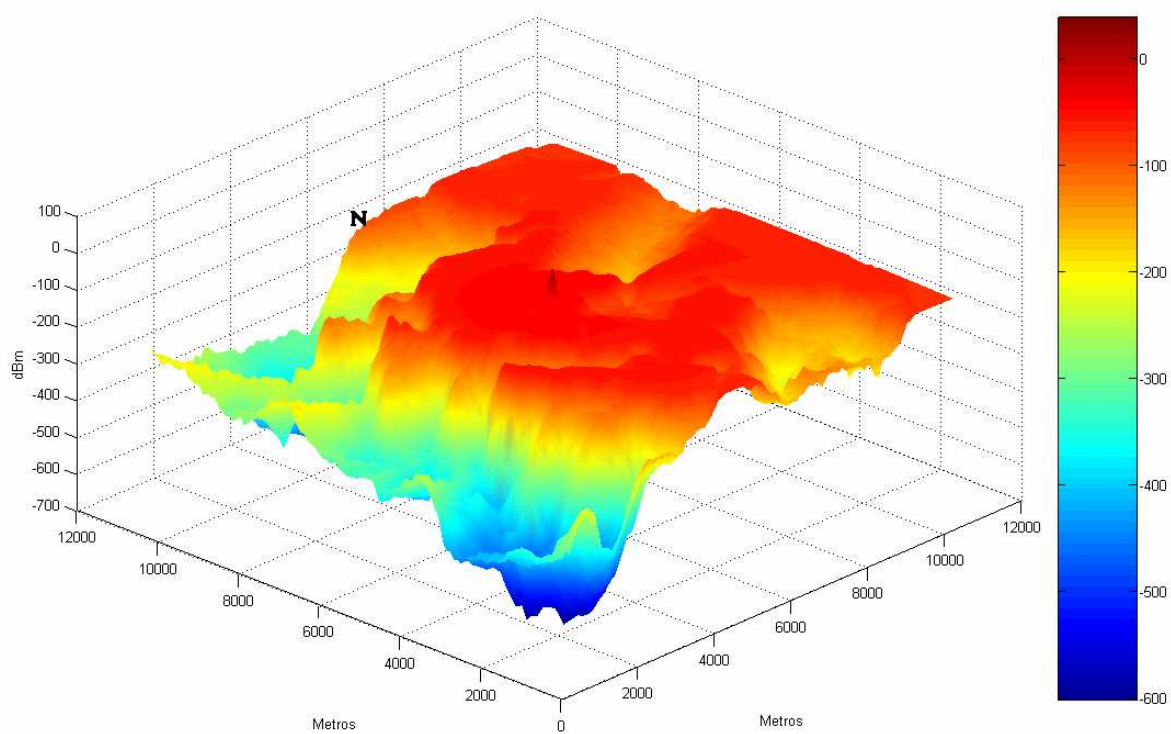


Figura 4.26. Mapa de atenuaciones con el modelo de Lee.

Después de haber obtenido el mapa de la potencia recibida con un modelo área-área en un terreno muy montañoso, como es el caso del Santuario (v. figura 4.7), comprobamos que el modelo Okumura-Hata no considera las elevaciones del terreno por lo que realiza la predicción en una zona plana. Esto se demuestra comparando el mapa de la potencia recibida obtenido por el modelo Okumura-Hata y el obtenido en la zona de Chichén Itzá por el modelo de Lee (v. figura 4.17) debido a que esta zona es casi plana. Por otra parte la predicción realizada con el modelo de Lee considera todas las elevaciones que se presentan en la trayectoria de la señal entre la estación base y el móvil, por esta razón el modelo de predicción de Lee es más preciso que un modelo área-área.

Debido a que la antena transmisora se ubicó en el centro de los terrenos se presentaron regiones en las que la potencia recibida era baja, para el caso específico de Monterrey en donde la antena transmisora se encuentra rodeada por un cerro, se colocó otra antena transmisora en estas regiones para que el efecto combinado de estas dos antenas diera como resultado una mejor cobertura en este terreno. En la figura 4.15 se mostró el mapa de la potencia recibida cuando la antena estaba ubicada en el centro del terreno, mientras que en la figura 4.27 se muestra la potencia recibida con la posición de la otra antena.

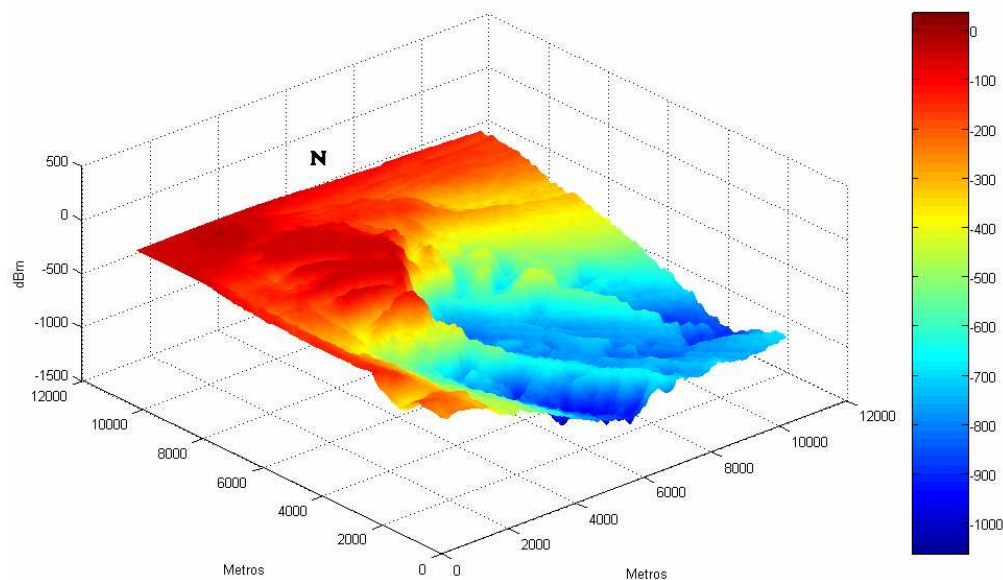


Figura 4.27. Mapa de la potencia recibida de la segunda antena.

El efecto combinado de estas antenas se muestra en la siguiente figura.

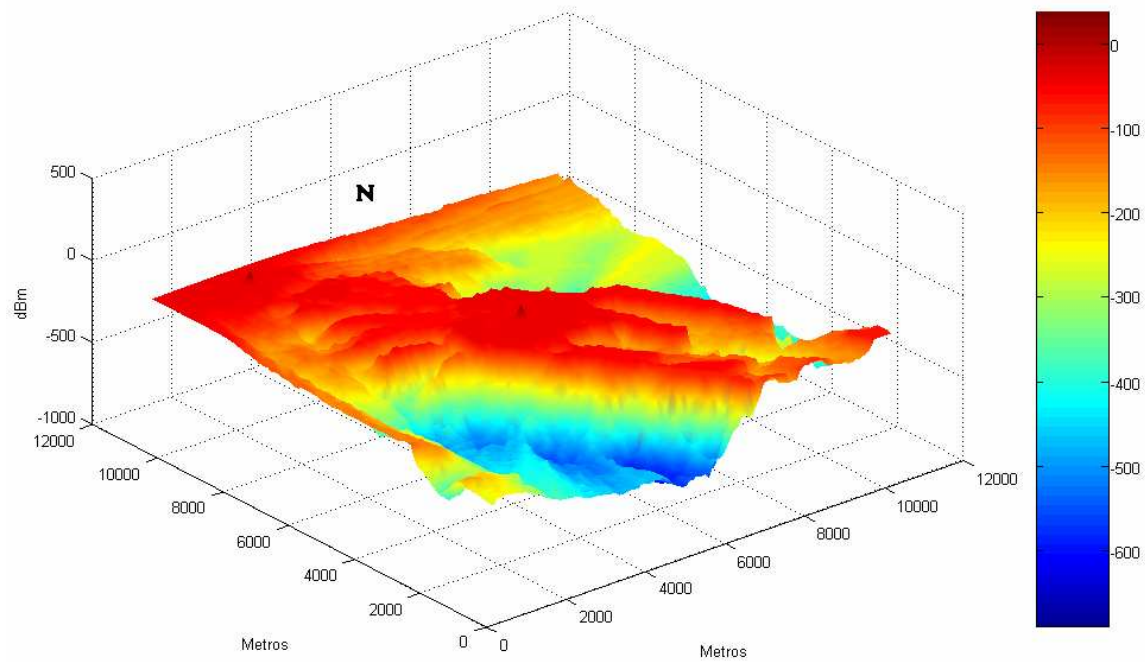


Figura 4.28. Mapa de la potencia recibida con el efecto combinado de las dos antenas.

REFERENCIAS.

- [1] W.C.Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGraw Hill, 1989.
- [2] A. Rivera y R. Solares, “Geomodelos de Altimetría del Territorio Nacional (GEMA)”, en *INEGI Dirección General de Geografía*.
- [3] *Atlas Geográfico Universal*, SEP, 1998.
- [4] “MATLAB Creating Graphical User Interfaces”, en *The Math Works, Inc.*, version 7, 2006.
- [5] H. Holma y A. Toskala, *WCDMA for UMTS Radio Access for third Generation Mobile Communications*, John Wiley & Sons, 2000.
- [6] “790-6000 MHz Base Station Antennas for Mobile Communications”, en *Kathrein Catalogue*, 2007.
- [7] J.D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, John Wiley & Sons, 2000.
- [8] S. Faruque, *Cellular Mobile Systems Engineering*, Artech House, 1996.

CONCLUSIONES

Con base a lo realizado en este trabajo se logró comprender como se propagan las ondas electromagnéticas en diferentes medios, en especial en el espacio libre en donde se pueden presentar una serie de fenómenos que afectan a estas ondas en la trayectoria de propagación. Debido a esto también se estudiaron las bandas de frecuencias en las que esta dividido el espectro electromagnético, en especial las bandas VHF y UHF las cuales fueron asignadas para el desarrollo de los sistemas de comunicaciones móviles, asimismo se presentaron los fenómenos conocidos como desvanecimientos los cuales provocan que en un sistema de comunicaciones no se pueda asegurar el 100 por ciento de la cobertura debido a que estos desvanecimientos presentan un comportamiento aleatorio. Por esta razón se desarrollaron los modelos de predicción de pérdidas por trayectoria.

En este trabajo se estudiaron algunos de los modelos de pérdidas por trayectoria debido a que estos modelos son la base para el desarrollo de un modelo punto-punto el cual es el principal objetivo de esta tesis. Retomando el tema de los modelos de pérdidas por trayectoria, estos se pueden clasificar como área-área y punto-punto. La diferencia entre estos dos modelos es que un modelo área-área considera la superficie del terreno como plana esto es no considera las elevaciones que se presenta en el terreno, esto provoca que las predicciones de la potencia recibida sean promediadas a una misma distancia, sin embargo el modelo punto-punto considera no solo las elevaciones que se presenten en el terreno con respecto a la posición del móvil sino también considera las características del ambiente en donde se realiza la predicción.

Por otra parte, al comprender el principio de operación de un modelo área-área nos fue posible entender las etapas (los factores de corrección, pérdidas por trayectoria y modelo punto-punto a partir de un modelo área-área) para realizar la simulación del modelo de Lee.

El punto principal en el que se basa el modelo de Lee para obtener la potencia recibida en un terreno son las difracciones de la señal, debido a que este modelo está diseñado para que la señal bordeé uno o varios obstáculos que se puedan presentar en la trayectoria entre la estación base y el móvil. Al realizar la simulación de este modelo en un terreno real comprobamos su comportamiento puesto que las elevaciones de estos terrenos permiten que se presenten trayectorias sin línea de vista entre la estación base y el móvil por lo que la señal transmitida sufre pérdidas debido a las difracciones.

Con base a los resultados obtenidos y conforme a los terrenos que seleccionamos obtuvimos los mapas de la potencia recibida, cada uno de estos presentó un comportamiento diferente debido a sus elevaciones. Para el Distrito Federal y la zona de Chichén Itzá no se notó a grandes rasgos el impacto que tiene el modelo de Lee debido a que estas zonas son muy planas, en ambos casos se tienen potencias de -60 dBm en la mayoría del terreno. En el caso de Monterrey la antenna de la estación base está situada cerca de una montaña se tienen potencias de -50 dBm en las zonas donde la montaña no obstruye la línea de vista mientras que en las zonas que se encuentran detrás de la montaña la potencia recibida es menor, siendo la mínima de -600 dBm en la faldas de la montaña debido a que las pérdidas por difracción son mayores. Por otra parte Guadalajara al igual que el Distrito Federal y Chichén Itzá presenta en la mayoría del terreno una superficie plana en donde la potencia promedio es de -50 dBm, sin embargo al noreste del terreno se encuentra un peñasco de aproximadamente 500 metros de profundidad provocando que la potencia mínima sea de -900 dBm. El terreno del Santuario de la Mariposa Monarca es muy irregular lo que hace necesario que la antenna de la estación base sea ubicada en un punto alto del terreno para que se pueda tener una mayor zona de cobertura en la cual se tenga una potencia alta.

Comparando el perfil del terreno del Distrito Federal con el de Monterrey podemos observar que la potencia recibida es diferente debido al terreno, para el Distrito Federal se tiene una potencia de -62 dBm ya que presenta LOS entre la

estación base y el móvil mientras que la potencia recibida en Monterrey a 5 Km es de -463.03 dBm, sin embargo para el Santuario se tiene una potencia de -538.28 dBm. Debido a esto podemos decir que la potencia depende de la altura de las elevaciones que se presentan en la trayectoria.

Otro factor que influye en la predicción de la potencia recibida para el modelo de Lee son las pérdidas por trayectoria las cuales dependen del tipo de ambiente en el que se aplique debido a que cada ambiente presenta diferentes estructuras. Cuando se comparó la zona del Santuario de la Mariposa Monarca en los ambientes de área abierta y de New York se comprobó el efecto que causan los ambientes en la potencia recibida ya que las pérdidas por trayectoria en New York son mayores que en el área abierta por tal motivo el mapa de la potencia recibida con el ambiente de New York presenta una mayor atenuación que con el mapa obtenido con el área abierta.

Además de esta simulación se realizó la simulación para un modelo área-área (Okumura-Hata) con esto se demostró que el modelo punto-punto considera todas las elevaciones del terreno y para cada punto obtiene una potencia, por otra parte el modelo área-área solamente considera la distancia entre la estación base y el móvil debido a que considera la superficie como plana. Gracias a esta simulación comprendimos el impacto que tiene el terreno y el ambiente en la cobertura de un sistema de comunicaciones móviles.

Con ayuda de esta simulación se logró demostrar que es necesario conocer la ubicación más adecuada de la estación base para poder tener una buena recepción en el terreno, si esto no es suficiente para garantizar una buena cobertura podemos emplear otra antena en las zonas de baja potencia con el fin de combinar el efecto de esta antena con la primera.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AT&T	American Telephone and Telegraph
COST 231	European Committee of Scientific and Technology 231 Model
EHF	Extremely High Frequency
ELF	Extremely Low Frequency
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecommunications System
GUI	Graphical User Interfaces
GUIDE	Graphical User Interface Development Environment
GSM	Global System for Mobile communications
HF	High Frequency
IMT-2000	International Mobile Telecommunications for year 2000
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática
ITU	International Telecommunications Union
LF	Low Frequency
LOS	Line-of-sight
MF	Medium Frequency
NLOS	Non-line-of-sight
SHF	Super High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency

ABREVIATURAS

dB	Decibeles
dB/dec	Decibeles por década
dBm	Decibeles referidos a un mili watts
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
KHz	Kilohertz
Km	Kilómetros
Km ²	Kilómetros cuadrados
Km/s	Kilómetros por segundo
M	Metros
MHz	Megahertz
μ s	Microsegundos
Ms	Milisegundos
Ns	Nanosegundo
W	Watts
°C	Grados centígrados